

Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn

Hoofdrapport



Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn
Hoofdrapport

Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn

Hoofdrapport

| | |
|-----------------------|--|
| Opdrachtgever | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Contactpersoon | Laurens Jansen, Henk Oskam, Arjan Sieben |
| Referenties | |
| Trefwoorden | |

Documentgegevens

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Versie | 1.0 |
| Datum | 23-05-2023 |
| Projectnummer | 11208437-000 |
| Document ID | 11208437-000-ZWS-0008 |
| Pagina's | 129 |
| Classificatie | |
| Status | definitief |

Auteur(s)

| | | |
|--|-------------|--|
| | Anke Becker | |
| | | |

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 evaluatie is gerapporteerd in drie rapporten. Het “Deelrapport 1: Data en effecten” (Becker et al., 2023a) beschrijft allereerst 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). Vervolgens wordt gekeken naar de invloed van de suppleties op de bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden op de Boven-Rijn (vraag c). Tot zover mogelijk zijn de conclusies gebaseerd op beschikbare gegevens. Waar nodig werd de analyse ondersteund door resultaten van numerieke modelberekeningen. De berekeningen zijn tevens gebruikt om een voorspelling van de invloed van de suppleties in de toekomst te maken (vraag c). In “Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties” (Becker et al, 2023b) 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).

Voorliggend rapport is het hoofd rapport met de afwegingen voor het ontwerp en monitoring van de suppleties (vraag a)), de afwegingen en leerpunten over de uitvoering (vraag b), een samenvattende beschrijving van de dynamiek van de suppleties (vragen c) en d)) en de “lessons learned” voor toekomstige suppleties (vraag e).

Hieronder worden de belangrijkste conclusies over de dynamiek van de suppleties op de Boven-Rijn en de leerpunten voor toekomstige suppleties samengevat.

Dynamiek van de Boven-Rijn suppleties (zie hoofdstuk 5):

De eerste suppletie was vrij dun en is deels in de diepe kuil bij de uitmonding van de Griethauser Altrhein bij rkm 864 geplaatst. Dat gebied is erg dynamisch, waardoor het front van deze suppletie tijdens het hoogwater van 2018 volledig is geërodeerd en vervolgens als sedimentgolven naar benedenstrooms gelopen is. Daardoor is er geen duidelijke verplaatsing van het suppletiefront te herkennen. De tweede suppletie is dikker uitgevoerd en stopte bovenstrooms van deze diepe kuil, waardoor het front duidelijker te herkennen is. Ook na afloop van meerdere hoogwaters is deze maar over een korte afstand verplaatst. Ook is er aan de bovenstroomse kant van de suppleties maar beperkte erosie geobserveerd. De aangebrachte bodemverandering blijft dus lang liggen.

De reden hiervoor is zeer waarschijnlijk de bodemtrend die wordt veroorzaakt door de aanleg van de vaste laag bij Spijk. De suppletie realiseert een reeds aanwezige trend in de bodem en ageert dus niet meer volledig als een verstoring van de bodemligging. Waarschijnlijk wordt de suppletie daardoor gedeeltelijk of geheel immobiel, en wordt het sedimenttransport benedenstrooms maar weinig aangevuld door deze suppletie. Met zekerheid kan dat pas over een aantal jaren (5-10) worden gezegd.

De Medusa-metingen hebben laten zien dat de gesuppleerde tracer sneller richting benedenstrooms beweegt dan het front in de bodemligging en daarbij aan de linkerkant van de rivier blijft. De migratiesnelheid is niet makkelijk af te leiden uit de meetgegevens. Duidelijk is dat de tracer met name bij hogere afvoeren verplaatst. Gemiddeld over een langere periode met hogere en lagere afvoeren lijkt een snelheid in de orde van 1 à 2 km/jaar een realistische schatting.

Invloed van de Boven-Rijn suppleties op bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden (zie hoofdstuk 5):

De suppleties op de Boven-Rijn hebben op verschillende manieren de bodemligging benedenstrooms beïnvloed:

1. De suppleties hebben een reactie in de bodemligging in de vorm van een 2D-patroon vergelijkbaar met alternerende banken veroorzaakt. Dit is gebeurd omdat beide suppleties alleen aan één kant van de rivier gestort zijn en daarom een herverdeling van de stroming plaatsvindt.
2. Een voortplanting van het suppletiefront stroomafwaarts was bij de Boven-Rijn suppleties nauwelijks te herkennen. Bij suppleties op andere locaties moet hiermee wel rekening worden gehouden.
3. Bij de erosiekuil bij de monding van de Griethauser Altrhein zijn bij hoogwater in korte tijd belangrijke hoeveelheden suppletiemateriaal geërodeerd, vergelijkbaar met het gedrag van een ontgrondingskuil. Dit materiaal is vervolgens in golven stroomafwaarts gemigreerd.

Toekomstige suppleties kunnen de bodemligging bovendien als volgt beïnvloeden:

1. Mogelijk worden ook natuurlijke bodemvormen zoals duinen beïnvloed door een suppletie. Op de Boven-Rijn kon dit niet worden gezien, omdat op dat traject van nature weinig bodemvormen optreden.
2. Daarnaast kunnen toekomstige suppleties, die de waterstand bovenstrooms duidelijk opstuwen, (lichte) sedimentatie bovenstrooms veroorzaken. Bij de Boven-Rijn suppleties is dat niet duidelijk zichtbaar geworden, mogelijk omdat deze maar een zeer beperkte opstuwings veroorzaakt hebben (paragraaf 5.3), en omdat de invloed van de vaste laag (een erosietrend bovenstrooms van de suppleties) deze tegen werkt.

De erosie naast de suppletie (2D-reactie, zie punt 1) hierboven) kan het optreden van erosiekuilen aan de rechterkant van de rivier hebben versneld. Het is echter aannemelijk dat de invloed van de aanleg van de vaste laag bij Spijk daarvoor belangrijker was, gezien het volume van de vaste laag met ruim 200.000 m³ duidelijk groter is dan van de suppleties (70.000 m³ en 55.000 m³).

Daarnaast beïnvloeden trends in de bodemligging van het suppletietraject en in de omgeving daarvan de manier hoe de bodem reageert op de suppletie. Dat kunnen reeds aanwezige trends zijn (bijvoorbeeld door de aanleg van de vaste laag bij Spijk op de Boven-Rijn) of (bij toekomstige suppleties) trends die worden verwacht vanwege geplande ingrepen. Voor de Boven-Rijn suppleties betekent de invloed van de vaste laag dat de suppleties, en de (2D) reactie in de bodemligging, weinig zullen uitdempnen of stroomafwaarts verplaatsen.

De ontwikkeling van de bodemsamenstelling in ruimte en tijd in de bemonsterde laag op de Boven-Rijn is sterk variabel, en wordt beïnvloed door diverse morfodynamische processen. In de beschouwde periode (2016-2022) zijn er geen grootschalige trends in bodemsamenstelling waarneembaar die de conclusies van de analyses beïnvloeden. Het gesuppleerde materiaal valt qua zeefkromme binnen de geëiste bandbreedte maar is gemiddeld grover dan de ontvangende bodem.

Ondanks het relatief grove materiaal hebben de suppleties niet geleid tot een waarneembare voortschrijdende vergroving benedenstrooms. Zowel de gemiddelde en mediane diameter, als het zandpercentage fluctueert binnen de bandbreedtes van variaties in de omgeving, en lijken meer afhankelijk van golf-effecten afkomstig van invloeden verder bovenstrooms. Ook op de suppletielocatie zelf is binnen 1 jaar na suppletie de samenstelling van de top laag gelijk geworden aan die van de omgeving. De verwachting is dat dit in de toekomst niet meer zal veranderen.

De suppleties verhogen de waterstand bij Lobith, dus aan het bovenstroomse einde van de suppleties, met ongeveer 1 cm per suppletie. Dit effect is het sterkst bij lagere afvoeren en het kleinst bij hoge afvoeren. Het maximale waterstandseffect wordt direct bovenstrooms van de suppleties, aan de linkerkant van de rivier, bereikt. Het waterstandseffect neemt af in bovenstroomse richting. Bij hoogwater is bij de Rijnbrug bij Emmerich (rkm 853) nog ongeveer de helft van het waterstandseffect te zien.

De opstuwing zal afnemen naarmate de suppletie uitdempt. De verstoring in de bodem door de Boven-Rijn suppleties zal echter maar heel langzaam en mogelijk niet volledig verdwijnen vanwege de invloed van de vaste laag bij Spijk. Er wordt daarom verwacht dat de opstuwing nog heel lang zichtbaar zal zijn.

Invloed op de rivierfuncties (hoofdstuk 6):

Bij maatgevende afvoer veroorzaken beide suppleties samen, direct na aanleg van de tweede suppletie, maximaal 1,5 cm opstuwing op de as van de rivier.

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. De suppleties hebben maar een beperkte invloed op stroomsnelheden in langs- en dwarsrichting. 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. 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 en geen nieuwe MGD-locaties gecreëerd. Mogelijk ontstaat bij de bestaande knelpunten bij rkm 864,1 of 866,5 in de toekomst een lichte toename van het nodige vaargeulonderhoud.

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 met een risico op instabiliteit.

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.

Advies voor toekomstige suppleties (hoofdstuk 8, gebaseerd op hoofdstukken 4 t/m 7):

Bij het plannen van toekomstige suppleties wordt aanbevolen om bij de locatiekeuze rekening te houden met de hierboven beschreven invloed op de bodemligging om erosie of sedimentatie op ongewenste locaties te voorkomen. De conclusies over de invloed van de Boven-Rijn suppleties op de kleinschaligere dynamiek (amplitude van stroomafwaarts migrerende golven van suppletiemateriaal) is mogelijk niet zomaar over te dragen naar andere riviertrajecten met ander, bijvoorbeeld fijner, bodemmateriaal of meer natuurlijke dynamiek. Daarom wordt aanbevolen om dit bij toekomstige suppleties te monitoren. Wel kan een analyse van de lokale dynamiek voorafgaand aan de suppletie een eerste indruk geven en wordt daarom aanbevolen. In hoeverre natuurlijke bodemvormen zoals duinen worden beïnvloed door een suppletie kon op de Boven-Rijn niet worden gezien, omdat op dat traject van nature weinig bodemvormen optreden. Ook hiervoor geldt het advies om dit bij toekomstige suppleties (op andere trajecten) te monitoren.

Bij de locatiekeuze moet ook rekening worden gehouden met reeds aanwezige trends of toekomstige trends door bijvoorbeeld geplande ingrepen in de rivier, omdat deze het functioneren van de suppleties kunnen beïnvloeden. Daarnaast is het bij de locatiekeuze relevant om eventuele invloeden van suppleties op de afvoerverdeling op splitsingspunten en op waterstanden in beeld te brengen.

Er wordt aanbevolen om een geometrie voor te schrijven waarmee ongewenste neveneffecten zo veel mogelijk worden beperkt. Daarvoor voldoet het voorschrijven van een maximale storthorizon, mogelijk gecombineerd met een maximale dikte. De hoeveelheid sediment kan worden voorgeschreven in tonnen in de beun in plaats van een volume op de rivierbodem. De Boven-Rijn suppleties hebben namelijk laten zien dat door snelle bodemdynamiek het middels peilingen nauwkeurig aantonen van een volume op de bodem lastig kan zijn. De frequentie van de peilingen is daarbij belangrijk; op de Boven-Rijn waren wekelijkse¹ peilingen niet voldoende, dagelijkse² wel. Bij suppleties met meer doelen dan het aanvullen van het sedimenttransport benedenstrooms, bijvoorbeeld het ophogen van waterstanden of natuurbeheer, kan controle op volume wel relevant zijn.

Ook na de monitoringscampagne van de Boven-Rijn suppleties is nog steeds niet goed bekend wat de invloed van de samenstelling van een suppletie op het gedrag van de suppletie is. Dit kan ook nog niet goed worden voorspeld met modellen. Vooralsnog lijkt de veiligste keuze voor de samenstelling van toekomstige suppleties nog steeds een vergelijkbare samenstelling als het natuurlijke bodemmateriaal. Het gedrag van de bodem blijft dan vermoedelijk vergelijkbaar als nu, ook na suppletie. De suppleties op de Boven-Rijn hebben laten zien dat het voorschrijven van een bandbreedte in de zeefkromme het risico bestaat dat het toegepaste materiaal in totaal vrij fijn of grof wordt vergeleken met het van nature aanwezige bodemmateriaal. Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld aparte bandbreedtes voor te schrijven voor verschillende sedimentfracties, en door de keuze van de data waarmee de bandbreedtes worden gedefinieerd goed te onderbouwen (welk deel van het riviertraject is representatief voor “de ontvangende bodem”?). Overigens zullen er bij uitvoering van een suppletie altijd afwijkingen zijn ten opzichte van het materiaal op de ontvangende bodem. Dit vanwege een mogelijke invloed van het stortproces en de stroming tijdens het storten enerzijds en de onzekerheid in de samenstelling van de ontvangende bodem anderzijds.

¹ een in-peiling op maandagochtend en een uit-peiling vrijdagmiddag

² een in-peiling 's ochtends voor begin van het suppleren en een uit-peiling 's avonds na afsluiting

Bij de Boven-Rijn suppleties kon niet worden vastgesteld dat deze afwijking tot neveneffecten heeft geleid (zie “Invloed van de Boven-Rijn suppleties op bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden” verder boven).

Ook is in de pilot duidelijk geworden dat de samenstelling van het materiaal dat op de bodem terecht komt kan verschillen van de samenstelling in de bak. Het kan daarom uitmaken of de samenstelling wordt voorgeschreven voor de bak of voor op de bodem. Er is echter niet voldoende betrouwbare informatie beschikbaar om dit effect te kwantificeren. Vooralsnog wordt geadviseerd er van uit te gaan dat de samenstelling in de bakken kenmerkend is voor de gemiddelde samenstelling van de suppletie-laag op de bedding.

Daarnaast kan de voorgeschreven samenstelling van een suppletie de prijs beïnvloeden, bijvoorbeeld als een moeilijk op de markt verkrijgbaar materiaalmengsel wordt voorgeschreven. Het is dan te overwegen om onderdelen van een gewenst mengsel apart in te kopen en aan wal te mengen. Ook zou met een volgende suppletie getest kunnen worden of het qua uitvoering en neveneffecten een optie is om verschillende onderdelen van het mengsel in aparte lagen aan te brengen. Daarbij zouden bewust grovere en fijnere lagen afgewisseld moeten worden om vermenging ter plaatse door de bodemdynamiek te bevorderen. De observaties bij de suppleties op de Boven-Rijn duiden er immers op dat menging van het materiaal ook na aanleg op de rivierbodem gebeurt.

De Boven-Rijn suppleties geven inzicht in het gedrag van een enkelvoudige suppletie. Het is op dit moment nog niet duidelijk wat de langere termijn gevolgen van regelmatige suppletie op bodemligging en bodemsamenstelling zouden zijn. Als RWS in de toekomst regelmatige suppleties overweegt om de erosietrend op bepaalde riviertrajecten te stoppen wordt daarom aanbevolen om de invloed op bodemligging en bodemsamenstelling te blijven monitoren en een adaptieve aanpak te volgen.

Bij de aanbesteding van toekomstige suppleties wordt aanbevolen om te letten op risico's die ontstaan door de afstemming tussen een opdrachtnemer en zijn onderaannemers. Bij de keuze van de uitvoeringsmethode voor een suppletie moet rekening worden gehouden met de hydraulische condities (stroomsnelheden en waterdieptes) en de grootte van het suppletiemateriaal (korreldiameters). Deze bepalen mede hoe nauwkeurig het suppletiemateriaal op de gewenste locatie geplaatst kan worden. Hierover is veel kennis en ervaring beschikbaar bij de diverse baggerbedrijven.

De Boven-Rijn suppleties hebben geen hinder voor de scheepvaart opgeleverd, omdat in de eisen aan de uitvoering rekening gehouden is met scheepvaart. Daardoor is wel de keuze in uitvoeringsmethodieken ingeperkt, omdat niet alle opties voor de Boven-Rijn suppleties aan de eisen voldeden. Bij toekomstige suppleties op Nederlands grondgebied moet RWS afwegen hoe streng de eisen met betrekking tot scheepvaarthinder moeten worden. Druk bevaren of smalle trajecten of trajecten met scherpe bochten kunnen een reden zijn voor strenge eisen.

Bij toekomstige suppleties wordt aanbevolen om monitoring uit te voeren voorafgaand aan de aanleg, om bijvoorbeeld een geschikte locatie te kunnen kiezen en bepaalde risico's beter in beeld te brengen, en na aanleg, om de effecten te bepalen en ervan te leren. Voor beide types monitoring wordt aanbevolen om van tevoren goed na te denken over de grootte van het traject waarover gemonitord moet worden. De ervaring met de Boven-Rijn suppleties leert dat daarbij niet alleen rekening moet worden gehouden met het traject dat naar verwachting wordt beïnvloed door het aanbrengen van een nieuwe suppletie, maar ook met trajecten boven- en benedenstrooms waarop ontwikkelingen plaatsvinden die van invloed kunnen zijn op het gedrag van de suppletie.

Projectmonitoring om ervan te leren is met name relevant voor toekomstige suppleties op de meer benedenstroomse Rijntakken, waar de ontvangende bodem over het algemeen uit duidelijk fijner materiaal (zand) bestaat. Niet alle conclusies over de suppleties op de Boven-Rijn zijn namelijk geldig voor deze riviertakken. Deze monitoring omvat bodempeilingen en bemonstering van het bodemmateriaal. Om ook meer inzichten in de verticale mengprocessen te verkrijgen wordt aanbevolen om bij toekomstige suppleties weer een tracer toe te passen en ook de verticale menging ervan te achterhalen door middel van een aantal boringen, waarin de tracer vervolgens terug gezocht wordt. Dit is noodzakelijk om de kennis over (verticale) mengprocessen te vergroten en daarmee goede aanbevelingen voor de samenstelling van toekomstige suppleties te kunnen geven, en voor de verbetering van het modelinstrumentarium.

Voor specifieke project-gerelateerde monitoring is het zinvol aansluiting te zoeken met het bestaande periodieke monitoring. Dit betreft zowel de gebruikte meetmethodes als de meetlocaties. Een zo consistent mogelijke langere-termijn database vereenvoudigt immers de interpretatie van de resultaten, ook voor het project zelf.

Daarnaast wordt sterk aanbevolen om binnen RWS het bestandsformaat, de naamgeving van bestanden en de mee te leveren metadata zoveel mogelijk te uniformeren voor alle periodieke monitoring en projectmonitoring, en om alle data centraal op te slaan en terug te laten komen in overzichtslijsten. Dit is uitermate belangrijk voor de vindbaarheid en de verwerkbaarheid van meetgegevens, ook op de langere termijn.

Inhoud

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting | 4 |
| 1 | Inleiding | 13 |
| 1.1 | Aanleiding | 13 |
| 1.2 | Achtergrond van de suppletieproef | 13 |
| 1.3 | Korte beschrijving van de suppletie | 14 |
| 1.4 | Doelstellingen van de eindevaluatie | 15 |
| 1.5 | Leeswijzer | 16 |
| 2 | Achterliggende studies | 17 |
| 3 | Afwegingen voor ontwerp en monitoring van de suppleties | 18 |
| 3.1 | Ontwerp | 18 |
| 3.1.1 | Locatie | 18 |
| 3.1.2 | Geometrie en volume | 18 |
| 3.1.3 | Samenstelling | 22 |
| 3.1.4 | Samenvatting klanteisenspecificatie | 23 |
| 3.2 | Monitoring | 24 |
| 3.2.1 | Bodempeilingen | 24 |
| 3.2.2 | Bodemmonsters | 25 |
| 3.2.3 | Monitoring van het tracer materiaal | 26 |
| 3.2.4 | Waterstanden, afvoermetingen en verhanglijnen | 28 |
| 3.2.5 | Stroomsnelheden en afvoeren | 28 |
| 3.2.6 | Bagger- en stortactiviteiten en gebruik van de vaarweg | 28 |
| 4 | Evaluatie uitvoering van de suppleties | 30 |
| 4.1 | Beschrijving van de uitvoering van de eerste suppletie | 30 |
| 4.2 | Samenvatting klanteisenspecificatie (KES) | 32 |
| 4.3 | Evaluatie en “lessons learned” uitvoering en verificatie van de eerste suppletie | 32 |
| 4.3.1 | Contract | 33 |
| 4.3.2 | Survey | 33 |
| 4.3.3 | Uitvoering | 34 |
| 4.4 | Uitvoering van de tweede suppletie en evaluatie | 34 |
| 5 | Invloed van de Boven-Rijn suppleties op bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden | 36 |
| 5.1 | Invloed op de bodemligging | 36 |
| 5.1.1 | Onderzoeksvragen | 36 |
| 5.1.2 | Aanpak | 36 |
| 5.1.3 | Resultaten: ontwikkeling van de bodemligging | 37 |
| 5.1.4 | Resultaten: invloed van locatie-specifieke condities | 42 |
| 5.1.5 | Conclusies: netto effect van de suppleties en prognose | 45 |
| 5.2 | Invloed op de bodemsamenstelling | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.1 | Onderzoeksvragen | 46 |
| 5.2.2 | Aanpak | 46 |
| 5.2.3 | Resultaten | 47 |
| 5.2.4 | Conclusies | 50 |
| 5.3 | Invloed op de waterstanden | 50 |
| 5.3.1 | Onderzoeksvragen | 50 |
| 5.3.2 | Aanpak | 51 |
| 5.3.3 | Resultaten | 51 |
| 5.3.4 | Conclusies | 53 |
| 6 | Invloed van de Boven-Rijn suppleties op de rivierfuncties | 55 |
| 6.1 | Hoogwaterveiligheid | 55 |
| 6.1.1 | Onderzoeksvragen | 55 |
| 6.1.2 | Aanpak | 55 |
| 6.1.3 | Resultaten en conclusies | 55 |
| 6.2 | Gebruik van de vaarweg | 56 |
| 6.2.1 | Onderzoeksvragen | 56 |
| 6.2.2 | Aanpak | 56 |
| 6.2.3 | Resultaten | 59 |
| 6.2.4 | Conclusies | 62 |
| 6.3 | Vaargeulonderhoud en MGDs | 63 |
| 6.3.1 | Onderzoeksvragen | 63 |
| 6.3.2 | Aanpak | 63 |
| 6.3.3 | Resultaten | 63 |
| 6.3.4 | Conclusies | 64 |
| 6.4 | Stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen | 64 |
| 6.4.1 | Onderzoeksvragen | 64 |
| 6.4.2 | Aanpak | 64 |
| 6.4.3 | Resultaten | 65 |
| 6.4.4 | Conclusies | 67 |
| 7 | Ervaring uit andere projecten | 68 |
| 7.1 | Uitvoering | 68 |
| 7.2 | Ontwerp | 69 |
| 7.2.1 | Geometrie, volume en locatie | 69 |
| 7.2.2 | Samenstelling | 70 |
| 7.3 | Monitoring | 70 |
| 7.4 | Invloed op de morfodynamiek en rivierfuncties | 70 |
| 8 | Advies voor ontwerp, uitvoering en monitoring van nieuwe suppleties | 71 |
| 8.1 | Ontwerp | 71 |
| 8.1.1 | Locatie | 71 |
| 8.1.2 | Geometrie en volume | 72 |
| 8.1.3 | Samenstelling van het suppletiemateriaal | 73 |
| 8.1.4 | Frequentie | 74 |
| 8.1.5 | Overige aanbevelingen voor de planfase van een toekomstige suppletie | 74 |
| 8.2 | Uitvoering | 74 |
| 8.2.1 | Vorbereiding van de suppletie | 75 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 8.2.2 | Uitvoering van de suppletie | 75 |
| 8.2.3 | Voorkomen van scheepvaarthinder | 76 |
| 8.2.4 | Monitoren van de uitvoering | 76 |
| 8.3 | Monitoring | 77 |
| 8.3.1 | Monitoring in de planfase van een nieuwe suppletie | 77 |
| 8.3.2 | Monitoring voor het uitbreiden van onze kennisbasis | 77 |
| 8.3.3 | Afstemmen met periodieke monitoring en monitoring voor andere projecten | 78 |
| 8.3.4 | Uniformeren van dataformaten en naamgeving en centrale opslag van data | 79 |
| 9 | Literatuurverwijzingen | 80 |
| A | Monitoringsplan | 82 |
| B | Overzicht van voor- en nadelen van verschillende opties voor de uitvoering van de suppleties op de Boven-Rijn volgens Weijnans (2016) | 83 |
| C | Samenstelling van de suppleties | 85 |
| C.1 | Eerste suppletie 2016 | 85 |
| C.2 | Tweede suppletie 2019 | 86 |
| D | Analyse modelfout overlaten | 87 |
| D.1 | Inleiding | 87 |
| D.2 | Projecten | 87 |
| D.3 | Kenmerken model | 87 |
| D.4 | Invloed van de overlaten: hydrodynamische berekeningen met vaste bodem | 88 |
| D.4.1 | Waterstanden | 88 |
| D.4.2 | Waterstandsverval tussen Lobith en Pannerdensch Kop | 95 |
| D.4.3 | Waterstandsverschillen (suppletie – referentie) | 95 |
| D.4.4 | Stroomsnelheden (vectoren) | 98 |
| D.4.5 | Stroomsnelheden (absolute waarde/magnitude) | 104 |
| D.4.6 | Verschillen in stroomsnelheden (absolute waarde/magnitude) | 111 |
| D.4.7 | Bodemschuifspanningen | 114 |
| D.4.8 | Verschillen in bodemschuifspanningen (met en zonder overlaten) | 116 |
| D.5 | Invloed van de overlaten: morfologische berekeningen met bewegende bodem | 120 |
| D.5.1 | Bodemontwikkeling (met/zonder overlaten) | 120 |
| D.5.2 | Vershil in bodemontwikkeling (met-zonder overlaten) | 124 |
| D.5.3 | Invloed van de suppletie 2016 op de bodemligging (met en zonder overlaten) | 125 |
| D.6 | Conclusie: Consequenties voor de uitkomsten van de twee projecten over de Boven-Rijn suppleties | 126 |
| D.6.1 | Eindevaluatie (2022/23) | 126 |
| D.6.2 | Tussenevaluatie (2017) | 127 |

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 rivierbodem 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 rivierbodempligging 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 rivierbodemerrosie 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 is 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 bovengenoemde 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 rivierbodemerrosie. 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 en bovenstrooms van het grensgebied is dat niet mogelijk als in Nederland de rivierbodemerrosie niet stopt. In het Grensproject heeft Nederland zich nog niet gebonden aan het stoppen van de bodemerrosie 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 sterk verminderd, maar niet volledig 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 m³ 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).

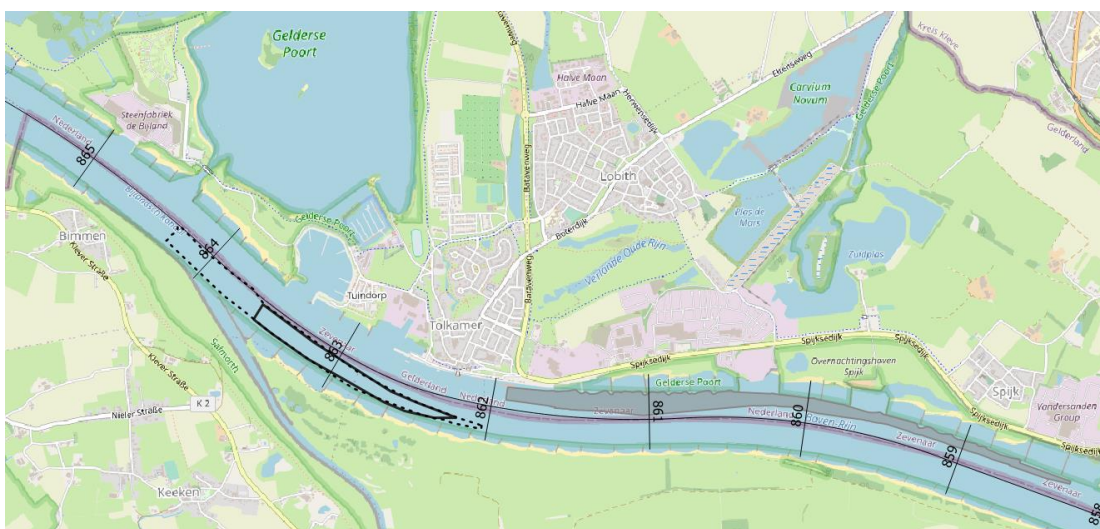
Het eerste deel van de suppletie is in 2016 uitgevoerd als een aaneengesloten, relatief dunne constante stortlaag van 0,3 m dikte op de rivierbodem onder OLR-4,0 m. Deze vorm is gekozen om te onderzoeken of hierdoor versterking van ondiepten stroomafwaarts van de suppletie kan worden voorkomen. Om de 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 (zie paragraaf 3.1.3).



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

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van reeds uitgevoerde studies, waarvan de uitkomsten zijn meegenomen in de voorliggende eindevaluatie. De afwegingen voor het ontwerp en monitoring van de suppleties (vraag a) worden beschreven in hoofdstuk 3.

Hoofdstuk 4 beschrijft de uitvoering van de suppleties en presenteert “lessons learned” (vraag b)), die zijn gebaseerd op het advies van de aannemer van de eerste suppletie in 2016 (Weijnans, 2016) en het verslag van het evaluatieatelier met de aannemer van de tweede suppletie in 2019 (Bulsink, 2019).

De vraag welke effecten door de suppleties zijn ontwikkeld en wat nog kan worden verwacht (vraag c) is in detail beantwoord in voorgaand deelrapport 1: Data en effecten (Becker, 2023a). Daarbij is ingegaan op het effect van de suppleties op bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden. De resultaten van die analyse worden samengevat in hoofdstuk 5. Vraag d) over de impact van de suppleties op rivierfuncties (hoogwaterveiligheid, gebruik van de vaarweg, vaargeulonderhoud en MGDs en stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen) is in detail beantwoord in deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties (Becker et al., 2023b). De resultaten hiervan worden samengevat in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 geeft aan welke leerpunten uit andere, vergelijkbare projecten gehaald kunnen worden, met name wat betreft de uitvoering van suppleties. In hoofdstuk 8 wordt op basis van de uitkomsten van de Boven-Rijn suppleties en de ervaring uit de overige projecten een advies geformuleerd voor het ontwerp, de uitvoering en de monitoring van toekomstige suppleties, ook op andere trajecten van de Rijntakken (vraag e)).

De conclusies over de effecten van de suppleties en de invloed op rivierfuncties zijn vooral gebaseerd op de analyse van de monitoringsgegevens van het suppletieproject. Waar nodig is dit aangevuld met resultaten van numerieke modelberekeningen. In het gebruikte model is achteraf een fout in de implementatie van overlaten geconstateerd. Een analyse van de invloed van de fout op de resultaten heeft laten zien dat de absolute bodemligging in het model anders wordt, maar de invloed van de suppleties op hydrodynamica en bodem vergelijkbaar blijft (zie Bijlage D). Daarom zijn de berekeningen voor voorliggende studie niet herhaald.

2 Achterliggende studies

Vóór begin van deze eindevaluatie zijn er al studies uitgevoerd waarin een deel van de meetgegevens uit de suppletie-pilots zijn geanalyseerd en eerste conclusies zijn getrokken. Tabel 1 geeft een overzicht en korte uitleg over de inhoud van deze studies. Waar in voorliggend rapport gebruik wordt gemaakt van inzichten uit deze studies wordt daar duidelijk naar verwezen. Waar voortschrijdend inzicht heeft geleid tot afwijkende conclusies wordt dat ook duidelijk aangegeven.

Tabel 1 Reeds uitgevoerde studies van gegevens uit de suppletie-pilot.

| Auteur(s) en jaar (zie de lijst in hoofdstuk 9 voor de volledige referentie) | Inhoud van de studie |
|--|--|
| Sieben (2016) | Analyse van het waterstandseffect van de eerste suppletie op basis van waterstandsmetingen van januari, maart en juli 2016 (dus voor en na aanleg van de eerste suppletie). |
| Sieben (2017) | Analyse van bodempeilingen en Medusa-metingen tussen maart en eind december 2016, dus van net vóór aanleg van de eerste suppletie tot de eerste maanden daarna. Analyse van de contextuele morfodynamiek rond de suppletielocatie, gebaseerd op peilingen van 2006 t/m 2016. |
| Nielsen et al. (2017) | Analyse van bodempeilingen en Medusa-metingen tussen maart 2016 en februari 2017, dus van net vóór aanleg van de eerste suppletie tot een jaar daarna. Opbouw en validatie van een numeriek model voor de simulatie van het gedrag van deze suppletie. Advies voor de voortzetting van de monitoring voor de eerste suppletie. |
| Becker (2017) | Advies over de uitvoering en monitoring van de tweede suppletie, gebaseerd op de analyses van Sieben (2017) en Nielsen et al. (2017) en op aanvullende berekeningen met het model van Nielsen et al. (2017) met mogelijke varianten van de tweede suppletie. |
| Sieben (2018) | Een eerste analyse ("eerste indruk") van de invloed van het hoogwater van januari 2018 op de bodemveranderingen en het gedrag van de tracer in het gebied rond de eerste suppletie. |
| Koolstra (2020a) | Afrondende rapportage over de data die is ingewonnen na aanleg van de eerste suppletie, als afsluiting van de monitoring van de eerste suppletie. Kaarten van de bodemveranderingen tussen de peilingen. Kaarten van de verschillen tussen achtereenvolgende radiometrische (Medusa-) metingen. |
| Koolstra (2020b) | Analyse van de ruimtelijke karakteristieke contouren van het vermoedelijk tracervolume in de (voor de Medusa-metingen zichtbare) toplaag en van het vermoedelijke tracervolume onder die toplaag. Inschatting van de horizontale verplaatsingssnelheden van het gestorte graniet (tracer) in langs- en dwarsrichting, als functie van de rivierafvoer. Inschatting van de voortplantingssnelheid van bodemveranderingen als functie van de rivierafvoer. |
| Tuijnder (2018) | Voorafgaand aan de aanleg van de tweede suppletie: analyse van het effect van varianten van de geometrie van de geplande suppletie op de hoogwaterstanden met behulp van WAQUA-berekeningen. |
| Lokin en Barneveld (2019) | In opdracht van de aannemer die de tweede suppletie in 2019 heeft uitgevoerd (Maartens en van Oord), eerste analyse van veranderingen in korrelsamenstelling, de invloed van scheepvaart op de bodem en het herstel van beddingvormen. |
| Becker (2020), aangevuld in Becker (2022) | Analyse van de veranderingen in bodemligging in de tijd tussen de aanleg van de tweede suppletie tot aan eind 2021. |

3 Afwegingen voor ontwerp en monitoring van de suppleties

Dit hoofdstuk beschrijft hoe en met welke afwegingen de suppleties zijn ontworpen (zie paragraaf 3.1) en gemonitord (zie paragraaf 3.2).

3.1 Ontwerp

3.1.1 Locatie

De suppleties zijn in de Boven-Rijn geplaatst vanwege de samenwerking en afspraken met de Duitse WSD West in het kader van het grensproject (zie paragraaf 1.2). Om verstoring van de sedimentverdeling bij het splitsingspunt Pannerdensche Kop zo veel mogelijk te beperken is besloten om de suppleties minstens één rivierbocht bovenstrooms van het splitsingspunt te plaatsen. Dat biedt tussen het stortgebied en het splitsingspunt enige afstand voor de ontwikkeling van een sedimentverdeling over de breedte die past bij de natuurlijke verdeling in dit rivierstuk. Daarom is voor de eerste suppletie in 2016 voor de buitenbocht tegenover Lobith gekozen (links van de as tussen rkm 862,0 en 864,3), aan de Duitse zijde van de landsgrens. Figuur 1 laat de ligging van deze suppletie zien.

Vorbereidend op de tweede suppletie in 2019 is het gedrag van de eerste suppletie in het eerste jaar na aanleg bekeken en zijn meerdere varianten voor de vervolgsuppletie overwogen (Becker, 2017). Er is ervoor gekozen om de tweede suppletie op dezelfde locatie als de eerste suppletie aan te leggen. Dit omdat de andere optie met ruimte onder OLR (rechts van de as tussen rkm 864,5 en 867,2) in het directe benedenstroomse invloedsgebied van de eerste suppletie en dicht op de Pannerdensche Kop zou liggen. Daarmee zou een tweede suppletie het zicht op de systeemrespons op de eerste suppletie vertroebelen en zou er een grote kans zijn dat bestaande ondiepten werden versterkt. Dit betekent dat de tweede suppletie voor een deel gestapeld is op de eerste suppletie, en dat maakt de omvang van de suppletie als geheel groter. Dit kon worden besloten omdat in de evaluatie van de eerste suppletie de risico's goed beheersbaar bleken. Bijkomend argument voor handhaving van de locatie uit 2016 was dat dit blijft passen in de samenwerkingsovereenkomst met de Duitse overheid, waarin is afgesproken dat de Duitse overheid een vaste laag in de Nederlandse bocht tussen rkm 858,2 en 861,6 zou aanleggen (opgeleverd in 2012) en de Nederlandse overheid een suppletie zou uitvoeren in de bocht van rkm 862,0 en 864,3 op Duits grondgebied.

Dus door de tweede suppletie te stapelen op de eerste kunnen ook van de tweede pilot nieuwe lessen worden geleerd. Uiteindelijk is de tweede suppletie geplaatst tussen rkm 862,2 en rkm 863,6. De geometrie van beide suppleties wordt beschreven in de volgende paragraaf.

3.1.2 Geometrie en volume

De overwegingen die hebben geleid tot het ruimtelijk ontwerp van de suppleties zijn uiteindelijk samengevat in de klanteisenspecificaties (KES) voor de eerste suppletie (Bokkes en Peters, 2015) en de vraagspecificatie eisen (VES) voor de tweede suppletie, waarop de uitvoering van het werk is gebaseerd (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, RWS-PPO, 2018). Deze zijn samengevat in Tabel 3.

De achtergrond van deze ontwerpeisen is als volgt. Bij het ontwerp van de suppleties zijn de rivierkundige aspecten uitgewerkt zoals deze worden benoemd in het Rivierkundig BeoordelingsKader (RBK).

Om een toename van het nodige vaargeulonderhoud en een afname van het vlot en veilig varen te voorkomen dient te grote verondieping ter plekke van de stort te worden voorkomen door alleen onder OLR-4 m te storten, en dient te grote verondieping stroomafwaarts van de stort te worden voorkomen door daarbij voor de stortlaag een gemiddelde dikte van 0,3 m aan te houden (RWS Dienst Oost-Nederland, 2015). Deze maten zijn exclusief uitvoeringstolerantie van 0,2 m en afgeleid uit het toen geldige beheer van RWS ter behoud van de 40% toeslag bovenop de minimale diepte van 2,8 m bij OLR voor een vlot en veilig vaarweggebruik (IJmker et al., 2018). Het maximum aan de gemiddelde stortlaagdikte is afgeleid van i) de maatgevende ruimte op de rivierbodem onder het minimale vaargeulprofiel in de profielen direct stroomafwaarts van het stortgebied en ii) de hypothese dat bij passage van het gestorte materiaal door deze profielen de bodem slechts tijdelijk verhoogd wordt, met maximaal de stortlaagdikte.

Vanwege behoud van hoogwaterveiligheid is als uitgangspunt gebruikt dat de voor de toenmalige bepaling van hoogwaterstanden gebruikte referentiebodemoogte (peildatum oktober 2002) niet overschreden mocht worden.

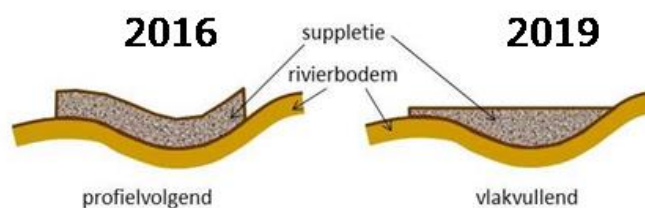
Een analyse van de beschikbare ruimte door Oost-Nederland District Zuid heeft uitgewezen dat er met onder meer deze criteria in de buitenbocht bij Lobith ongeveer 90.000 m³ materiaal gestort kon worden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS-ON, 2013).

Met een trajectgemiddelde bodeminsnijding van 0,03 m per jaar in de decennia voorafgaand aan de suppleties is het jaarlijks sedimenttekort op de Boven-Rijn geschat op 70.000 m³ als prognose voor de lange-termijn trend (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS-ON, 2013). Om de bodemerosie enigszins tegen te gaan is voor de pilot besloten om twee suppleties van telkens 70.000 m³ te storten, met enkele jaren afstand ertussen om de suppleties over langere tijd afzonderlijk te kunnen volgen en er voldoende van te kunnen leren. Met deze pilots zou de bodemerosie dus naar verwachting nog niet stoppen.

De verwachting voorafgaand aan de proef was dat de suppletie gemiddeld over de jaren met ongeveer 1 km/jaar stroomafwaarts zou verplaatsen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS-ON, 2013). Het was echter onbekend of en hoeveel de suppletiebult daarbij zou uitdempen en in welke mate er horizontale en verticale menging zou plaatsvinden. Deze onbekende verplaatsing van sediment door het riviertraject was aanleiding om een tracer aan het suppletiemateriaal toe te voegen. De nadruk van de eerste suppletie lag dan ook op de morfodynamiek die er uit zou resulteren. Zie ook het besluit om de eerste suppletie zorgvuldig en niet dikker uit te voeren dan de beschikbare ruimte benedenstrooms van het stortgebied. Gebaseerd op de OLR-kaart is daarvoor als maximale dikte voor de eerste suppletie 30 cm aangehouden (Sieben, 2013), waarbij veiligheidshalve de eventuele demping tijdens verplaatsing buiten beschouwing is gelaten. De suppletie is uitgevoerd als een aaneengesloten stortlaag ("profielvolgend") zodat de ruimtelijke schaal ervan maximaal is en daarmee beter te monitoren.

Na uitvoering van de eerste suppletie hebben Niesten et al. (2017) de gegevens van het eerste jaar van monitoring geanalyseerd en een numeriek model opgezet dat het gedrag van de suppletie naar tevredenheid kon nabootsen. Zowel uit de eerste metingen na aanleg als uit de modelberekeningen bleek dat de sedimentgolven uit de suppletie tijdens de verplaatsing van het materiaal en de sedimentatiezones in de opgewekte 2D-reactie van de bodemligging (zie hoofdstuk 5) niet hoger zouden worden dan de suppletie zelf. Dat betekende dat de aanvulling met de tweede suppletie zonder extra risico dikker uitgevoerd zou kunnen worden. Een eerste analyse van de geobserveerde dynamiek van de suppletie door het hoogwater van januari 2018 (Sieben, 2018) heeft dit bevestigd.

Omdat er bovendien tussen de uitvoering van de eerste suppletie en begin 2018 geen hinder van de scheepvaart gemeld is die verband houdt met de suppletie (IJmker et al., 2018), is voor de tweede suppletie voor een dikkere uitvoering gekozen, die zoveel als mogelijk bodemveranderingen en waterstandseffecten genereert zonder dat het risico op ongewenste aanzandingen en hinder voor de scheepvaart te groot wordt. Om ook een andere uitvoering te kunnen testen is besloten om de tweede suppletie niet profielvolgend maar vlakvullend aan te leggen door de buitenbocht op te vullen tot een vaste hoogte, namelijk OLR-3,7 m³, zie Figuur 3.



Figuur 3 Principeschets van een profielvolgende (links) en een vlakvullende (rechts) suppletie. Met profielvolgend wordt bedoeld dat er een suppletie met constante dikte wordt aangelegd. Bij een vlakvullende suppletie wordt een overdiepte opgevuld tot een vaste hoogte, de suppletiedikte varieert daardoor in de ruimte.

De focus van de tweede suppletie ligt daarmee behalve op de morfodynamiek nadrukkelijker ook op de invloed van de gecreëerde bodemverandering op het vaarweggebruik. Want de keuze voor OLR-3,7 m exclusief 0,2 m uitvoeringstolerantie biedt weliswaar meer ruimte voor een riviersuppletie, maar vermindert onder het schip de toeslag voor retourstroming tot een waarde kleiner dan de breedte-gemiddelde streefwaarde die voor de eerste suppletie als uitgangspunt is gebruikt. Dit voortschrijdend inzicht werd als pilot mogelijk geacht als tijdens en na de tweede suppletie (IJmker et al., 2018):

- indien nodig tijdig werd ingegrepen door het verwijderen van ondiepten en
- de invloed op het gebruik en onderhoud van de vaarweg voorafgaand aan, tijdens en na de uitvoering uitvoerig werd gemonitord.

Na aanleg van de tweede suppletie ontstond er discussie over de daadwerkelijk gestorte hoeveelheid sediment. De aannemer kon met zijn in- en uitpeilingen maar 55.000 m³ aantonen (e-mail Henk Oskam, 23/9/2019). In de discussie werden de mogelijke oorzaken genoemd die in Tabel 2 staan. In deze tabel staan ook de uiteindelijke conclusies over de aannemelijkheid.

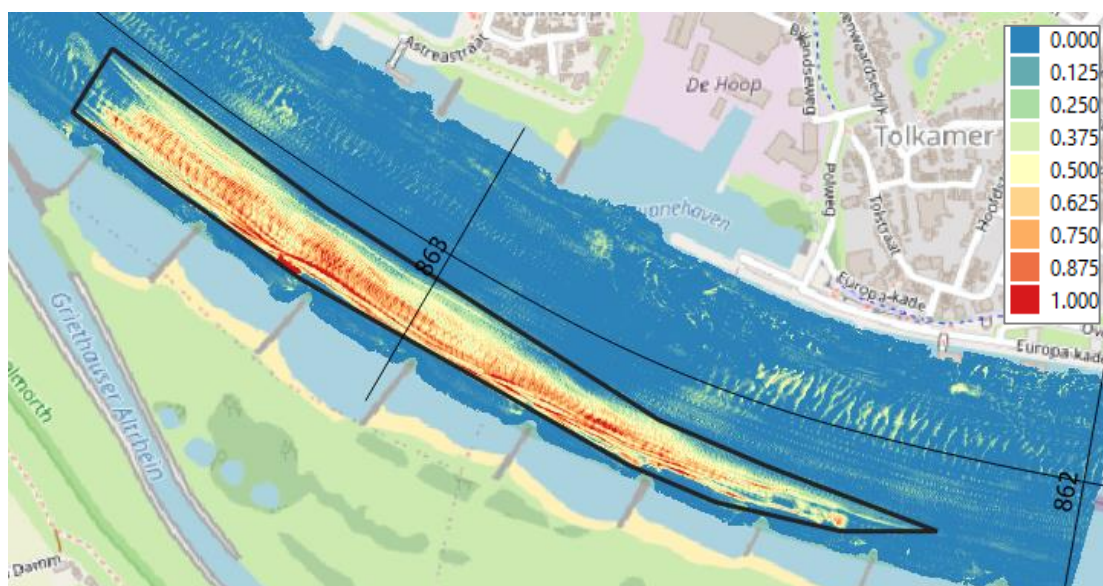
³ Met enige marge, om de aannemer voldoende vrijheid in de uitvoering te laten. Een vergelijking van bodempeilingen voor en na het plaatsen van de suppletie laten zien dat er opgevuld is tot een hoogte tussen OLR-4,0 m en OLR-4,30 m. De aangebrachte laagdikte ligt op de meeste plekken tussen 50 en 70 cm. N.B.: Deze getallen zijn gebaseerd op het verschil tussen een bodempeiling voor start van de aanleg en eentje na aanleg, daartussen zit een half jaar tijd en dus ook natuurlijke bodemveranderingen.

Conclusie was dat de mechanismen het verschil in volume niet volledig kunnen verklaren. Figuur 4 laat de dikte van de tweede suppletie zien. Dit is een benadering want dit is niet gebaseerd op de in- en uitpeilingen van de aannemer, maar op de projectpeilingen van voor en na aanleg van de suppletie.

Tabel 2 Genoemde mogelijke oorzaken voor een volumereductie tijdens/na het storten, en conclusie van RWS over de aannemelijkheid.

| mechanisme | conclusie |
|--|--|
| volumeverlies tijdens het storten door meevoeren van (fijner) suppletiemateriaal door de stroming tijdens het bezinken | Niet aannemelijk. Dit materiaal zou binnen het onderzoeksgebied weer gesedimenteerd moeten zijn en dus terug gevonden moeten zijn in de peilingen. |
| erosie tussen storten en uitpeiling | Aannemelijk in het geval van zand. Het gesuppleerde materiaal bestond echter grotendeels uit grind (zie Bijlage 9D.1). |
| erosie van de oorspronkelijke bodem door het storten | Dat materiaal zou dan vlakbij zichtbaar moeten zijn geworden. |
| verdichting van de oorspronkelijke rivierbodem tijdens het aanbrengen van de suppletie | Niet aannemelijk, het gewicht van het aangebrachte zand-grind-mengsel is naar verwachting niet groot genoeg om voldoende energie voor een verdichting teweeg te brengen. |
| klink van het aangebrachte materiaal door het gewicht van er bovenop aangebrachte lagen | Aannemelijk, maar kan hooguit een volumereductie van orde 7% verklaren. |
| Zetting van de oorspronkelijke rivierbodem door het gewicht van de suppletie | Beetje aannemelijk. Maar zou hooguit voor een volumereductie van orde 1% zorgen, uitgaande van losgepakt zand in de oorspronkelijke bodem. |

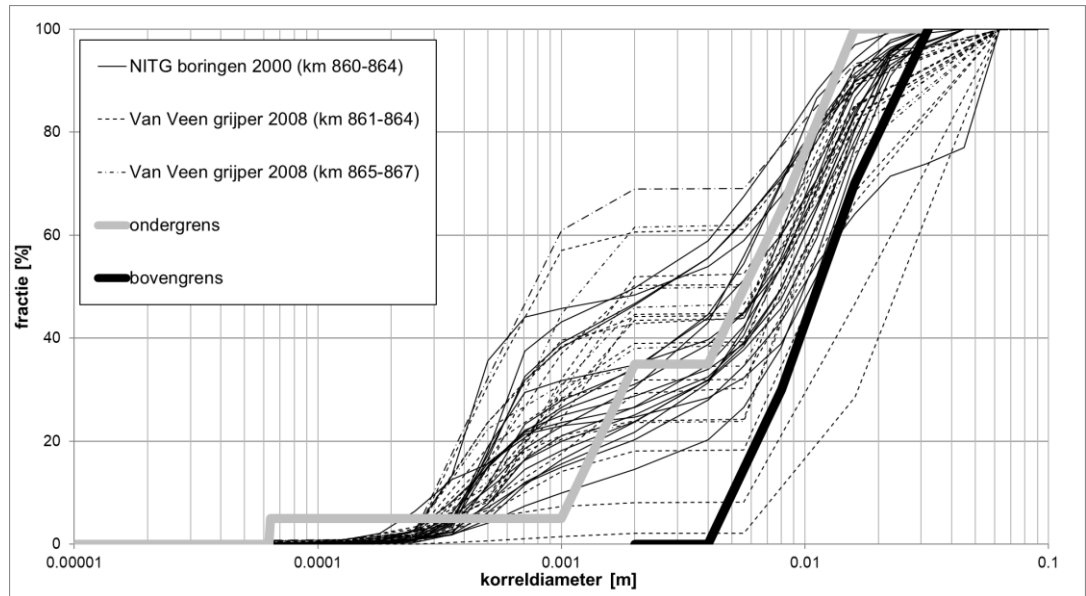
N.B.: Het verschil tussen verdichting/klink/zetting is niet heel eenduidig. Meestal wordt de term klink gebruikt voor de zakking van aangebracht materiaal onder het eigen gewicht, de term verdichting voor het kunstmatig (of door aardbevingen) verkleinen van het porie volume in het zand, en de term zetting voor zakkingen die het gevolg zijn van het aanbrengen van een extra belasting op de grond.



Figuur 4 Bodemhoogteverschil tussen week 12 en week 38 in 2019, als benadering van de dikte van de tweede suppletie.

3.1.3 Samenstelling

Om te grote lokale bodemveranderingen door suppletie te voorkomen, diende de samenstelling van het gesuppleerde materiaal te worden afgestemd op het sediment in de toplaag van de huidige lokale rivierbodem. Dit is fijner dan de suppleties die in Duitsland worden uitgevoerd, maar doet recht aan de afname van de korreldiameters in benedenstroomse richting (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 2013). Dit uitgangspunt is uitgewerkt tot een envelop rondom alle beschikbare korrelgrootte-verdelingen uit het riviertraject (Figuur 5). Vanuit de eisen van de vergunning wordt met de envelop ook gebruik van een slibfractie in het suppletiemateriaal uitgesloten. De envelop is vervolgens toegepast om suppletiemateriaal te beoordelen.



Figuur 5 Envelop (boven- en ondergrens) en beschikbare korrelgrootteverdelingen uit het rivierstuk.

De eerste suppletie is voor de helft uitgevoerd met tracermateriaal (graniet uit een steengroeve uit Noorwegen) en voor de andere helft met grind uit een zand- en grindwinning nabij Spijk. Daarvoor is de suppletie ingedeeld in drie vakken. Figuur 1 laat de indeling in vakken zien. Het graniet is aan de voor- en achterkant van de suppletie gebruikt, daartussen bevindt zich een vak van grind. Het streven daarbij was de aanleg van tracervakken binnen de toegestane stortcontour, met een maximaal oppervlak en op onderling maximale afstand.

Het gebruikte graniet is vanwege de herkomst uit de groeve hoekiger dan het gebruikte grind dat gewonnen is uit een rivierafzetting. Het graniet heeft bovendien een iets hoger soortelijk gewicht dan het grind. Beide maakt het graniet naar verwachting iets minder mobiel dan het grind, orde 20-30% volgens een schatting van Sieben (2017). Omdat daarentegen de karakteristieke korrelgrootte van hoekige korrels bij zieving wat overschat kan worden (Waterloopkundig Laboratorium, 1965), is uiteindelijk het mogelijk verschil in mobiliteit tussen de tracer (graniet) en het grind niet als belemmering voor de suppletie beschouwd.

Er is gekozen voor twee tracervakken in het begin en het einde omdat deze vakken afzonderlijk gemonitord kunnen worden en er dus meer om te leren is, ook al is dit praktisch moeilijker uitvoerbaar dan een enkel groter vak (Bokkes & Peters, 2015).

Bij de tweede suppletie is er geen tracer aangebracht, onder andere omdat besloten is bij deze (minder "voorzichtige") pilot meer op de invloed op het gebruik van de vaarweg te concentreren, en een tweede tracer niet van de eerste onderscheiden zou kunnen worden. Voor de tweede suppletie is uitgezeefd materiaal gebruikt dat vrijkwam bij de winning van bruinkool.

3.1.4 Samenvatting klanteisenspecificatie

Tabel 2 vat de eisen aan twee suppleties wat betreft de locatie, de geometrie, het volume, het materiaal en de samenstelling samen. Deze eisen zijn in detail beschreven in de klanteisenspecificatie (KES) voor de eerste suppletie (Bokkes en Peters, 2015) en de vraagspecificatie eisen (VES) voor de tweede suppletie (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, RWS-PPO, 2018).

Vet gedrukte tekst in Tabel 3 wijst op verschillen tussen de eerste en tweede suppletie.

Tabel 3 Samenvatting van de klanteisenspecificaties van de suppleties 2016 en 2019. Vet gedrukt zijn de verschillen tussen de eisen aan de twee suppleties aangegeven.

| | Suppletie 2016 | Suppletie 2019 |
|-----------------------------------|---|--|
| Locatie | tussen rkm 862,0 en 864,3 | tussen rkm 862,0 en 863,6 |
| | minimaal 25 m van de normaallijn | minimaal 25 m van de normaallijn |
| Geometrie | bovenzijde suppletie gemiddeld onder OLR2012-4 m en maximaal op OLR2012-3,8 m | waar (binnen de systeemgrens) de bodem hoger ligt dan OLR2012-4,79 m vlakvullend met: a) gemiddelde aanleghoogte van OLR2012 -3,79 m b) max. aanleghoogte van OLR2012 -3,59 m |
| | laagdikte tussen 10 cm en 50 cm, gemiddelde laagdikte 0,30 m+/- 2 cm, | waar (binnen de systeemgrens) de bodem lager ligt dan OLR2012-4,79 m profielvolgend met een max. laagdikte van 1 m+/- 20 cm |
| Volume | 70,000 m ³ | 70,000 m ³ |
| | 3 vakken: 50% tracer in vak 1, 100% vulling in vak 2, 50% tracer in vak 3 | |
| Materiaal en samenstelling | riviergrind (niet afkomstig uit het systeem) en graniet | riviergrind (buiten het gebied van de Rijn dat bij 2.000 m³/s water afvoert) |
| | korrelverdeling binnen de onder- en bovengrens | één uniforme korrelverdeling , binnen de onder- en bovengrens |
| | massapercentage van de korrelfractie < 0,063 mm dient niet meer te bedragen dan 1% | massapercentage van de korrelfractie < 0,063 mm dient niet meer te bedragen dan 1% |
| | 50-60% van het volume is tracermateriaal | |
| | Het tracermateriaal heeft dezelfde korrelverdeling als het vulmateriaal. | |
| | Voor de tracer zijn minimumgehalten aan Kalium, Uranium en Thorium gedefinieerd. | |

3.2 Monitoring

Om te kunnen leren hoe effectief suppletie is voor het ondersteunen van de rivierbodempligging en waterstanden in de Rijntakken, wat daarvan de neveneffecten zijn en welke lessen voor de toekomst uit de proef meegenomen kunnen worden, was het nodig om de ontwikkeling van de rivierbodem (bodempligging en samenstelling), de waterbeweging (waterstanden en stroomsnelheden) en het vaargeulonderhoud en -gebruik uitgebreid te monitoren.

De volgende paragrafen geven aan welke monitoring er met welke reden is uitgevoerd. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in de periodes voor en na aanleg van de tweede suppletie, omdat op dat moment het monitoringsprogramma is aangepast. Het monitoringsplan staat in Bijlage A.

3.2.1 Bodempeilingen

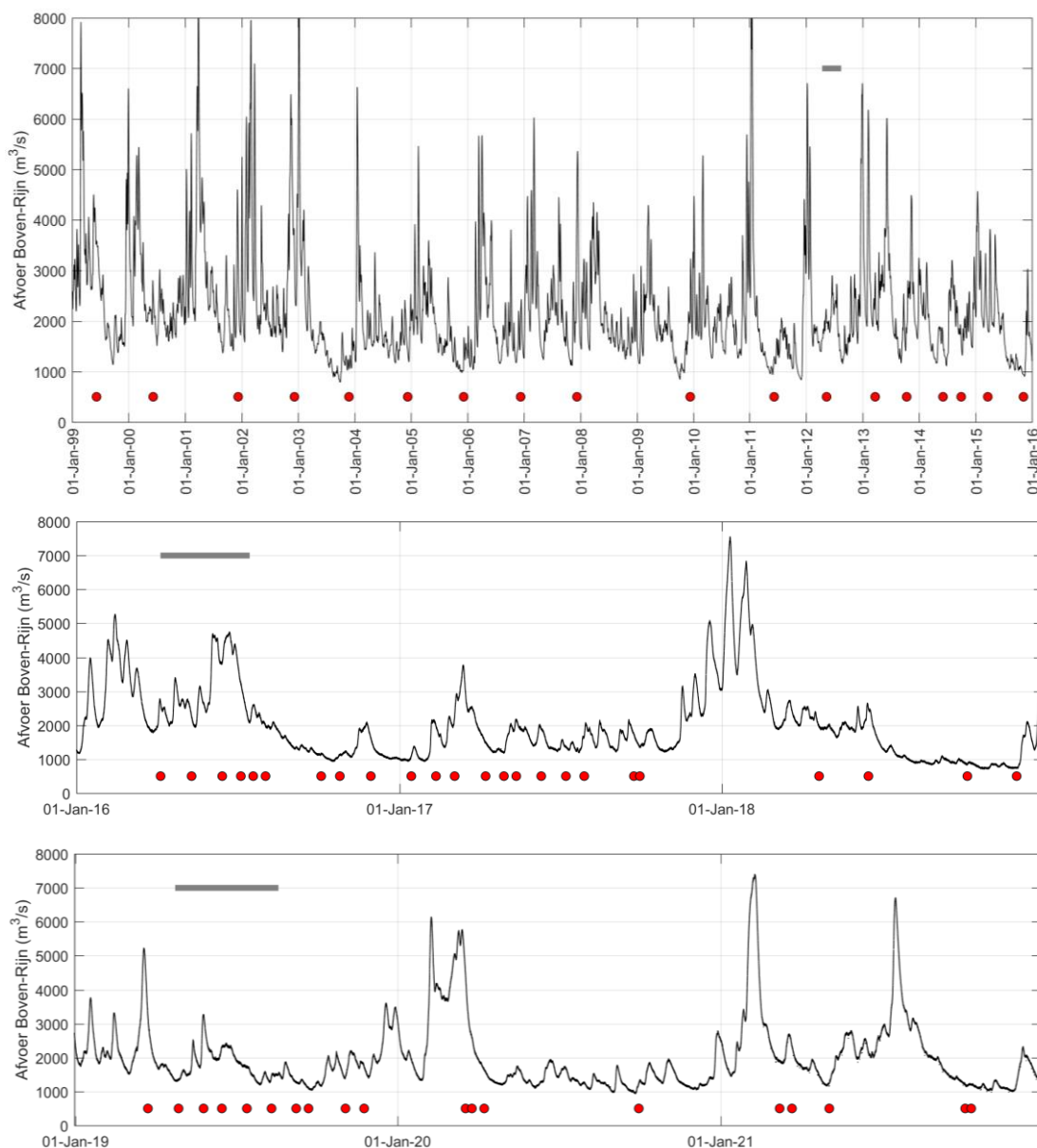
De suppleties beïnvloeden direct de bodempligging. Bodempeilingen voor en na aanleg kunnen worden gebruikt om te controleren of de suppleties volgens de eisen aan locatie, volume en geometrie zijn aangebracht, maar geven ook een beeld van de morfodynamiek tijdens en direct na uitvoering en de invloed van de wijze van uitvoeren.

Daarnaast veroorzaakt een suppletie reacties in de omliggende bodem. Behalve de bodemhoogte zou in het eerste hoog- en laagwaterseizoen na het storten ook de pakking (dichtheid) van het gestorte materiaal significant kunnen veranderen (Sieben, 2013).

Om deze effecten te kunnen waarnemen zijn er binnen het proefproject in het eerste jaar na aanleg van de eerste en tweede suppletie (maart 2016 t/m juli 2017 en maart 2019 t/m april 2020) maandelijkse peilingen tussen rkm 861 en 865/867 uitgevoerd. Daarna zijn er tot aan de tweede suppletie en tot maart 2022 twee peilingen per jaar uitgevoerd, na afloop en voor aanvang van het hoogwaterseizoen.

Naast de bodempeilingen uit het suppletieproject zelf zijn alle beheerpeilingen en de reguliere tweejaarlijkse peilingen opgevraagd. De beheerpeilingen zijn, binnen de vaargeul, vanaf januari 2014 twee keer per maand uitgevoerd tussen rkm 857,5 en rkm 952,5. De bodempeilingen zijn sinds 2013 systematisch twee keer per jaar tussen rkm 857,4 en rkm 954,0 uitgevoerd, één in het voorjaar (rond april/mei) en één in het najaar (rond oktober/november). Voor de jaren daarvoor zijn jaarlijkse peilingen voor 1999 t/m 2007, 2009 en 2012 beschikbaar. Eén van de peilingen uit 2021 is afgekeurd. De beheerpeilingen dekken alleen de vaargeul, terwijl de reguliere peilingen en de projectpeilingen het hele gebied tussen de normaallijnen omvatten. Alle peilingen zijn met behulp van vlakdekkende multibeam-opnames ingewonnen en hebben een resolutie van 1 m x 1 m (Koolstra, 2020a).

De momenten van de gebruikte peilingen zijn weergegeven in Figuur 6 (rode stippen).



Figuur 6 Afvoerhydrograaf (Lobith) en momenten van de gebruikte bodempeilingen (rode stippels). De dikke grijze lijnen (horizontaal) geven de perioden weer waarin de vaste laag en de suppleties zijn aangelegd. Voor de vaste laag betreft dit een schatting.

3.2.2 Bodemmonsters

Veranderingen in de bodemsamenstelling kunnen de ontwikkeling van de bodemligging beïnvloeden. Om de invloed van de suppletie op de bodemligging goed te kunnen verklaren dient dus ook de bodemsamenstelling te worden gemonitord (Sieben, 2013).

In het kader van de suppletieproef zijn daarom voor aanleg van de eerste suppletie, in maart 2016, en na aanleg van de suppletie jaarlijks monsters uit de bovenste 10 cm van de bodem genomen. De monsters zijn genomen tussen rkm 855 en 870 op drie langsvaaien, namelijk op de rivieras en op 70 m afstand rechts en links van de as. Figuur 7 toont dat de monsters op de as 500 m zijn versprongen ten opzichte van de monsters rechts en links van de as, die op de hele rivierkilometers genomen zijn.

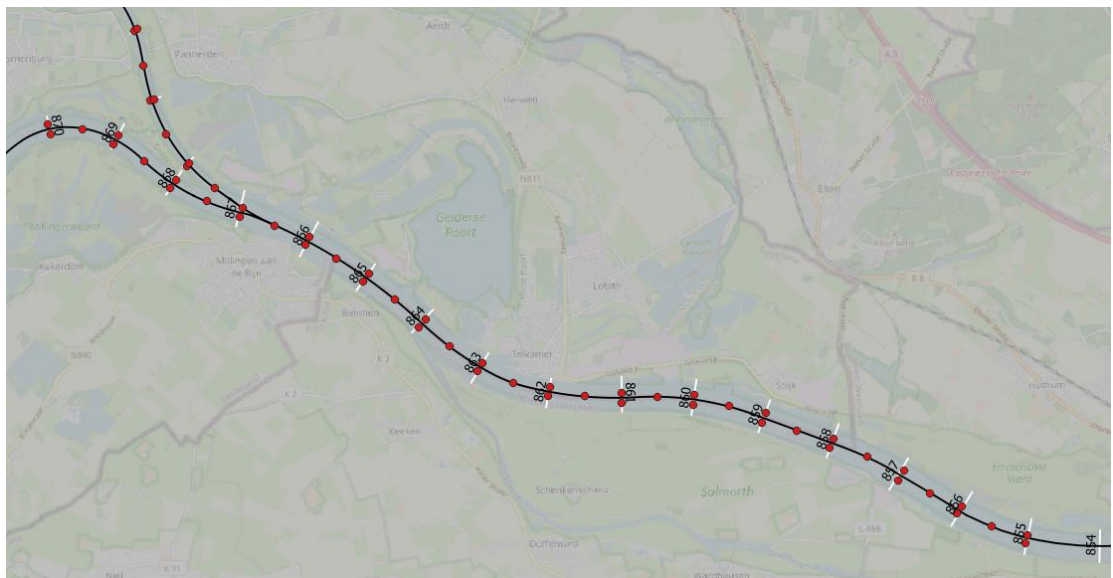
In 2019 zijn twee keer monsters genomen, een keer voor aanleg (in februari) en een keer na aanleg (in september) van de tweede suppletie.

Van de monsters van net voor aanleg van de eerste suppletie is alleen voor de korrelgroottes van < 2 mm (zand en fijner) een zeefanalyse uitgevoerd (Niesten et al., 2017, en Koolstra, 2020a). Ze geven dus maar een beperkt deel van de zeefkromme weer, want op de Boven-Rijn dekt dat materiaal maar ongeveer 20-30% van het sediment in de toplaag (hoofdstuk 5).

Binnen een straal van 5 m rond de bemonsteringslocaties zijn bovendien beeld- en video-opnames gemaakt. Deze dienen als onderbouwing van de zeefkrommes die voor de monsters zijn bepaald. Bovendien zouden de foto's mogelijk gebruikt kunnen worden voor een automatische bepaling van de zeefkrommes met behulp van beeldherkenning. Daarvoor is in de aanloop naar de suppleties en met het eerste beeldmateriaal van de suppletieproef onderzocht hoe goed dat werkt (Huismans, 2014, en De Jong, 2017).

Naast de bodemonsters van de suppletieproef zijn er gegevens uit de volgende meetcampagnes beschikbaar.

- i. meetcampagnes (1951, 1966, 1976, 1984, 1993)
- ii. meetcampagne Rijntakken (1995)
- iii. NITG-campagne (2000)
- iv. backscatter-campagne (2008)
- v. meetcampagne Rijntakken (2020)
- vi. aanvullende metingen voor de campagne uit 2020 (2021)
- vii. meetcampagne 2022



Figuur 7 Locatie van de bodemonsters die in het kader van het suppletieproject zijn genomen.

3.2.3 Monitoring van het tracer materiaal

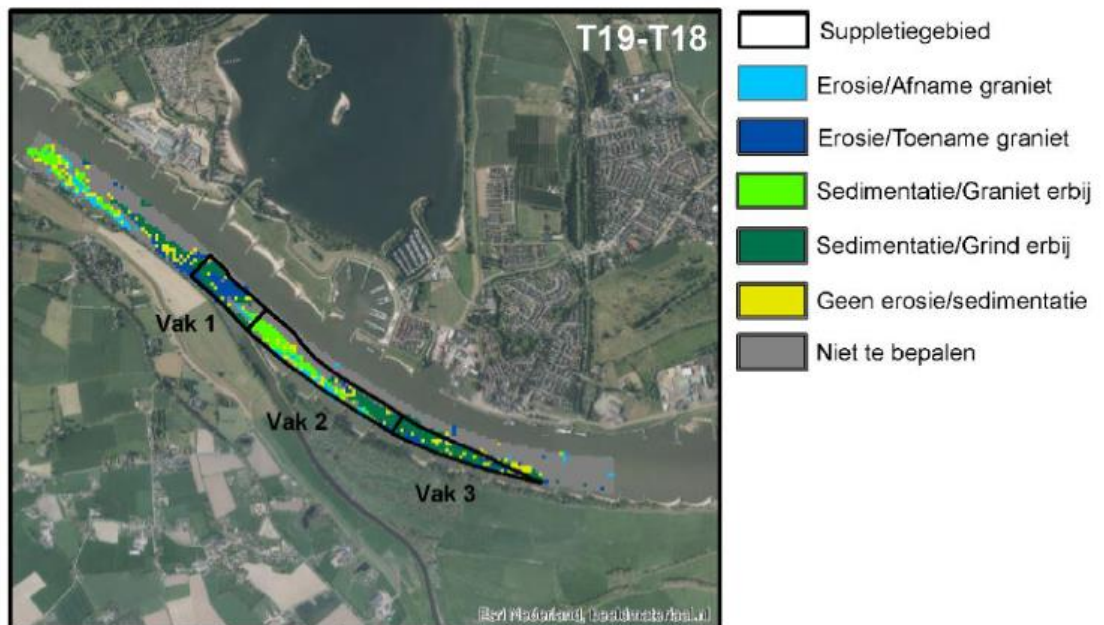
Het graniet dat als tracer materiaal is gebruikt heeft een hogere natuurlijke radioactiviteit dan het natuurlijke sediment in de Boven-Rijn. Om de beweging van het tracer materiaal uit de eerste suppletie in 2016 te kunnen volgen zijn tussen 2015 en 2018 radiometrische metingen uitgevoerd. Daarbij is de concentratie van de radionucleïden kalium (^{40}K), uranium (^{238}U) en thorium (^{232}Th) gemeten.

Opgemerkt dient te worden dat de waarneming met deze methodiek, de Medusa-metingen, zich beperkt tot de bovenste 10-30 cm in de rivierbodem (Sieben, 2013). Tracermateriaal dat dieper in de bodem terecht komt door verticale menging is in de meting niet meer zichtbaar.

De verwachting was dat de tracer in de meetperiode tot aan het splitsingspunt gevolgd zou kunnen worden, zodat meer duidelijk wordt over de invloed van de suppletie op de sedimentverdeling over Waal en Pannerdensch Kanaal (Sieben, 2013). Omdat aan de andere kant verwacht werd dat een belangrijk deel van het tracermateriaal door omwoeling van de bodem tijdens hoogwaters uit het zicht van de Medusa-metingen kan raken, is besloten om frequent te meten totdat er te weinig van het tracermateriaal aanwezig is om in de metingen gedetecteerd te worden (Sieben, 2013).

Vanaf één maand voor de suppletie in 2016 tot één jaar na de suppletie zijn er maandelijks metingen uitgevoerd tussen rkm 861.25 en rkm 865 in langsraaien met 25 m slagafstand met een resolutie van 20 m bij 20 m. In het najaar van 2017 en in 2018 zijn er ook nog drie metingen uitgevoerd tussen rkm 861,75 en rkm 868,0 (Koolstra, 2020a). Daarnaast hebben in de periode in 2015 en 2016 in totaal drie metingen plaatsgevonden binnen het complete monitoringsgebied tussen rkm 855,0 en rkm 870 langs drie langsraaien, op de rivieras en 70 m links en rechts ervan (Koolstra, 2020a).

Koolstra (2020a) presenteert kaarten van de concentratie van de relevante radioactieve stoffen, Thorium en Uranium, voor alle metingen, als indicatie van de beweging van het tracermateriaal. Koolstra (2020b) heeft de concentraties vertaald naar vermoedelijke tracervolumes in de door de meetapparatuur zichtbare toplaag van 30 cm dikte. Ook deze zijn in Koolstra (2020b) in kaarten gepresenteerd en de tracerbeweging is geanalyseerd, zie voor een voorbeeld Figuur 8.



Figuur 8 Voorbeeld van een kaart die de verplaatsing van het tracermateriaal analyseert voor de periode tussen de 18^e (T18) en 19^e (T19) Medusa-meting (uit Koolstra, 2020b). Door hoogwater is in die periode het graniet uit vak 1 stroomafwaarts verplaatst. Een deel van het grind uit vak 2 is stroomafwaarts verplaatst naar vak 1 en daar voorbij, waar vervolgens vermenging van graniet en grind ontstaat. Het gesuppleerde graniet uit vak 3 verplaatst zich naar vak 2 en 1. Grind vult een deel van vak 2, en vak 3 in zijn geheel en dekt het graniet waarschijnlijk af. In vak 2 en 3 ontstaat enige vermenging tussen graniet en grind. In vak 1 komt oorspronkelijk aangelegd graniet opnieuw bloot te liggen. (Koolstra, 2020b).

3.2.4 Waterstanden, afvoermetingen en verhanglijnen

Om te kunnen zien hoe effectief de suppleties waren in het verhogen van de laagwaterstanden bovenstreams van de suppletie zijn enerzijds de waterstandsmetingen van de bestaande meetstations Pannerdensche Kop en Lobith van belang. Daarnaast zijn binnen de suppletieproef, vanaf januari 2015 tot aan mei 2022, jaarlijks zo mogelijk vier verhanglijnen gemeten bij verschillende afvoeren. Tabel 4 geeft de niveaus weer in termen van waterstanden bij Lobith.

De verwachting was dat deze metingen in meer detail inzicht kunnen geven in de invloed van de suppleties op het waterstandsverloop tussen de meetstations. Het aantal van vier verhanglijnmetingen per jaar is het resultaat van een afweging tussen zo veel mogelijk informatie verzamelen en een reële inspanning (Bokkes & Peters, 2015).

De verhanglijnmetingen zijn uitgevoerd langs de rivieras en langs twee raaien aan beide zijden op 70 m afstand parallel aan de as. Om de waterstandseffecten van de suppletie te kunnen koppelen aan een afvoer zijn parallel aan de verhanglijnen ook afvoeren gemeten op dwarsraaien op elke rivierkilometer.

Tabel 4 Bandbreedte van waterstanden waarin verhanglijnmetingen zijn uitgevoerd.

| niveau | waterstand Lobith (m+NAP) |
|--------|---------------------------|
| 1 | 7,70-8,00 |
| 2 | 8,85-9,15 |
| 3 | 10,25-10,55 |
| 4 | 11,45-11,75 |

3.2.5 Stroomsnelheden en afvoeren

Tussen 2015 en 2021 zijn ADCP-metingen langs raaien op de hele rivierkilometers tussen rkm 855 en 870 uitgevoerd om de stroomsnelheden en afvoeren te bepalen, twee daarvan in combinatie met boven genoemde verhanglijnmetingen. Deze kunnen worden gebruikt om het numerieke morfologische model van de Boven-Rijn en omgeving, het DVR-model, te valideren (Sieben, 2013). Er moet in het kader van de suppletieproef immers worden gekeken in hoeverre het gedrag en de invloed van sedimentsuppleties gesimuleerd kunnen worden, en in hoeverre het numerieke model dus geschikt is om de gevolgen van toekomstige suppleties te kunnen voorspellen.

3.2.6 Bagger- en stortactiviteiten en gebruik van de vaarweg

Om te kunnen achterhalen of de suppleties hinder voor de scheepvaart of een toename van het benodigde vaargeulonderhoud hebben veroorzaakt zijn de werkoverzichten (volumes & tracks) uit het prestatiecontract voor vaargeulonderhoud verzameld vanaf 2005 tot en met twee jaar na afronding van de laatste suppletie voor het traject Waal en Pannerdensch kanaal (bij rkm 870) tot de Boven-Rijn (bij rkm 855).

Ook zijn de klachten van de scheepvaart met betrekking tot de werkzaamheden tussen rkm 855 en 870, die binnengekomen zijn bij de verkeerspost Nijmegen en Schuttevaer, gedurende de projectduur geregistreerd. Na uitvoering van de tweede, dikkere suppletie in 2019 zijn bovendien interviews met schippers gehouden om te polsen of zij hinder hebben ervaren door de werkzaamheden of de ondiepere bodem, of dat ze hun vaargedrag hebben aangepast.

Voor de voorliggende evaluatie is daarnaast data van CoVadem⁴ opgevraagd voor de periode van 1 oktober 2014 tot 31 maart 2022. Deze bevatten de kielspeling, locatie (x, y), tijdstip, vaarsnelheid en vaarrichting, brandstofverbruik en scheepstype en afmetingen (lengte, breedte) van verschillende schepen. Daarmee moet worden geanalyseerd of de suppleties invloed gehad hebben op het gebruik van de vaarweg.

⁴ www.covadem.com

4 Evaluatie uitvoering van de suppleties

4.1 Beschrijving van de uitvoering van de eerste suppletie

Voorafgaand aan de uitvoering van de eerste suppletie zijn door RWS enkele randvoorwaarden bepaald. Met het oog op scheepvaarthinder is besloten dat het suppletiemateriaal het best baansgewijs, uitvoeringswerkzaamheden meevarend met de richting van de in de nabijheid varende schepen uit te voeren, kon worden gestort (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS-ON, 2013). Er is besloten om vanaf benedenstrooms te werken en – bij de eerste suppletie – eerst vakken af te ronden voordat wordt begonnen met storten van een volgend vak. Hierdoor moest ervoor gezorgd worden dat, bijvoorbeeld na een hoogwater, het nog te bestorten gedeelte vrij van reeds aangebracht suppletiemateriaal bleef (Bokkes & Peters, 2015). Bij het opwaarts varen is bovendien de bestuurbaarheid van het duwschip beter en kan dus nauwkeuriger worden gestort. Dwarsslippen of ankeren tijdens het storten was niet toegestaan. Alleen bij bemonstering van het suppletiemateriaal op de bodem is er een spudpaal gebruikt.

Om te voorkomen dat de stroomsnelheden te hoog worden om de suppletie nauwkeurig te kunnen aanbrengen en volgen (omdat het suppletiemateriaal bij hogere schuifspanningen snel in beweging kan komen) is er een maximale waterstand gedefinieerd waarbij nog gesuppleerd mocht worden. De grens is gelegd op een waterstand van OLR+3,5 m (Bokkes & Peters, 2015), wat voldoende gebleken is voor een nauwkeurige stort. Om scheepvaarthinder te voorkomen mocht er geen overslag plaatsvinden noch vaste voorzieningen worden aangebracht tussen rkm 855 en 870 (Bokkes & Peters, 2015).

Voorafgaand aan het aanbrengen van de eerste suppletie zijn zes verschillende uitvoeringsmethoden beoordeeld door de aannemer. De voor- en nadelen wat betreft productiesnelheden, extra overslag, plaatsingsnauwkeurigheid, hinder voor de scheepsvaart, toepassingsgebied, zoals diepgang en stroomsnelheden, en kosten zijn in detail beschreven door Weijnands (2016). De voorafgaand aan de uitvoering opgestelde Trade-Off-matrix uit Weijnands (2016) wordt weergegeven in Bijlage B. De uitvoeringsmethode met de hoogste score, plaatsing van tracermateriaal uit transportbak met behulp van een hydraulische kraan vanaf een ponton (mechanisch) direct in het werk, conflicteerde met de contracteisen betreffende hinder en overslag tussen de normaallijnen. Daarom is uiteindelijk gekozen voor het aanbrengen van het tracermateriaal met splijtbak en wanneer nodig uitvlakken met behulp van een ploegboot.

Weijnans (2016) beschrijft uitvoerig hoe de eerste suppletie in 2016 is uitgevoerd. Hieronder volgt een samenvatting daarvan.

Het tracermateriaal (graniet) kwam uit een steengroeve in Noorwegen. Vóór aankoop is het materiaal gekeurd op basis van veldmetingen (radiometrie) en twee monsters die in het laboratorium zijn geanalyseerd (geotechnische en mineralogische eisen en radiometrie). Na aankoop zijn deze eigenschappen geverifieerd bij de groeve (één analyse per 5.000 t materiaal). Van de steengroeve is het tracermateriaal overgeslagen in bulk carriers en vervoerd naar Amsterdam. Daar is het opgeslagen op een kade en vervolgens in binnenvaartschepen geladen en verder getransporteerd naar Spijk, nabij het suppletiegebied. Daar is het tracermateriaal vervolgens met een kraanschip en kraanponton overgeslagen naar de splijtbakken waarmee de suppletie is uitgevoerd. Deze overslag moest buiten de normaallijnen gebeuren om hinder voor de scheepsvaart te voorkomen. Daarom is de overslag in een kribvak uitgevoerd.

Vóór uitvoering van de suppletie zijn opnieuw granietmonsters genomen uit de splijtbakken. De zeefkrommes van deze monsters en de geëiste bandbreedte worden getoond in bijlage C.1. De suppletie is uitgevoerd met twee kleine beunbakken (350 m³). Er was één duwboot die beide bakken kon bedienen. Tijdens het storten met de ene bak werd de andere bak geladen. Figuur 9 toont een foto van de uitvoering van de eerste suppletie met splijtbakken en duwboot vanuit de lucht.

Het grind is geleverd door een bedrijf vlakbij de suppletielocatie. Vóór start van de uitvoeringswerkzaamheden is aangetoond dat het materiaal voldoet aan de gestelde eisen (één zeefanalyse per 5.000 t materiaal, bij het bedrijf). Ook de zeefkrommes van deze monsters worden getoond in bijlage C.1. Bij het bedrijf kon het materiaal vanaf de wal in de beunschepen worden geladen middels een transportband. Dit was efficiënt, maar de capaciteit en ruimte van en bij de kade waren een limiterende factor. Overslag naar de splijtbakken heeft op dezelfde manier plaatsgevonden als voor het graniet.



Figuur 9 Uitvoering eerste suppletie op de Boven-Rijn: foto van de uitvoering van de eerste suppletie met splijtbakken en duwboot vanuit de lucht (bron: Weijnans, 2016).

Voorafgaand aan de suppletie is de uitvoering met de verhuurder van de duwbotten in detail besproken en zijn op basis van het gesprek de juiste duwbotten en schippers geselecteerd. De duwbotten moesten voldoende vermogen hebben om de bakken te kunnen positioneren en de gewenste snelheid te kunnen varen tijdens het lossen. De schippers moesten voldoende vaardig zijn voor het uitvoeren van een nauwkeurige suppletie, dit is immers een ambachtelijke exercitie waarbij tal van handelingen aan boord en externe factoren op elkaar ingrijpen en waarop de schipper dient te anticiperen. Voor het mogen varen op de Duitse Niederrhein was bovendien een “Groot Rijnpatent” nodig.

Om de nautische veiligheid te waarborgen heeft de schipper voor elke stort een geschikt tijdsinterval tussen de reguliere scheepvaart in gekozen op basis van AIS-data. In dat interval is de stort in langsvaart in stroomopwaartse richting uitgevoerd. Overige eisen voor de nautische veiligheid waren dat er tussen de normaallijnen op het traject rkm 855-870

- geen vaste voorzieningen mochten worden aangebracht en
- geen overslag mocht plaatsvinden (Bokkes en Peters, 2015).

Om het suppletiemateriaal met de kleine dikte en binnen de gevraagde toleranties (tussen 10 cm en 50 cm) aan te kunnen brengen was goede controle over de splijtbakopening nodig. Deze is gerealiseerd door middel van een vanuit de stuurhut afleesbare grote gradenboog, die op de splijtbakken is aangebracht, om af te lezen hoe groot de beun-opening is. Figuur 10 toont een foto van deze constructie.



Figuur 10 Foto van gradenboog op de splijtbakken (bron: Weijnans, 2016).

4.2 Samenvatting klanteisenspecificatie (KES)

Tabel 5 vat de klanteisenspecificaties voor de eerste suppletie 2016 samen, voor zover deze de uitvoering betreffen.

Tabel 5 Samenvatting van de klanteisenspecificaties betreffende de uitvoering van de suppleties.

Klanteisenspecificaties suppletie 2016

aanleg in één aaneengesloten periode zonder onderbreking, behalve bij hoogwater (waterstand hoger dan OLR2012 +3,5 m), in max. 16 werkweken (om de kans op hoge waterstanden en stroomsnelheden te beperken)

aanleg tussen 1 april 2016 en 1 oktober 2016 (vanwege grote kans op voldoende lage waterstanden en stroomsnelheden)

aanleg van benedenstrooms naar bovenstrooms, dus opwaarts varend, vanwege betere bestuurbaarheid van de duwboot en dus grotere nauwkeurigheid bij het aanbrengen

Direct na het storten controleren of het materiaal binnen de toleranties is aangebracht en bij overschrijden binnen één dag corrigerende maatregelen nemen

nautische veiligheid:

- geen vaste voorzieningen aanbrengen tussen de normaallijnen op het traject kmr 855-870
- geen overslag tussen de normaallijnen op het traject rkm 855-870
- scheepvaarthinder maximaal klasse 1 (alleen gedragsaanpassingen)

4.3 Evaluatie en “lessons learned” uitvoering en verificatie van de eerste suppletie

De uitvoering van de eerste suppletie middels onderlossers en stroomopwaarts met de vaarrichting mee heeft niet geleid tot hinder voor de scheepvaart (IJmker et al., 2018, en Weijnands, 2016).

Weijnands (2016) geeft aan dat met de splijtbakken het suppletiemateriaal snel, kostenefficiënt en bovendien nauwkeurig aangebracht kon worden.

De verwachte productiesnelheid van 2.000 ton/dag kon worden verhoogd naar 3.000-4.000 ton/dag, met een maximum van boven de 5.000 ton/dag⁵. Wel had de suppletie volgens hem nog efficiënter uitgevoerd kunnen worden door het suppletiemateriaal direct uit de transportschepen met een kraan vanaf een baggerponton in de vaargeul te plaatsen, omdat dit extra handelingen zoals de overslag had bespaard. Deze methode conflicteerde echter met de contracteisen wat betreft voorkomen van hinder voor de scheepvaart.

Alsnog duurde de aanleg relatief lang, omdat kleine splijtbakken moesten worden gebruikt. Dit vanwege de indeling in drie vakken met verschillend materiaal (grind en graniettracer) en een relatief dunne stortlaag in combinatie met kleine toleranties in stortlaagdikte, waardoor het nodig was om heel nauwkeurig te storten.

Er zijn tijdens de uitvoering geen problemen ontstaan wat betreft diepgang of stroomsnelheden, de duwboten hadden ruim voldoende vermogen om de splijtbakken goed te positioneren (Weijnands, 2016).

Volgens Weijnands (2016) zijn tussen het stortgedrag van het grind en het graniet geen grote verschillen opgemerkt, ondanks het verschil in soortelijk gewicht en hoekigheid. Ook bij de overslag van het materiaal van beunschip naar splijtbak is er geen noemenswaardig verschil waargenomen. De “lessons learned” over het contract voor de suppletie, de controle van de uitvoering (“survey”) en de uitvoering zelf zijn hieronder direct overgenomen uit Weijnans (2016). Weijnans (2016) spreekt verder de verwachting uit dat schaalvergroting naar grotere volumes of laagdiktes of naar meerdere suppletielocaties vanuit het oogpunt van uitvoerbaarheid zonder problemen mogelijk moet zijn. De duur van de uitvoering zal daarbij afhankelijk zijn van de afstand naar een geschikte overslaglocatie, de grootte en het aantal beschikbare duwboot-splijtbak-combinaties (Weijnans, 2016).

4.3.1 Contract

- 1) Het begrip en inzicht in het hogere doel van het project is van groot belang voor de juiste interpretatie van afwijkingen. De inhoudelijke uitleg van RWS voor aanvang van de uitvoering heeft hieraan een positieve bijdrage geleverd.
- 2) Het factureren met Duitse BTW is op basis van de aannahme dat het werk een “onroerende zaak” betreft op Duits grondgebied. Indien dit werk als een “dienst” op Duits grondgebied was beschouwd dan kan mogelijk worden volstaan met een Nederlandse BTW procedure. Het materiaal ligt er om getransporteerd te worden naar Nederland en is daarmee in essentie anders dan de “Vaste laag bij Spijk” uit 2012 die een erosie beschermende functie had. Het is de overweging waard om een volgende suppletie op Nederlands grondgebied uit te voeren omdat dit een hoop (extra) papierwerk scheelt qua meldingen en aangiftes aan zowel Nederlandse als Duitse instanties. Men moet hierbij denken aan V&G, vergunningen, BTW enz.

4.3.2 Survey

- 1) De wekelijkse uitvoeringsrapportage is uitgebreid met een % volume aangebracht binnen een vak t.o.v. van het streefvolume. Dit is een zinvolle aanvulling op de % gerelateerd aan de oppervlaktes.
- 2) Tijdens de dagelijkse in-survey van het vak kan het beste het gehele vak worden gepeild. Het peilen van alleen een sub-vak beperkt de mogelijkheid om uit te wijken naar een ander sub-vak als dat nodig is.

⁵ Overslag van de graniettracer met een kraan kan met maximaal 250-300 t (dus ongeveer 1 splijtbak) per uur (Weijnans, 2015). Bij het laden van het grind met het transportband kunnen producties tot 500 t per uur worden behaald (Weijnans, 2016). De effectieve suppletie neemt (per bak) ongeveer 2 min in beslag. Daarbij moet de reistijd opgeteld worden, deze is niet bekend.

- 3) Voor de volumebepaling t.b.v. de verificatie volgens VSE Bijlage 009 is de berekenmethode aangepast. De (verticale) toleranties van het surveysysteem hebben een grote invloed op de volumeberekeningen omdat het gaat om grote oppervlakten en een relatief kleine laagdikte. Om dit effect te beperken worden
 - De volumes berekend over het oppervlak waarbinnen effectief is gesuppleerd;
 - De volumes over een periode van telkens 1 week bepaald om opstapeling van afwijkingen te minimaliseren.
- 4) De hoogwaterperiode is in de verificatie van VAK 3 speciaal verwerkt voor het bepalen van aangebrachte volumes/laagdiktes. Hiervoor zijn op de in-survey na het hoge water (5 juli) de effectief aangebrachte laagdiktes tijdens de eerste suppletieperiode van voor het hoog water (30 mei – 1 juni) in mindering gebracht om zodoende een correct totaal volume te bepalen.

4.3.3 Uitvoering

- 1) Er is in Duitsland (WSA) veel kennis/ervaring met het aanbrengen van suppleties m.b.v. zelf varende splijtbakken. Het beschikbaar maken van deze kennis kan positief zijn voor toekomstige suppleties.
- 2) De pakkingsdichtheid van het granietmengsel in de beun is lager dan verwacht als gevolg van de afwezigheid van fijne korrelfracties in het mengsel (zie zeefkrommes in bijlage C.1).
- 3) Het controleren van de positie/route van de splijtbakken wordt beïnvloed door de aanwezigheid van vaarverkeer en dwarsstromingen als gevolg van neren ter plaatse van kribben.
- 4) Binnenvaartschepen met spudpalen hebben de voorkeur boven schepen zonder deze spudpalen. Het lossen vanuit het binnenvaartschip naar de splijtbakken gaat daarmee vlotter omdat het kraanschip tijdens het “verhalen” geen touwen los en vast hoeft te maken en deze zich zonder problemen langs het stilliggende schip kan verplaatsen. Daarnaast ondervind het kraanschip geen grote krachten van het langszij afgemeerde beunschip wat de belasting op de spudpalen van het kraanschip aanzienlijk verkleint.
- 5) Een bobcat met borstelveger is sneller en goedkoper dan een extra man in het ruim die handmatig het schip moet aanvegen.
- 6) Schepen met vlakke bodems worden veel eenvoudiger “bezemschoon” opgeleverd dan schepen met een gedeukte/golvende bodem.
- 7) Tijdens het suppleren positioneert de schipper van de duwboot de splijtbak op tijd stroomafwaarts in de lijn van het gewenste stortvak. Zodoende blijven koerscorrecties tijdens het suppleren beperkt en wordt het materiaal in een rechte lijn gestort.
- 8) Een vak dat uitloopt in een punt zoals subvak K in Vak 03 is zeer lastig vlakdekkend af te werken. Het is zeer lastig om tijdens het suppleren bij te sturen omdat de lierdraden worden gevierd vanwege het omhoog komen van de splijtbak. Alleen ervaren schippers zijn in staat de afbuigende vakken af te storten.

4.4 Uitvoering van de tweede suppletie en evaluatie

De tweede suppletie is op een vergelijkbare manier uitgevoerd als de eerste, maar dan met grotere splijtbakken (ca. 1.000 m³) vanwege een grotere afstand tot de winlocatie van het grind in Neuss (persoonlijke communicatie Henk Oskam, september 2022 en april 2023). Dit was mogelijk omdat er dikkere lagen gestort konden worden aangezien de suppletie dikker en vlakvullend uitgevoerd is (paragraaf 1.3). De opdrachtnemer van de tweede suppletie heeft een dashboard gemaakt om RWS tijdens de uitvoering inzicht te geven in de uitvoering. Dat heeft volgens Bulsink (2019) een bijdrage geleverd aan het maximaal leren van het project.

Ook tijdens de tweede suppletie zijn er geen klachten van de scheepvaart binnengekomen bij verkeersposten of de Schuttevaer, en de afhandeling van suppleties boven de maximaal toegestane hoogteligging is goed en snel gelopen (Bulsink, 2019).

Tijdens de uitvoering van de tweede suppletie heeft zich wel één veiligheidsincident voorgedaan, te weten de kabelbreuk tussen de duwboot en duwbak tijdens het suppleren vanwege een te zwakke kabel, waardoor de splijtbak uit koers is geraakt en op één plek is leeggelopen (Bulsink, 2019). De opdrachtnemer heeft het incident geanalyseerd en geëvalueerd. Daaruit kwam als leerpunt voor de opdrachtnemer dat de verbinding tussen duwbak en duwboot als risico gezien moet worden, en dat er eventueel op geauditeerd moet worden bij onderaanneming, ook al zou je verwachten dat een onderaannemer voldoende deskundig is om dit risico mee te nemen en dat de keuringsinstantie voor het certificaat voor de verbinding tussen duwboot en duwbak hierop controleert. Leerpunt voor RWS was om beter op risico's door de afstemming tussen een opdrachtnemer en zijn onderaannemers te letten.

Door de opdrachtnemer is volgens Bulsink (2019) geconstateerd dat het gewenste suppletiemateriaal overeenkomt met de korrelafmetingen van grind dat ook in de betonindustrie wordt gebruikt en daardoor moeilijker verkrijgbaar is in de gevraagde hoeveelheden. Daarnaast is een aantal eisen gesteld (bandbreedte materiaal, locatie van winning en hoeveelheid), dat niet alle partijen konden leveren of zouden moeten mengen, wat in hogere prijzen resulteert. Voor een volgende uitvraag zou daarom overwogen kunnen worden om ruimere bandbreedtes toe te staan of om een buffer in tijd toe te staan, zodat er meer tijd is tussen het op de markt beschikbaar zijn van materiaal en het daadwerkelijk suppleren (Bulsink, 2019).

Bij de tweede suppletie is er, anders dan bij de eerste suppletie, gewerkt met wekelijkse in- en uitpeilingen voor verificatie van de aangebrachte hoeveelheden suppletiemateriaal. Achteraf bleek de opdrachtnemer op deze manier niet te kunnen aantonen dat er de juiste hoeveelheid materiaal op de rivierbodem terecht gekomen is. Op de bodem werd er 15.000 m³ te weinig materiaal aangetoond, terwijl er volgens de opdrachtnemer wel de juiste hoeveelheden in de splijtbakken geweest zijn. In de afrondende evaluatie van de suppletie door RWS en de opdrachtnemer is daarom aangegeven dat beter met een in- en uitpeiling per suppletie gewerkt kan worden (Bulsink, 2019).

Bij de verificatie van de eerste suppletie zijn er echter geen vergelijkbare problemen opgetreden. Dit zou kunnen komen door erosie tussen aanbrengen en storten of veroorzaakt door het storten. Tijdens de tweede suppletie is immers met grotere bakken gewerkt dan tijdens de eerste en zijn dus grotere hoeveelheden materiaal in één keer gestort. Andere redenen zouden de verdichting van eerder aangebrachte lagen door het storten van een volgende laag kunnen zijn. De tweede suppletie is immers duidelijk dikker aangelegd dan de eerste, waardoor er in meerdere lagen gesuppleerd werd. En het zou kunnen zijn dat de oorspronkelijke rivierbodem zich door het gewicht van de suppletie gezet heeft. Al deze redenen kunnen echter naar verwachting geen dusdanig groot verschil in volume verklaren.

5 Invloed van de Boven-Rijn suppleties op bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden

5.1 Invloed op de bodemligging

5.1.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in deze paragraaf wordt beantwoord is:

Welk effect hebben de suppleties tot nu toe op de bodemligging gehad en welke effecten kunnen nog worden verwacht?

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

1. Welke ontwikkelingen in de bodemligging op de Boven-Rijn zijn zichtbaar in de jaren voorafgaand, tijdens en na de uitvoering van elk suppletiedeel (zowel 2016 als 2019)?
2. Welk deel van deze ontwikkelingen wordt veroorzaakt door de aanleg van de vaste laag bij Spijk in 2012 (respons van de bodem naast de vaste laag en beneden de vaste laag aan beide zijden van de rivieras)?
3. Welk deel van deze ontwikkelingen kan worden toegeschreven aan de volgende locatie-specifieke condities:
 - a. Lokale stromingscondities bij hoogwater,
 - b. de lokale oeverbelijning (lokale aansluiting bodem bij de teen van oevers en kribben) in het suppletietraject,
 - c. vaargeulonderhoud of, indien relevant, de invloed van schepen,
 - d. eventuele afpleistering van de toplaag of juist de afwezigheid daarvan,
 - e. de aanwezigheid van erosiegevoelig sediment in de ondergrond?
4. Welk deel van deze ontwikkelingen is door de suppleties zelf veroorzaakt?
5. Hoe ontwikkelen de effecten van de suppleties op de bodemligging zich naar verwachting in de toekomstige jaren?

5.1.2 Aanpak

De beschikbare bodempeilingen (1999 t/m 2021, zie Becker et al., 2023a, voor meer detail) zijn door RWS verwerkt tot tif-bestanden van absolute bodemligging en het verschil in bodemligging t.o.v. voor en na de suppleties. Vervolgens zijn de bodemhoogtes door RWS binnen de cellen van een curvilineair rooster met cellen van ongeveer 20 m bij 20 m gemiddeld met behulp van PMAP (Figuur 11). Deze gemiddelde bodemhoogtes zijn gebruikt om langsraaien van de bodemligging te plotten. Daarbij is ook de breedtegemiddelde bodemligging bepaald (voor het bereik van 120 m links van de rivieras tot aan de as en vanaf de as tot aan tot 120 m rechts ervan). De kaarten en langsraaien zijn vervolgens geanalyseerd om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Daarbij is het traject tussen rkm 858 en rkm 870 bekeken (Figuur 2).

Daarnaast zijn enkele langsprofielen van de hoge-resolutie bodempeilingen (1 m x 1 m) gemaakt en geanalyseerd op kleinschaligere bodemdynamiek (bodemvormen zoals ribbels).



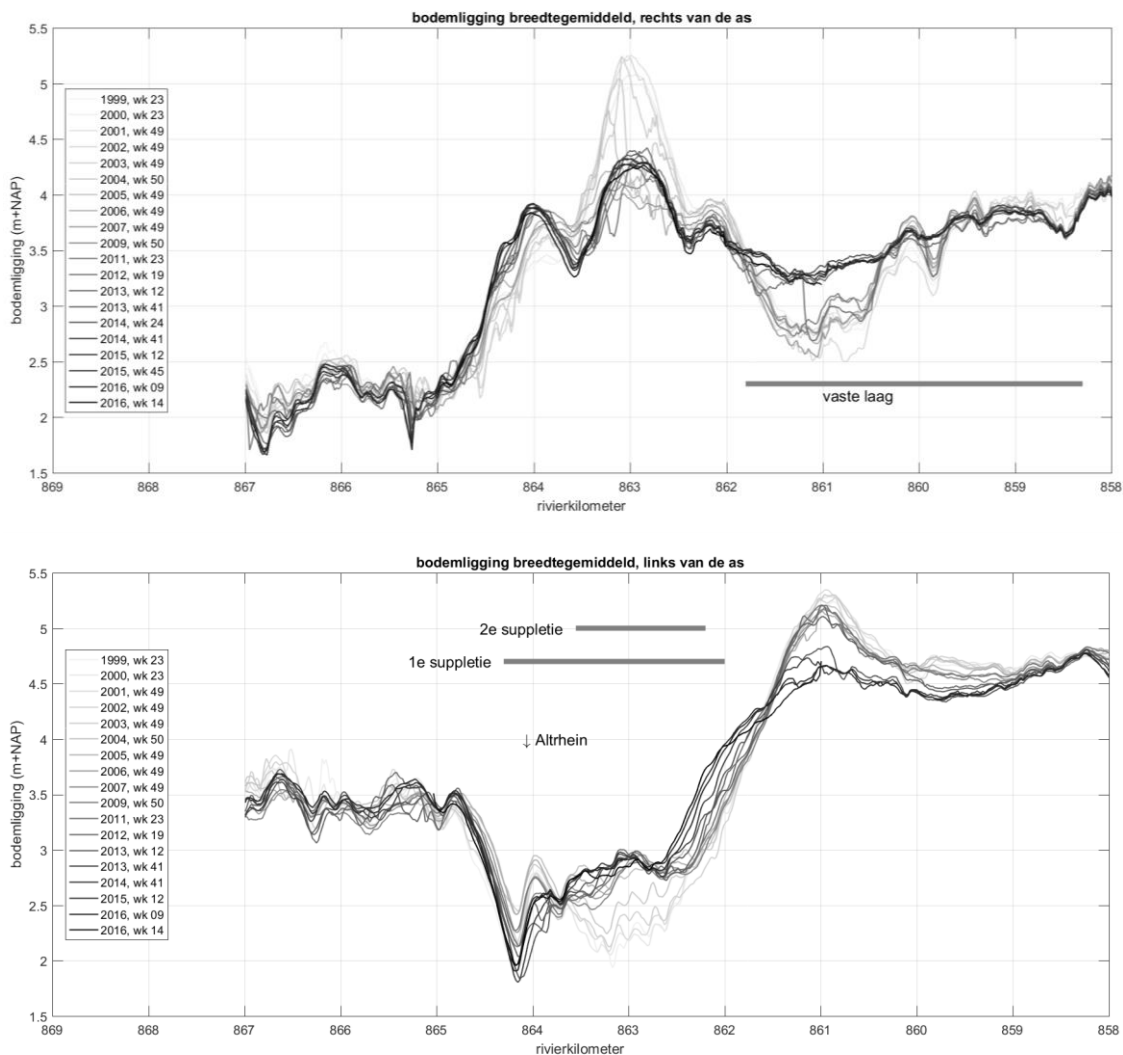
Figuur 11 Curvilineair rooster (wit) en rivieras en rivierkilometers (zwarte lijnen) op de Boven-Rijn. Rechts boven: detail.

5.1.3 Resultaten: ontwikkeling van de bodemligging

De ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-Rijn voorafgaand, tijdens, tussen en na aanleg van de suppleties wordt in detail en met veel figuren beschreven in Becker et al. (2023a). Hieronder zijn de ontwikkelingen kort samengevat.

Voorafgaand aan de suppleties en de aanleg van de vaste laag bij Spijk

Benedenstrooms van rkm 865 is voorafgaand aan de suppleties geen trend in de bodemligging te herkennen (Figuur 12). De bodem is hier dynamisch en varieert in een bereik van 20-40 cm. Bij het ondiepere deel aan de rechterkant bij rkm 863 en net benedenstrooms daarvan lijkt de bodem vóór de aanleg van de vaste laag bij Spijk vrij dynamisch. De diepe buitenbocht ernaast, waar later de suppleties zijn geplaatst, is in die tijd geleidelijk deels opgevuld. Dit lijkt geen natuurlijke ontwikkeling. Inmiddels is (via mondelinge communicatie met de WSV Duisburg) duidelijk dat rond 2003 sediment (orde 200.000 ton, dus ongeveer even veel als de twee suppleties uit 2016 en 2019 samen) is gestort in de buitenbocht. De verandering van de bodemligging rechts van de as in 2003 en 2004 lijkt ook niet natuurlijk. Dit suggereert dat toen materiaal verplaatst is van de ondiepte aan de rechterkant van de rivier naar de diepe buitenbocht aan de linkerkant. Dit lijkt in de jaren daarna, en al voor aanleg van de vaste laag, verdere erosie in de ondiepe binnenbocht te veroorzaken. Omdat ook de latere suppleties de buitenbocht opvullen, is een vergelijkbare reactie in de bodemligging te verwachten (zie volgende alinea's). Bovenstrooms van rkm 859 is de bodemligging in deze periode relatief stabiel.

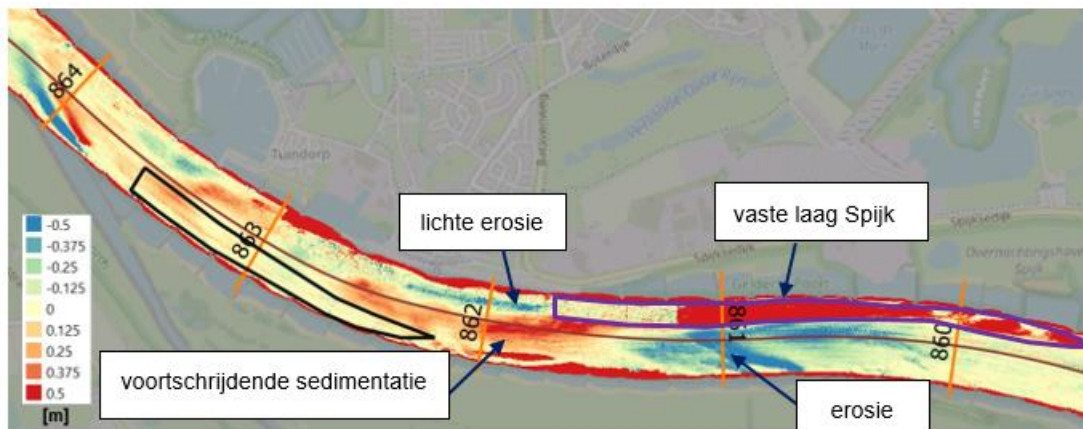


Figuur 12 Bodempligging voorafgaand aan de aanleg van de suppleties, gemiddeld over de linker- en rechterhelft van het zomerbed (120 m links van de as tot aan de as en van de as tot aan 120 m rechts van de as).

Na aanleg van de vaste laag bij Spijk en voor de suppleties

De vaste laag bij Spijk is in 2012 aangelegd tussen rkm 858,5 en 862,7 aan de rechterkant van de rivier. De diepe buitenbocht is daarbij opgevuld met grof materiaal dat niet weer kan eroderen. Als reactie op de vaste laag schuurt de bodem in de ondiepe binnenbocht (linkerkant) in de jaren na aanleg uit (Figuur 13). Het grootste deel van de aanpassing aan de nieuwe situatie vindt direct in het eerste jaar na aanleg plaats. Benedenstrooms van de vaste laag veroorzaakt de aanleg aan de rechterkant erosie. Aan de linkerkant van de rivieras loopt een sedimentatiegolf met een snelheid van ongeveer 70 m per jaar (in jaren van relatief lage afvoer) naar benedenstrooms het suppletiegebied in, dit gaat door na aanleg van de eerste suppletie. Grof geschat op basis van extrapolatie van de ontwikkeling in de beschikbare peilingen zal dit effect nog orde 10-20 jaar doorgaan en geleidelijk het suppletiegebied opvullen.

De erosie naast en benedenstrooms van de vaste laag wordt langzamer na het eerste jaar na aanleg, maar de passage van het hoogwater 2018 lijkt deze effecten weer te versterken.



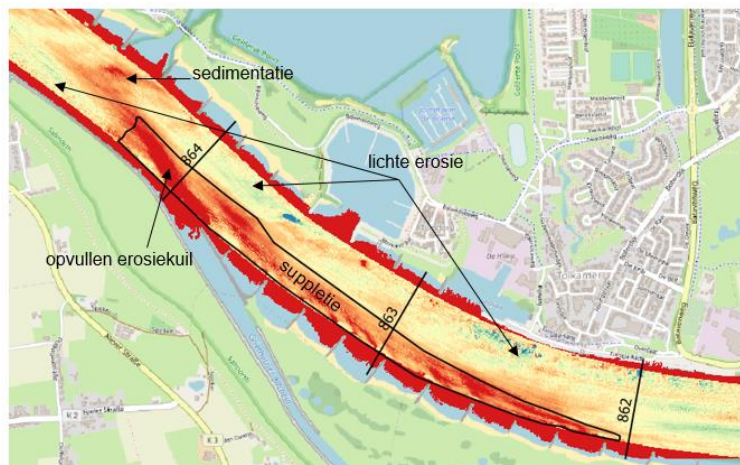
Figuur 13 Bodemhoogteverschil tussen 2013 (week 41) en 2012 (week 19), de vaste laag bij Spijk (paarse polygoon) was hier al deels aangelegd waardoor maar een deel van het gestorte materiaal zichtbaar is als bodemhoogteverschil (rode kleur binnen het polygoon). Dit laat het korte-termijn effect van de aanleg van de vaste laag zien. De ligging van de tweede suppletie is aangegeven door het zwarte polygoon, ook al is deze suppletie nog niet aangelegd in 2012/2013.

Tijdens aanleg van de eerste suppletie

Tijdens aanleg van de eerste suppletie in 2016 ontstaat er aan de rechterkant van de rivier een kleine erosiekuil naast de suppletie, bij rkm 863,6. Het kleine hoogwater tijdens aanleg veroorzaakt sedimentatie bij de front van de suppletie. Dit lijkt in eerste instantie op een verplaatsing van de suppletiefront, zoals ook Koolstra (2020b) concluderen op basis van het feit dat er, in combinatie met de sedimentatie, in de radiometrische metingen (Medusa) een toename van het aandeel tracer materiaal te zien is. Als de inzichten uit latere bodempeilingen (die Koolstra 2020b nog niet ter beschikking hadden) er bij worden getrokken wordt duidelijk dat deze sedimentatie waarschijnlijk eerder het begin is van het ontstaan van het 2D-patroon als reactie op de suppletie (zie volgende alinea). Het is belangrijk om te beseffen dat de voortplanting van het suppletie- en tracer materiaal en de voortplanting van de verstoring in de bodemligging twee verschillende processen met verschillende snelheden zijn.

Na aanleg van de eerste en voor aanleg van de tweede suppletie

In het eerste jaar na de suppletie 2016 blijft de afvoer op de Boven-Rijn grotendeels onder de 2.000 m³/s en is er weinig verandering in de bodemligging op de Boven-Rijn. Direct benedenstrooms van de suppletie ontstaat aan de overkant van de rivier een verhoging van de bodem van orde 30-40 cm. Dit is het begin van de tweedimensionale morfologische reactie op de verstoring door de suppletie. Deze laat zich het best vergelijken met een geforceerd alternerend bankenpatroon (Figuur 14). Het patroon ontstaat door een herverdeling van afvoer en sedimenttransport in het dwarsprofiel omdat slechts in de linkerhelft het dwarsprofiel door de suppletie is verkleind. In de flauwe binnenbocht aan de rechterzijde (naast de suppletie, bij Tolkamer rkm 862-864,3) treedt lichte erosie op als logische respons op de herverdeling van stroming: door de verondieping op de suppletie aan de linkerzijde zal iets meer water (met iets hogere snelheid) langs de rechterzijde gaan stromen. Ook direct benedenstrooms van de suppletie (aan de linkerzijde, rkm 864,3-864,6) treedt lichte erosie op, terwijl hiernaast aan de rechterzijde sedimentatie optreedt. Dit patroon wordt dus niet veroorzaakt door zand- en grindkorrels die de rivier 'oversteken', maar stelt een patroon voor dat wordt opgewekt door een herverdeling van stroming links en rechts in de rivier ten opzichte van de oorspronkelijke verdeling (waar snelheden iets toenemen ontstaat erosie en waar ze afnemen ontstaat sedimentatie).

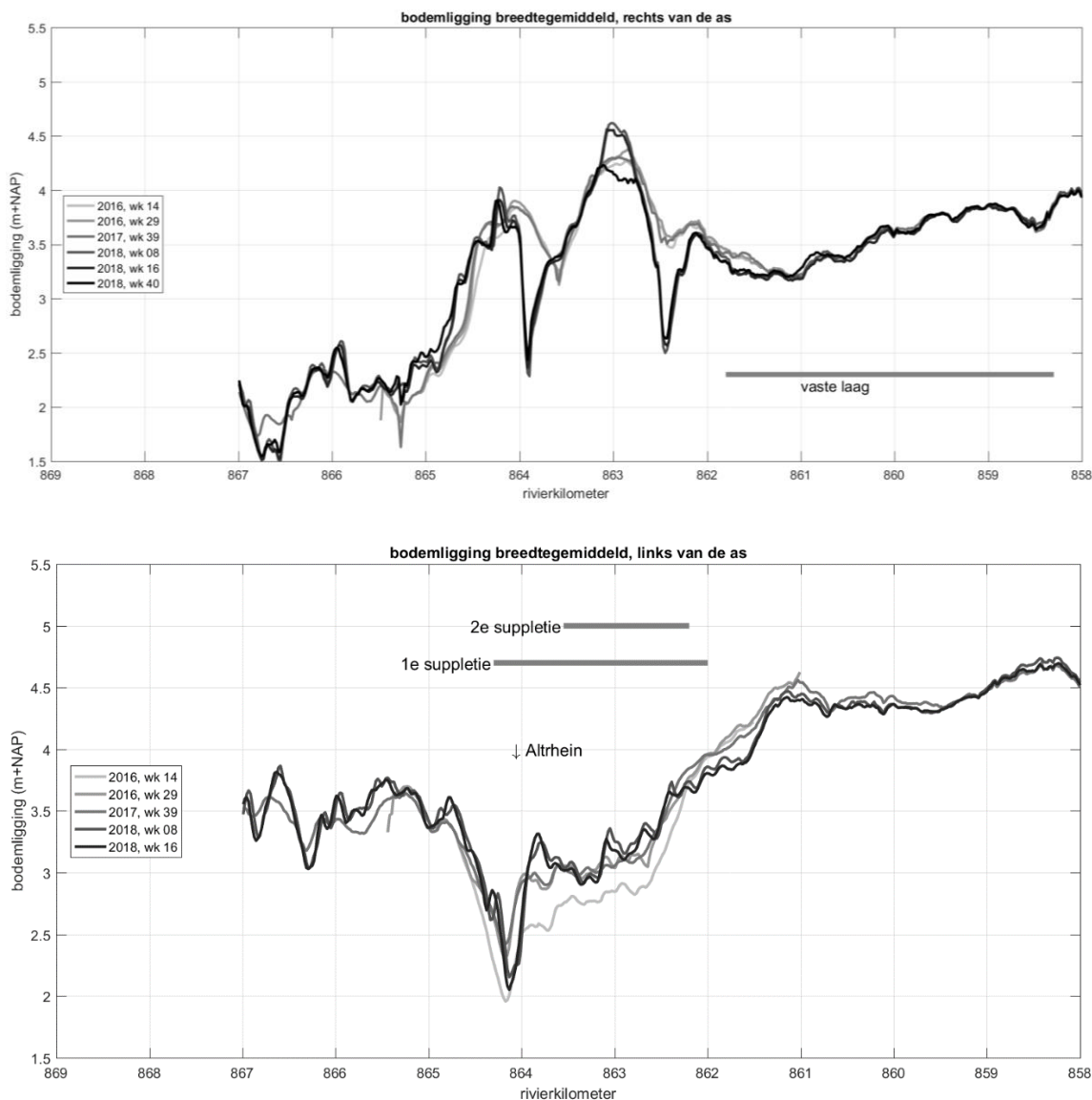


Figuur 14 Bodemhoogteverschil tussen 2017 (week 39) en 2016 (week 14), dus tussen vóór het hoogwater 2018 en voor aanleg van de eerste suppletie. De rode vlakken in de kribvakken zijn geen echte bodemveranderingen, deze ontstaan door de manier van verwerking van de bodempeilingen naar een verschil, op plekken waar niet beide invoerpeilingen data bevatten.

De diepe kuil bij de monding van de Griethauser Altrhein vult in de lange laagwaterperiode in 2016 en 2017 deels op. Door het hoogwater van januari 2018, met een piekafvoer van meer dan 7.500 m³/s, schuurt deze weer uit (Figuur 15). Daarbij wordt ook de suppletie laag in de kuil volledig geërodeerd. Ook laat het hoogwater sedimentgolven ontstaan, die na het hoogwater langzaam naar benedenstrooms lopen. Ook over de suppletie heen lopen sedimentgolven, mogelijk van materiaal dat naast de vaste laag is geërodeerd. Die erosie wordt door het hoogwater namelijk versneld.

Rechts van de rivieras ontstaan er door het hoogwater van januari 2018 twee diepe erosiekuilen bij rkm 862,4 en 863,9 (Figuur 15). Dit komt doordat er lagen met grover materiaal zijn doorgebroken en onderlagen met fijner materiaal (jonge, makkelijker te eroderen, rivierafzettingen) zijn aangesneden. Dit was waarschijnlijk ook zonder de suppleties gebeurd. Het ontstaan van de eerste van deze kuilen is waarschijnlijk versneld door de aanleg van de vaste laag. Het sediment uit de kuilen migreert na afloop van het hoogwater in golven naar benedenstrooms.

Het hoogwater van 2018 wekt benedenstrooms van rkm 862 veel meer dynamiek op dan bovenstrooms (Figuur 15). Dit komt vermoedelijk door een grotere mobiliteit van het sediment benedenstrooms. De korrel diameters nemen langs de Boven-Rijn steeds verder af richting benedenstrooms, en vanaf ca. rkm 862,3 liggen er onder de relatief grove bovenste laag jongere afzettingen die makkelijker in beweging komen dan bovenstrooms daarvan. Het is niet aannemelijk dat deze grotere dynamiek is veroorzaakt door de suppletie.



Figuur 15 Bodempligging tussen de aanleg van de eerste en tweede suppletie, gemiddeld over de linker- en rechterhelft van het zomerbed (120 m links van de as tot aan de as en van de as tot aan 120 m rechts van de as). Week 14 uit 2016 is nog voor aanleg van de eerste suppletie, ter referentie. 2018, week 08, is de eerste peiling na het hoogwater van januari 2018.

Tijdens en na aanleg van de tweede suppletie

Tijdens de aanleg van de tweede suppletie en daarna is de bodempligging tot aan december 2019 weinig veranderd. De tweede suppletie is korter in lengte dan de eerste en eindigt bovenstrooms van de diepe kuil bij rkm 864. In tegenstelling tot de eerste suppletie heeft de tweede daarom wel een duidelijk gedefinieerd front. In de periode na aanleg vindt er nagenoeg geen voortplanting van het front in de bodempligging plaats, omdat de afvoeren te klein zijn (onder 2.000 m³/s).

Tijdens het hoogwater van februari/maart 2020 verplaatst zich het front vlakbij de rivieras ongeveer 100 m naar benedenstrooms en meer richting de oever iets minder. De dikte van het front blijft ongeveer gelijk aan de dikte van de stortlaag. Na afloop van het hoogwater wordt zichtbaar dat de tweede suppletie een vergelijkbare 2D-reactie veroorzaakt als beschreven bij de eerste suppletie.

Na het hoogwater van februari 2021 is het suppletiefront nog een keer met ongeveer dezelfde afstand verplaatst (ca. 70 m). Het hoogwater van juli 2021 lijkt geen duidelijke verplaatsing van het front te veroorzaken, maar vlakbij de rivieras wel een duidelijke afvlakking bij het front. Na afloop van deze hoogwaters is ongeveer 200 m van het bovenstroomse einde van de suppletie bijna volledig geërodeerd.

In 2021 ontstaat er ook aan de linkerkant van de rivier een kleine kuil, ongeveer 90-130 m van de rivieras bij rkm 864,8, dat is bij het einde van de gestrekte oever. Direct benedenstrooms van de vaste laag bij Spijk, aan de rechteroever, lijkt zich, geïnitieerd door het hoogwater van 2020, een snel verdiepende erosiekuil te vormen. Er is echter geen aantoonbare relatie tussen het ontstaan van deze erosiekuil en de suppleties. Het ligt meer voor de hand dat dit samenhangt met de invloed van de vaste laag op het sedimenttransport, vergelijkbaar met de erosiekuilen die zijn ontstaan benedenstrooms van de vaste lagen bij Nijmegen en Sint Andries in de Waal.

Invloed van de suppletie op de kleinschaligere dynamiek

De langsprofielen van de hoge-resolutie bodempeilingen tonen micro-schaal bodemvormen (ribbels) die lijken te ontwikkelen na korte periodes van lage of middelgrote afvoeren en die stroomafwaarts migreren. Er is niet aantoonbaar dat de grootte ervan (amplitude en lengte) veranderen door de suppletie (maar het is ook niet uit te sluiten). De micro-schaal bodemvormen zijn gesuperponeerd op golven van iets grotere schaal, met een lengte van ongeveer 150-200 m en amplitudes van ongeveer 20-25 cm. Deze grotere schaal vormen zijn ook vóór aanleg van de suppleties aanwezig en bewegen alleen bij hogere afvoeren.

5.1.4 Resultaten: invloed van locatie-specifieke condities

Lokale stromingscondities bij hoogwater

Bij de monding van de Griethauser Altrhein stroomt bij hoogwater het water uit de uiterwaard terug naar de hoofdgeul in verband met de zijtak maar ook door de insnoering van de uiterwaard op deze plek. Dit heeft bij hoogwater invloed op de morfologische reactie in de rivier. Het water stroomt hier over een vrij steile rand (de oever) weer de hoofdgeul in en creëert daar een erosiekuil. De richting van de kuil volgt de richting van de uitstroom. In perioden van lagere afvoeren wordt de kuil deels weer opgevuld. Dit proces lijkt beïnvloed te worden door de suppleties. De eerste suppletie is over de kuil heen geplaatst en erodeert tijdens het hoogwater 2018 volledig in het gebied van de kuil. De kuil verandert niet van locatie. De tweede suppletie was dikker en korter, deze stopte al voor de instroom van de Griethauser Altrhein bij rkm 863,8. Na afloop van het hoogwater van februari 2021 is te zien dat de erosie verplaatst is tot aan het einde van de tweede suppletie. De suppletie heeft dus het lokale patroon van erosie tijdens hoogwater verplaatst. Dit is te zien in zowel de peilingen als de modelberekeningen.

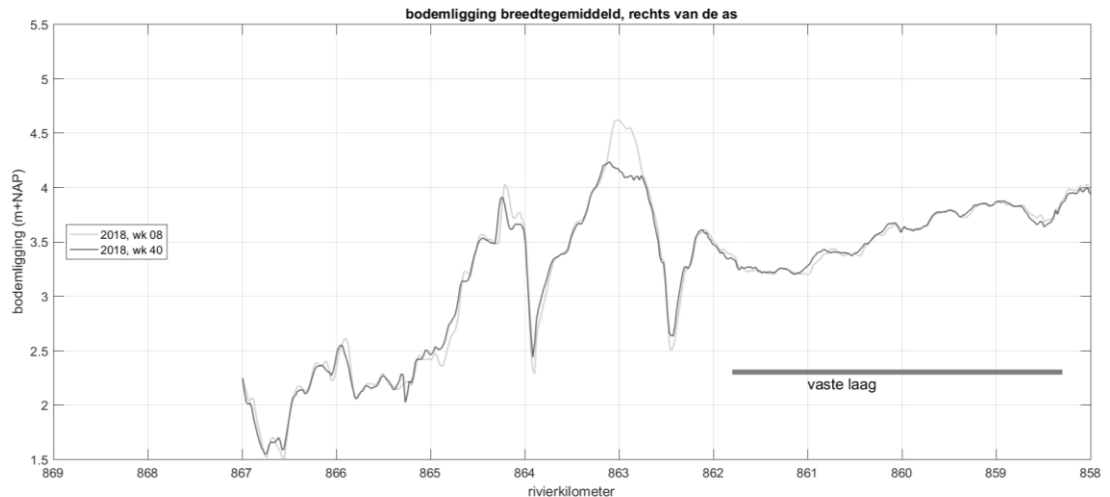
Lokale oeverbelijning

De invloed van de lokale oeverbelijning, bestaande uit gestrekte oevers bij Tolkamer aan de rechterkant en benedenstrooms van de monding van de Griethauser Altrhein aan de linkerkant en kribben op de rest van het traject, op de bodemligging in het gebied is te zien aan de stabiele lokale ontgrondingskuilen bij kribkoppen. De suppleties zijn op 25 m van de normaallijn gestort om zo veel mogelijk buiten deze ontgrondingskuilen te blijven. Delen van de kuilen zijn echter wel opgevuld door de suppleties. De peilingen laten zien dat een jaar na aanleg van de suppleties de ontgrondingskuilen weer ontwikkeld zijn. In de peilingen zijn geen sedimentgolven te zien die erop wijzen dat dit tot aanvullende dynamiek in de bodem heeft geleid. Het gaat echter ook maar om kleine hoeveelheden sediment.

Vaargeulonderhoud

Tussen de eerste en de tweede suppletie is er in de langspromen aan de rechterkant van de rivier een locatie te zien waar waarschijnlijk gebaggerd is. Het gaat om de 'bult' rond rkm 863, die tijdens het hoogwater is ontstaan (zie meting van week 8, 2018, in Figuur 16), en die in latere peilingen uit hetzelfde jaar (bv. week 40) niet meer te zien is. Dit materiaal is waarschijnlijk afkomstig uit de erosiekuil die net bovenstrooms van de 'bult' is ontstaan.

Na de aanleg van de tweede suppletie tot aan de laatste beschikbare peiling van eind 2021 is er in de langspromen geen locatie meer te zien die op vaargeulonderhoud wijst. Dit ondersteunt de conclusie van Becker et al. (2023b) dat er door deze suppleties tot nu toe geen toename van het vaargeulonderhoud is ontstaan.



Figuur 16 Vermoedelijke locatie van vaargeulonderhoud bij rkm 863 aan de rechterkant. Direct bovenstrooms van de 'bult' is, bij rkm 862,4, de diepe erosiekuil te zien.

Scheepvaart

In de multibeam-opnames is een groot aantal lijnvormige 'sporen' te zien die vermoedelijk zijn ontstaan door scheepvaart. Het lijkt er op dat de passerende schepen door de invloed van retourstroom en schroefstraal een waarneembare invloed uitoefenen op de bodemligging en de menging van sedimentfracties afkomstig uit de suppletie.

De sporen lijken echter meer in de ondiepe binnenbocht naast de suppleties aanwezig te zijn, tot een diepte van ongeveer OLR-3,8 m, dan op de nog wat dieper liggende suppleties zelf. Onder OLR-3,8 m zijn veel minder sporen zichtbaar. Omdat niet bekend is door welke vaartracks de sporen zijn gemaakt, kan nog niet gesteld worden dat dit vooral te maken heeft met diepte onder het schip. Mogelijk speelt ongelijk ruimtegebruik ook een rol.

Een afsluitende beoordeling van de invloed van scheepvaart op het verspreiden van het suppletiemateriaal is met deze data niet mogelijk.

Afpleisteringen

Afpleistering ontstaat wanneer aan de oppervlakte van de bedding het fijnere sediment wegspoelt en een matrix van grof immobiel sediment resulteert. Deze laag is minimaal enkele korrels dik. De gebruikte methodiek voor bemonstering van het bodemmateriaal bemonstert dieper dan de pleisterlaag, waardoor de laagopbouw wordt verstoord. De monsters bevatten daardoor een mengsel van het fijnere sediment en de eventuele samenstelling van de afpleisterlaag.

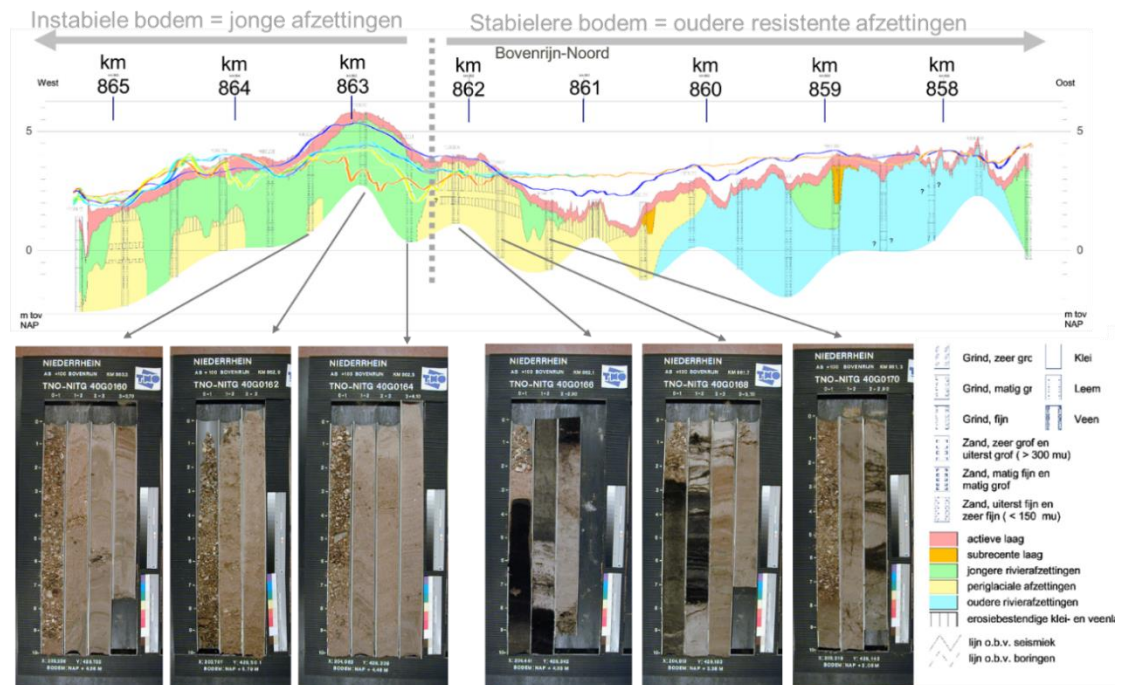
Op basis van de monsters kan daarom niet eenduidig worden geconcludeerd dat er in specifieke situaties (bijvoorbeeld bij lagere afvoeren wanneer grove fracties immobiel worden) een afpleisterlaag aanwezig kan zijn op de Boven-Rijn.

De erosiekuilen die zijn ontstaan door de hoogwaters (paragraaf 5.1.3) hebben vrij scherpe randen, die na ontstaan van de kuilen scherp blijven. De kuilen laten wel vermoeden dat er een relatie bestaat met een grove bovenlaag en daaronder een relatief fijn substratum dat op die plaatsen is aangesneden.

Erosiegevoelige lagen in de ondergrond

Boringen op de Boven-Rijn, geanalyseerd door Gruijters et al. (2001), tonen dat er rond rkm 862,4 sprake is van een overgang in substraat van relatief jonge rivierafzettingen die vooral bestaan uit zand (met een fractie grind) (benedenstrooms) naar oude periglaciale afzettingen met kleilagen (bovenstrooms) (Figuur 17). Dit materiaal is afgedekt door een relatief dunne (orde 0,5 m) grovere toplaag (actieve laag). De jonge rivierafzettingen benedenstrooms van rkm 862,4 zijn overwegend fijner dan het materiaal in de actieve laag.

Het is zeer waarschijnlijk dat de erosiekuilen bij rkm 862,4 en 863,9 ontstaan doordat de grovere bovenlaag bij hoogwater is doorgebroken en het fijne substratum is aangesneden.



Figuur 17 Profiel van de ondergrondssamenstelling aan de rechterzijde, en foto's van boorkernen uit de studie Gruijters et al. (2001). De lijnen van de bodemligging op 70 m rechts van de as zijn hierin op het langprofiel geprojecteerd.

5.1.5 Conclusies: netto effect van de suppleties en prognose

De suppleties op de Boven-Rijn hebben op verschillende manieren de bodemligging benedenstrooms beïnvloed:

1. Vanwege het asymmetrische suppleren aan één kant van de rivier ontstond er door herverdeling van de stroming een 2D-patroon van sedimentatie en erosie, dat te vergelijken is met het patroon van alternerende banken. Dit patroon is plaatsvast ten opzichte van de suppletie, als de suppletie 'bult' stroomafwaarts migreert zal dit patroon dat ook doen en daarbij net als de suppletie 'bult' uitdempen⁶. De dikte van de aanzanding benedenstrooms aan de overkant van de suppletie is vergelijkbaar met of iets groter dan de dikte van de suppletie zelf.
2. Een voortplanting van het suppletiefront stroomafwaarts was bij de Boven-Rijn suppleties nauwelijks te herkennen. Bij suppleties op andere locaties moet hiermee wel rekening worden gehouden. De verwachting is dat de dikte van de bodemverstoring langzaam afneemt naarmate de suppletie verder stroomafwaarts verplaatst ('uitdempen'). De snelheid van migratie hangt af van het suppletiemateriaal en de afvoerhydrograaf en kan met behulp van een modelberekening worden geschat.
3. Bij de erosiekuil bij de monding van de Griethauser Altrhein zijn bij hoogwater in korte tijd belangrijke hoeveelheden suppletiemateriaal geërodeerd, vergelijkbaar met het gedrag van een ontgrondingskuil. Dit materiaal is vervolgens in golven stroomafwaarts gemigreerd. Dat is vooral na de eerste suppletie geobserveerd. De golven hadden een amplitude van ongeveer de helft van de dikte van de suppletie. Om risico's van toekomstige suppleties goed in te kunnen schatten is het dus belangrijk om de lokale dynamiek van de suppletielocatie en omgeving goed te kennen.

Toekomstige suppleties kunnen de bodemligging bovendien als volgt beïnvloeden:

1. Mogelijk worden ook natuurlijke bodemvormen zoals duinen beïnvloed door een suppletie. Op de Boven-Rijn kon dit niet worden gezien, omdat op dat traject van nature weinig bodemvormen optreden.
2. Daarnaast kunnen toekomstige suppleties, die de waterstand bovenstrooms duidelijk opstuwen, (lichte) sedimentatie bovenstrooms veroorzaken. Bij de Boven-Rijn suppleties is dat niet duidelijk zichtbaar geworden, mogelijk omdat deze maar een zeer beperkte opstuwung veroorzaakt hebben (paragraaf 5.3), en omdat de invloed van de vaste laag (een erosietrend bovenstrooms van de suppleties) deze tegen werkt.

Daarnaast beïnvloeden trends in de bodemligging van het suppletietraject en in de omgeving daarvan de manier hoe de bodem reageert op de suppletie. Dat kunnen reeds aanwezige trends zijn of trends die worden verwacht vanwege geplande ingrepen. Op de Boven-Rijn werd dit duidelijk in samenhang met de vaste laag bij Spijk. De Boven-Rijn suppleties zijn aangelegd in een buitenbocht waar de aanleg van de vaste laag een trend van sedimentatie veroorzaakt. De aanleg van de suppleties realiseert dus een reeds in het gebied aanwezige trend gedeeltelijk of in zijn geheel. Dat betekent dat, anders dan verwacht, deze suppleties (gedeeltelijk of geheel) niet stroomafwaarts gaan verplaatsen of uitdempen, omdat ze niet als verstoring van de bodemligging acteren, en dat ook de (2D) reactie in de bodemligging lang zal blijven bestaan en weinig zal verplaatsen. Dat betekent dat er ook maar beperkte aanvulling van het sedimenttransport optreedt. De relatief grove samenstelling van de suppletie ten opzichte van de van nature aanwezige bodemmateriaal kan hierbij ook een rol spelen.

⁶ Dit was bij de Boven-Rijn suppleties niet te zien, omdat de suppleties nauwelijks migreerden.

Als op de locaties waar een suppletie erosie veroorzaakt erosiegevoelige lagen onder een grovere toplaag zitten versterkt de suppletie het risico op doorbreken van de grovere toplaag en daardoor het ontstaan van diepe erosiekuilen. Op de Boven-Rijn is dat op meerdere locaties gebeurd, ook al is niet bij alle kuilen duidelijk in hoeverre deze aan de suppleties of aan de aanleg van de vaste laag bij Spijk toegeschreven moeten worden. De effecten van beide maatregelen versterken elkaar op het traject naast de suppletie.

5.2 Invloed op de bodemsamenstelling

5.2.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in deze paragraaf wordt beantwoord is:

Welk effect hebben de suppleties tot nu toe op de samenstelling van de bodem (toplaag) gehad en welke effecten kunnen nog worden verwacht?

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

- 1 Welke ontwikkelingen in de bodemsamenstelling op de Boven-Rijn zijn zichtbaar in de jaren voorafgaand, tijdens en na de uitvoering van elk suppletiedeel (zowel 2016 als 2019)?
- 2 Welk deel van deze ontwikkelingen is door de suppleties zelf veroorzaakt?
- 3 Welke invloed heeft het storten van het sediment op de bodemsamenstelling?
- 4 Hoe ontwikkelen de effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling zich naar verwachting in de toekomstige jaren?

5.2.2 Aanpak

Voor de analyse van bodemsamenstelling is vooral gebruik gemaakt van de in het kader van het suppletieproject jaarlijks herhaalde bemonsteringen door Rijkswaterstaat op hele kilometerraaien op 70 m van de rivieras, zowel links als rechts, en op halve kilometerraaien in de rivieras (Figuur 18). Daarnaast zijn aanvullende data van de aannemer (Martens en van Oord) op de suppletielocatie en in de beun beschouwd. Ook data uit eerdere meetcampagnes en onderzoeken zijn gebruikt. Met de data zijn per locatie en bemonstering verschillende kenmerkende parameters zoals het percentage zand, de mediane korreldiameter (D_{50}) en het geometrisch gemiddelde (D_g) bepaald en is gekeken naar de variatie ervan in de tijd en ruimte.

De metingen van bodemsamenstelling in deze analyse hebben alleen betrekking op de toplaag. De bemonsteringen vonden plaats door middel van een Hamon happer, grijper of van Veen happer, waarbij een monster met een diepte van orde 1 à 2 dm van de bodem wordt geschept. De monsters bevatten dus niet de hele dikte van de actieve laag, die in dit gebied ruwweg enkele decimeters tot een meter dik is (Gruijters et al., 2001).

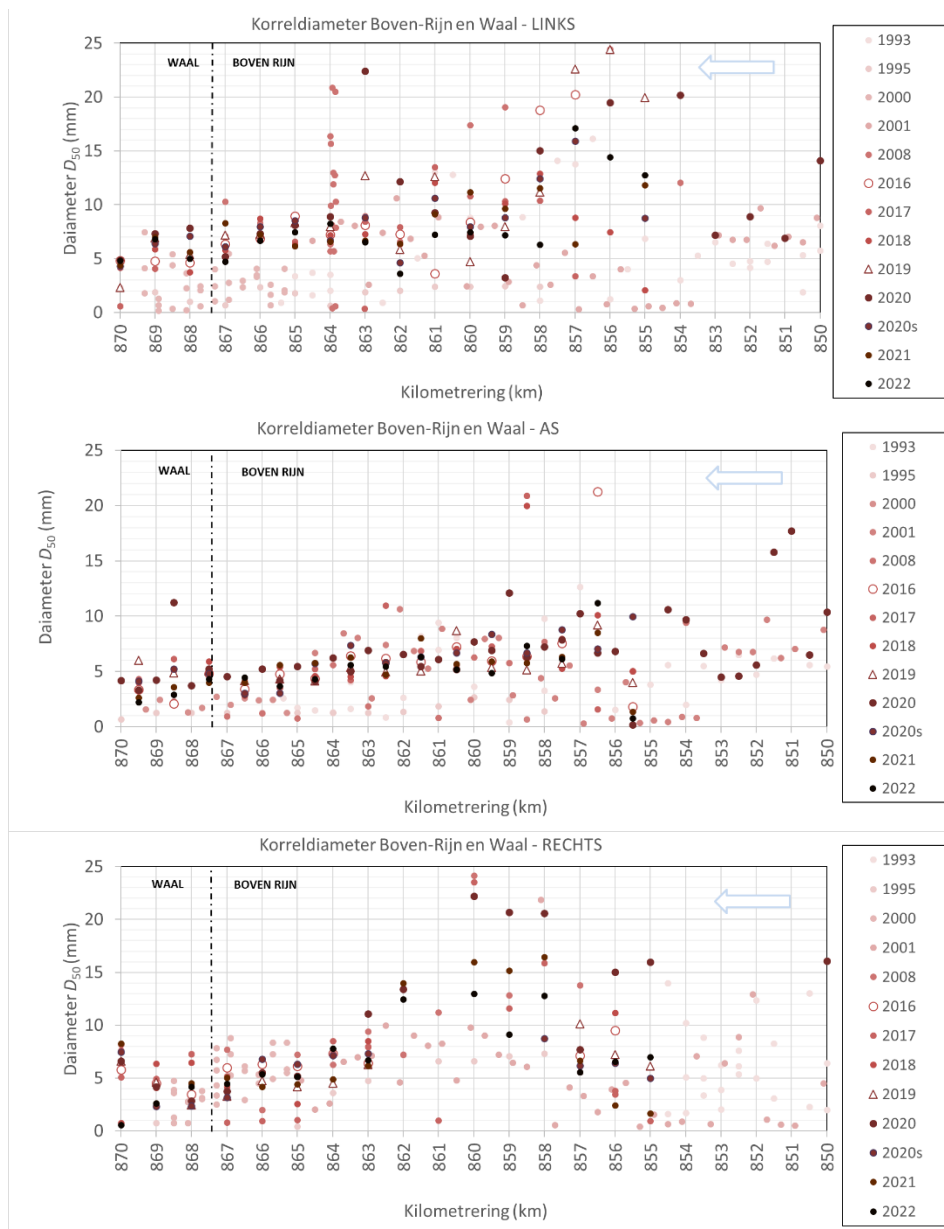


Figuur 18 Locatie van de bodemonmonsters die in het kader van het suppletieproject zijn genomen.

5.2.3 Resultaten

De toplaag, of “actieve laag”, van het rivierbed in de Boven-Rijn bestaat uit een mengsel van zand en grind. In deze toplaag vindt uitwisseling plaats van zand en grind tussen de rivierbodem en het sediment dat in transport is door stromingen die zijn opgewekt door de rivierafvoer en de scheepvaart. Lokale fluctuaties van bodemligging, onder andere door passerende beddingvormen (ribbels en duinen) en schepen, zorgen voor omwoeling van dit sediment. De variabiliteit in bovengenoemde processen leidt tot grote ruimtelijke en temporele variaties in de gemeten bodemsamenstelling, vooral omdat alleen het bovenste deel van de actieve laag wordt bemonsterd met de gebruikte methodes.

De analyse van de bodemsamenstelling laat zien dat op het beschouwde traject sprake is van een bimodale korrelverdeling, wat inhoudt dat er een duidelijke scheiding is tussen de zandfracties (diameters kleiner dan 2 mm) en grindfracties (diameters groter dan 2 mm). De variatie in de bodemsamenstelling van de toplaag langs de Boven-Rijn is vrij groot, zoals in Figuur 19 te zien is aan de hand van de mediane korreldiameter D_{50} .



Figuur 19 Ontwikkeling van de mediane diameter D_{50} in de tijd voor samenstelling links van de as, op de rivieras, en rechts van de rivieras.

De bodemsamenstelling van de Boven Rijn vóór suppletie:

- De bodemonsters hebben betrekking op de bovenste 1 à 2 dm van de actieve laag van de bedding. De ontwikkeling van de samenstelling in ruimte en tijd in deze laag is sterk variabel, en wordt beïnvloed door diverse morfodynamische processen. Belangrijk daarbij zijn de erosie naast (links) en benedenstrooms van de in 2012 aangelegde vaste laag bij Spijk (rechts) (paragraaf 5.1.3) en invloeden van beddingvormen, afvoervariaties en scheepvaart.
- In de beschouwde periode (2016-2022) zijn er geen grootschalige trends in bodemsamenstelling waarneembaar die de conclusies van de analyses beïnvloeden.

De bodemsamenstelling tijdens de suppleties:

- De eerste suppletie in 2016 heeft plaatsgevonden met een mengsel van Norstone graniet en een mengsel van grind waarbij (om praktische redenen) de zandfractie met diameters kleiner dan 2 mm ontbrak. Het mengsel is daardoor grover geweest dan de ontvangende bodem.
- Ook het materiaal van de tweede suppletie is gemiddeld grover dan de ontvangende bodem. Na de suppletie 2019 blijkt in de door Martens en van Oord genomen monsters dat het materiaal van de monsters van de bedding nog grover is geworden. Een oorzaak van deze verdere vergroving kan niet worden gegeven. Hier kunnen zowel variaties in aanbod, onnauwkeurigheden van de bemonsteringsmethode (grijper), als sorteringsprocessen tijdens het suppleren of erna een rol spelen. Vooralsnog wordt geadviseerd er van uit te gaan dat de samenstelling in de bakken kenmerkend is voor de gemiddelde samenstelling van de suppletie-laag op de bedding.

De bodemsamenstelling na de suppleties

- Zowel radiometrische metingen van tracer materiaal (MEDUSA) na de suppletie van 2016, als de modelsimulaties, tonen dat het gesuppleerde materiaal door sedimenttransportprocessen stroomafwaarts migreert langs de zijde van de suppletie (links van de rivieras). De migratiesnelheid is niet makkelijk af te leiden uit de meetgegevens. Duidelijk is dat de tracer met name bij hogere afvoeren verplaatst. Gemiddeld over een langere periode met hogere en lagere afvoeren lijkt een snelheid in de orde van 1 à 2 km/jaar realistisch.
- De suppletie met relatief grof materiaal heeft niet geleid tot een waarneembare voortschrijdende vergroving benedenstrooms van de suppletie (zowel links van de as, als midden of rechts van de as). Zowel de gemiddelde en mediane diameter, als het zandpercentage fluctueren binnen de bandbreedtes van variaties in de omgeving, en lijken meer afhankelijk van golf-effecten afkomstig van invloeden verder bovenstrooms. Op de suppletielocatie zelf is ook binnen 1 jaar de samenstelling van de toplaag gelijk geworden aan die van de omgeving.
- Aangenomen wordt dat tijdens het stroomafwaarts verspreiden van het gesuppleerde materiaal, het overschot aan grove korrels door beddingvormen en scheepspassages omlaag wordt gesorteerd, en dat er voldoende aanbod is van zand (o.a. van eroderende bedding bovenstrooms) om eventuele afwijkingen in samenstelling van de actieve laag te nivelleren.

Invloed van het storten

De monsters die de aannemer van de tweede suppletie in 2019 heeft genomen van de bodem direct na de suppletie zijn nog grover dan de monsters uit de bakken. De monsters van de bedding wijken vooral af van de bakmonsters door een veel lager gehalte aan fijn grind in de klassen van 2 tot 5,6 mm, en juist een groter percentage aan de grove grind klasse van 22,4 tot 31,5 mm. Het blijft onzeker hoe deze verdere vergroving van het mengsel heeft plaatsgevonden. Lokin en Barneveld (2019) geven mogelijke oorzaken, zoals het wegspoelen van fijne fracties tijdens het storten (wat voor de fijne grind fracties niet voor de hand ligt); het wegspoelen van deze fracties nadat dit fijnere materiaal later de bodem bereikt (lagere valsnelheid) en daarom niet wordt beschermd tegen stroming door het grovere sediment; en de verliezen die bij monsternamen met een grijper mogelijk zijn opgetreden. Aanvullend is het goed mogelijk dat de bakmonsters niet representatief zijn voor het grote geheel wat is gestort. Een monster is immers maar een heel klein deel van de totale hoeveelheid sediment in de bak. Bovendien zijn de monsters door de aannemer op eigen initiatief genomen en volgen geen NEN-standaards. Al deze mogelijkheden zijn speculatief, en kunnen niet zonder nieuwe proceskennis of veldproeven worden onderbouwd. Met de huidige kennis van de processen en beperkte inzichten in de metingen, kan geen diagnose worden gegeven voor deze vergroving tijdens het storten.

Prognose toekomstige invloed van de suppleties:

Het relatief grove gesuppleerde sediment is opgenomen in de actieve laag van de Boven Rijn zonder zichtbare vergroving van de sedimentmonsters in de bedding. Dit zal in de toekomst niet meer veranderen. Diverse effecten, zoals verschillen in mobiliteit van fracties, of morfodynamiek van de bedding, spelen hierbij een rol. Het is aannemelijk dat de grove fracties dieper in de bedding zijn terechtgekomen onder invloed van verticale sorteringsprocessen of door afdekking met aangevoerd sediment van bovenstrooms. Daardoor kan het buiten bereik van de Hamon en van Veen happers zijn gekomen. Tijdens hoge afvoeren kan dit grove sediment weer beschikbaar komen voor sedimenttransport. Gezien de grote percentages zand in de bedding (>20%) zal naar verwachting het aansnijden van diepere lagen met dit grovere materiaal niet leiden tot reductie van zandtransport ("hiding") tijdens die hoge afvoeren.

5.2.4 Conclusies

Voor de suppleties is een mengsel voorgeschreven via een bandbreedte rond een cumulatieve zeefkromme. De bandbreedte biedt echter de mogelijkheid om te suppleren met een verdeling die voldoet aan de uiterste onderzijde van de band en daarom grover zijn dan het ontvangende sediment. Voor beide suppleties geldt daarom dat deze inzicht bieden in het suppleren van relatief grof sediment ten opzichte van de ontvangende bodem, in plaats van een gelijke of fijnere samenstelling.

Uit de analyse van kenmerkende parameters is het niet mogelijk gebleken om eventuele effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling benedenstrooms van de suppleties te onderscheiden. Dit betekent niet dat het effect van een grove suppletie niet leidt tot een stroomafwaarts migrerende vergroving, maar dat een dergelijk signaal niet uit de bodemmonsters kan worden herleid. Dit duidt erop dat het grovere suppletiemateriaal wordt opgenomen in de actieve laag zonder noemenswaardige vergroving in de bovenste (bemonsterde) decimeters.

De verwachting is dat dit in de toekomst niet meer zal veranderen. Weliswaar kan het grove sediment tijdens hoge afvoeren weer beschikbaar komen voor sedimenttransport. Gezien de grote percentages zand in de bedding zal dit naar verwachting echter niet leiden tot reductie van zandtransport tijdens die hoge afvoeren.

Aanvullende monsters van de aannemer lijken aan te tonen dat er bij het storten van de suppletie in 2019 een vergroving heeft plaatsgevonden, de bodemmonsters zijn direct na de suppletie grover dan de bakmonsters. Met de huidige kennis van de processen en beperkte inzichten in de metingen kan geen diagnose worden gegeven voor deze mogelijke vergroving tijdens het storten.

5.3 Invloed op de waterstanden

5.3.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in deze paragraaf wordt beantwoord is:

Welk effect hebben de suppleties tot nu toe op de waterstanden gehad en welke effecten kunnen nog worden verwacht?

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

- 1 Welke ontwikkelingen in waterstanden en waterstandsverval en indien relevant verhanglijnen zijn zichtbaar in de jaren voorafgaand, tijdens en na de uitvoering van elk suppletiedeel (zowel 2016 als 2019)?

- 2 Welk deel van deze ontwikkelingen wordt veroorzaakt door invloeden van benedenstrooms van het suppletietraject?
- 3 Indien relevant, welk deel van deze ontwikkelingen kan worden toegeschreven aan mogelijke bodemruwheidsveranderingen sinds de suppletie en voorafgaand daaraan?
- 4 Welk deel van deze ontwikkelingen is door de suppleties zelf veroorzaakt?
- 5 Hoe ontwikkelen de effecten van de suppleties op de waterstanden zich naar verwachting in de toekomstige jaren?

Bij het beantwoorden van deze vragen moet rekening gehouden worden met mogelijke veranderingen in de Qf-relatie waarmee de afvoeren bij Lobith worden bepaald.

5.3.2 Aanpak

Voor de analyse zijn tijdreeksen van het Landelijk Meetnet Water (LMW) (ook wel MWTL genoemd) gebruikt. De gegevens zijn op 12 september 2022 gedownload van waterinfo.rws.nl. De nieuwe, meest recente Qf-relatie is nog niet van toepassing in de gedownloade gegevens voor de periode tot december 2020. De tijdreeksen bestaan uit gemeten waterstanden en de daaraan gekoppelde afvoeren bij de Pannerdensch Kop en Lobith voor de periode januari 2008 t/m december 2020 (voor meer recente periodes ontbreken de gegevens voor de Pannerdensch Kop). De metingen hebben een temporele resolutie van 1 uur.

Meetstation Lobith ligt ongeveer op het bovenstroomse einde van de suppleties, waar het maximale effect van de suppleties op de waterstand wordt verwacht. De waterstand bij Lobith wordt echter beïnvloed door zowel de suppleties als veranderingen benedenstrooms van het suppletietraject. Om invloeden van veranderingen benedenstrooms zo veel mogelijk uit de analyse te verwijderen is in plaats van absolute waterstanden het verval tussen meetstations Lobith en Pannerdensch Kop bekeken.

De waterstandmetingen zijn geanalyseerd door de afvoer bij Lobith te discretiseren in bins (van 200 m³/s) en het gemiddelde van de waterstanden voor elke bin te berekenen. Er is onderscheid gemaakt tussen de volgende periodes:

- Lange periode voor de eerste suppletie (1 januari 2008 tot eind maart 2016)
- Korte periode voor de eerste suppletie (1 januari 2015 tot eind maart 2016)
- Eerste suppletie periode (1 april tot 31 augustus 2016)
- Na eerste suppletie periode (1 september 2016 tot eind maart 2019)
- Tweede suppletie periode (1 april tot 31 augustus 2019)
- Na tweede suppletie periode (1 september 2019 tot eind december 2020)

5.3.3 Resultaten

Ontwikkelingen in waterstanden en invloed van de suppleties en van benedenstrooms

De analyse laat zien dat het waterstandverval tussen Lobith en Pannerdensch Kop langzaam toeneemt over de periode 2008 tot 2017. Deze trend wordt mogelijk veroorzaakt door de bodemdynamiek (continue insnijding van de zomerbedbodem van vooral de Waal, waardoor de afvoerverdeling steeds meer richting de Waal verschuift) en in mindere mate de uitgevoerde projecten die van invloed kunnen zijn tijdens lage afvoer in de Rijn. Enige uitzondering in deze trend is de periode tussen 2017 en 2019, waar een lichte afname van het peilverschil waar te nemen is (1-2 cm). Het is niet aannemelijk dat dit veroorzaakt wordt door de suppleties omdat 1) de trendbreuk niet samenvalt met de momenten van suppletie en 2) de suppleties een opstuwend effect zouden moeten hebben in plaats van een verlaging van het verval.

Bij eenzelfde waterstand bij de Pannerdensche Kop ligt de variatie in het gemeten verval in de orde van een decimeter (zie blauwe stippen in Figuur 20). Dat is meer dan het verwachte effect van de suppleties op de waterstanden. Het waterstandsverval verandert tot maximaal 2 cm tijdens en na uitvoering van de eerste suppletie tijdens lage afvoeren (Figuur 20). Het effect tijdens hoge afvoeren is gering. Vanwege de grote spreiding in de data, zelfs in de korte periodes tijdens de suppleties, hebben de verschillen tussen de lijnen echter maar beperkte waarde en is geen eenduidige waarde voor de invloed van de suppleties op de waterstanden af te leiden uit de metingen. Duidelijk is in elk geval dat de suppleties geen grote opstuwung veroorzaken. Dit is naar verwachting, omdat het om een, in relatie tot de waterdiepte, kleine verhoging van de bodem gaat die ook nog op het diepste deel van de rivierbodem is aangebracht.

Daarom, en om alleen de invloed van de suppleties te kunnen zien, zonder invloed van andere factoren die een rol gespeeld kunnen hebben bij de verandering van het verval, is het waterstandseffect van de suppleties ook afgeleid uit modelberekeningen⁷, waarbij de suppletie als enige veranderende variabele behouden is. In het model hebben beide suppleties een vergelijkbaar effect op de waterstanden (orde 1 cm per suppletie bij lage afvoeren, na aanleg van de tweede suppletie bovenop de eerste stapelen de effecten van beide suppleties op). Bij hogere afvoeren is het effect kleiner.

De tweede suppletie is dikker uitgevoerd dan de eerste, maar had uiteindelijk iets minder volume. Het waterstandseffect van beide suppleties is van vergelijkbaar grootte. Dat duidt er op dat de dikte van de suppletie iets belangrijker is voor de invloed op laagwaterstanden dan het volume.

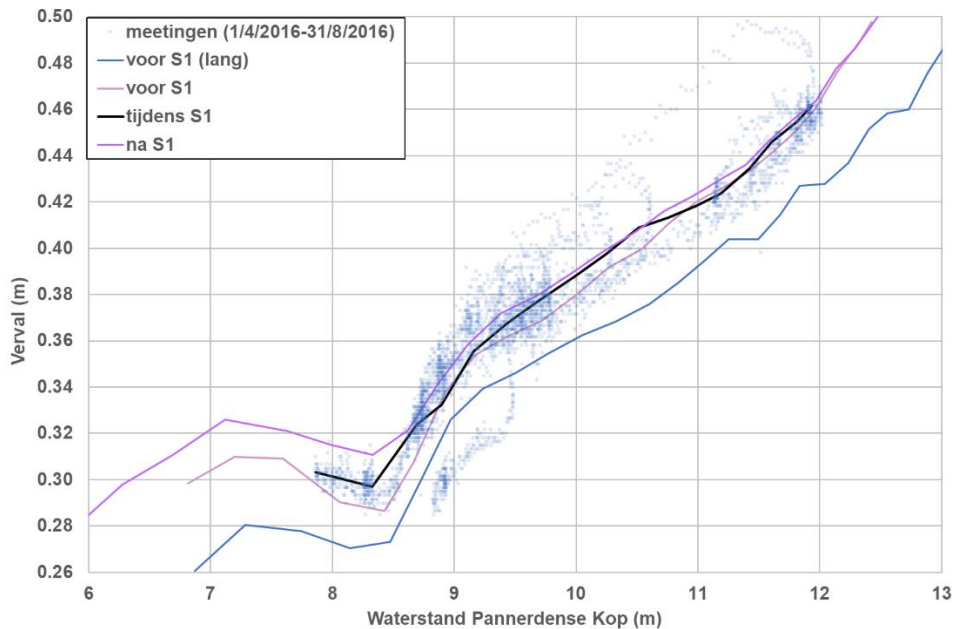
Invloed van bodemruwheidsveranderingen

De analyse van de bodemsamenstelling heeft laten zien dat de suppleties geen aanhoudende verandering in samenstelling hebben veroorzaakt (paragraaf 5.2.3). Ook is er niet heel duidelijk een invloed op de bodemvormen te zien, en als die er is dan alleen kort na aanleg van de suppleties (paragraaf 5.1.3). Er wordt dus niet verwacht dat het waterstandsverval op de Boven-Rijn in de tijd tijdens en na de suppleties door een verandering in bodemruwheid op dit traject is veranderd.

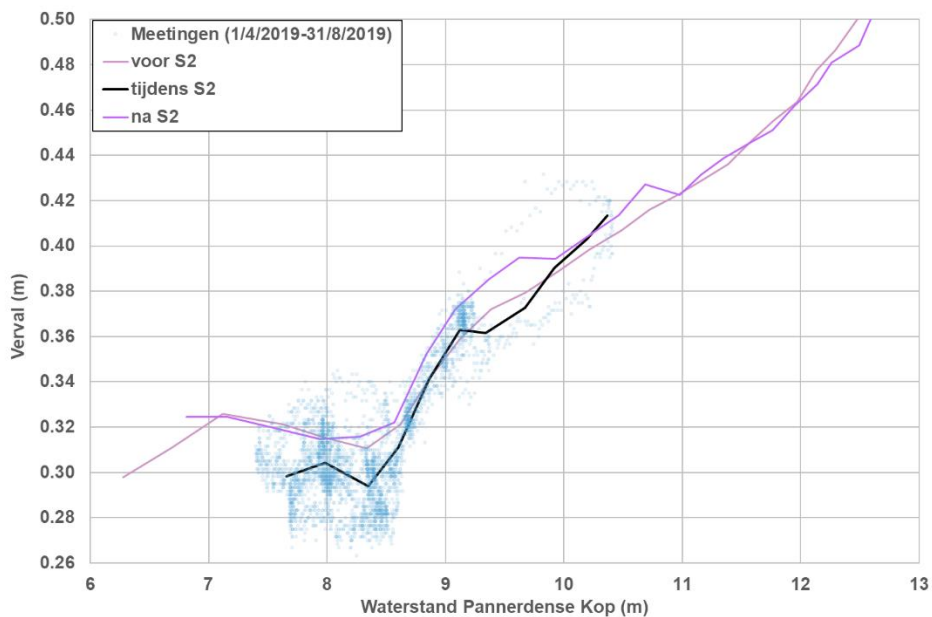
Prognose toekomstige invloed van de suppleties

Volgens de modelberekeningen is het waterstandseffect van de suppleties het grootst in de eerste 1-2 jaar na aanleg van een suppletie en neemt daarna langzaam af (met ongeveer de helft in ruim 10 jaar). In de modelberekeningen dempt echter ook de verandering van de bodemligging door de suppletie (heel) langzaam uit, terwijl dat volgens de bodempeilingen nauwelijks gebeurt (paragraaf 5.1.3). Er wordt daarom verwacht dat het opstuwende effect van de suppleties in werkelijkheid maar heel langzaam en mogelijk niet volledig verdwijnt.

⁷ Na uitvoering van de berekeningen is een fout in de implementatie van overlaten in het model geconstateerd. Een analyse van de invloed van de fout op de resultaten heeft laten zien dat de absolute bodemligging in het model anders wordt, maar de invloed van de suppleties op hydrodynamica en bodem vergelijkbaar blijft (zie Bijlage D). Daarom zijn de berekeningen voor voorliggende studie niet herhaald.



Figuur 20 Waterstandsverval (Lobith-Pannerdense Kop) versus waterstand bij Pannerdense Kop voor verschillende periodes rondom de eerste suppletie van het jaar 2016 inclusief de spreiding van de metingen tijdens de suppletieperiode ("tijdens S1").



Figuur 21 Waterstandsverval (Lobith-Pannerdense Kop) versus waterstand bij Pannerdense Kop voor verschillende periodes rondom de tweede suppletie van het jaar 2019 inclusief de spreiding van de metingen tijdens de suppletie periode.

5.3.4 Conclusies

De suppleties op de Boven-Rijn verhogen de waterstand bij Lobith, dus aan het bovenstroomse einde van de suppleties, met ongeveer 1 cm per suppletie. Naar verwachting neemt de opstuwing maar heel langzaam en mogelijk niet volledig weer af, omdat de verstoring in de bodemligging door de suppleties volgens de bodempeilingen nauwelijks uitdempt.

Het volume van een suppletie (dikte, lengte (zolang korter dan de stuwkromme), breedte (zolang kleiner dan stroomvoerende breedte)) bepaalt de opstuwing in de waterstanden bovenstrooms van de suppletie. In modelberekeningen in Becker (2021, project "Slim suppleren Boven-Waal) bleef echter bij meer dan 2 m verschil in dikte het verschil in opstuwing alsnog beperkt (orde enkele centimeters bij laagwater en nog minder bij hoogwater). Dit omdat in dit experiment gesuppleerd is in zeer diepe delen van een buitenbocht. Bij suppleties in ondiepere delen van de rivier kan de invloed van de dikte groter worden. De verwachting is dat de invloed op de waterstanden in de planfase goed met behulp van hydraulische modelberekeningen bepaald kan worden.

6 Invloed van de Boven-Rijn suppleties op de rivierfuncties

De conclusies over de invloed op rivierfuncties in voorliggend hoofdstuk zijn vooral gebaseerd op de analyse van de monitoringsgegevens van het suppletieproject. Waar nodig is dit aangevuld met resultaten van numerieke modelberekeningen. In het gebruikte numerieke model is achteraf een fout in de implementatie van overlaten geconstateerd. Een analyse van de invloed van de fout op de resultaten heeft laten zien dat de absolute bodemligging in het model anders wordt, maar de invloed van de suppleties op hydrodynamica en bodem vergelijkbaar blijft (zie Bijlage D). Daarom zijn de berekeningen voor voorliggende studie niet herhaald.

6.1 Hoogwaterveiligheid

6.1.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag die in deze paragraaf 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?

6.1.2 Aanpak

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 Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) uit te voeren. In plaats daarvan wordt gekeken naar de invloed van de suppleties op waterstanden bij lagere hoogwaters rond de 8.000 m³/s bij Lobith en worden die op basis van expert judgement en hydraulische modelberekeningen van Tuijnder (2018), van een licht afwijkende variant van de tweede suppletie, vertaald naar de hoogwaterreferentie. De analyse van waterstandsgegevens (paragraaf 5.3 en Becker et al., 2023a) heeft 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 is voor de analyse van de invloed op de hoogwaterveiligheid teruggevallen op de berekeningen met het morfologische model.

6.1.3 Resultaten en conclusies

Op basis van modelberekeningen is 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 m³/s te Lobith. Samen hebben ze een waterstandseffect van maximaal iets minder dan 2 cm bij deze afvoer. Bij afvoeren rond de hoogwaterreferentie zal dit effect kleiner zijn, de schatting is maximaal 1,5 cm op de as van de rivier. 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.

Omdat de Boven-Rijn suppleties nauwelijks bewegen of uitdempen is de verwachting dat dit effect nauwelijks of maar heel langzaam af zal nemen.

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 opstuwing maximaal ongeveer 1 cm bij 8.500 m³/s.

6.2 Gebruik van de vaarweg

6.2.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in deze paragraaf 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 OLR⁸ zoals beschreven in het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019))?
- Hoe veranderen de dwarsstroomsnelheid en langsstroomsnelheid door de suppleties, en geeft dit hinder voor de scheepvaart?
- Hoe wordt de invloed van de suppleties op de vaarweg ervaren door schippers (aan de hand van interviews met schippers die Rijkswaterstaat heeft afgenomen)?

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, en
 - de reistijd van de schepen.

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.

6.2.2 Aanpak

Minimale diepte in de vaargeul

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" (OLR-2,80 m op de Boven-Rijn/Waal). Op plaatsen waar de bodem nu al hoger ligt dan dit niveau mag de waterdiepte door ingrepen/maatregelen niet verder afnemen.

⁸ Overeengekomen Lage Rivierstand, de waterstand die hoort bij een Overeengekomen Lage Afvoer van 1.020 m³/s bij Lobith.

Om tot een prognose van de invloed van de Boven-Rijn suppleties op de waterdiepte voor de lange termijn te komen is gebruik gemaakt van modelberekeningen. Door verschillende modelaannames en uitgangspunten (Becker et al., 2023a) is de prognose van de toekomstige ontwikkeling in waterdiepte bij OLR, zoals berekend met het model, in absolute zin niet direct bruikbaar, omdat (1) de bodem in het model anders ligt dan in werkelijkheid en (2) de berekende (toekomstige) OLR afwijkt van de beleidsmatige, internationaal vastgestelde (toekomstige) OLR. Daarom is het effect van de suppleties op bestaande knelpunten, of het ontstaan van nieuwe knelpunten, 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, en Figuur 23a), waarin overigens de toen geldige OLR2012 is gebruikt, die bij Lobith 6 cm hoger ligt dan de huidige OLR2022). De berekende ontwikkeling in waterdiepte over de tijd (dus los van OLR) is ook beschouwd.

Stroomsnelheden

Dwarsstromen zijn de stromingen haaks op de vaarweg en worden normaliter bepaald op de rand van de vaarweg of op de bakelijlijn. 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 (Rijkswaterstaat, 2019) wordt daarom de dwarsstroming op de bakelijlijn (de rand van de rivier) beoordeeld. In de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020) wordt de beoordeling van de dwarsstroming nader uitgewerkt met behulp van de langsstroming en scheepslengte. Voor de Boven-Rijn suppleties zijn daarom zowel de absolute dwars- en langsstromingen als de veranderingen als gevolg van de suppleties beschouwd. Omdat er geen metingen van dwars- en langsstromingen beschikbaar zijn is daarvoor gebruik gemaakt van de resultaten van modelberekeningen.

Ervaringen van schippers

Rijkswaterstaat heeft interviews met schippers afgenomen om te achterhalen hoe de invloed van de suppleties op de vaarweg wordt ervaren door schippers. Het resultaat daarvan is een A4 met respons op vragen over gasolieverbruik en een bijbehorend spreadsheet met bijgehouden verbruik en vaarsnelheid van 5 reizen op 5 dagen. Het is onbekend hoeveel schippers bevroegd zijn, het vermoeden bestaat dat de respons van één onderneming/schipper komt. Deze respons is geanalyseerd.

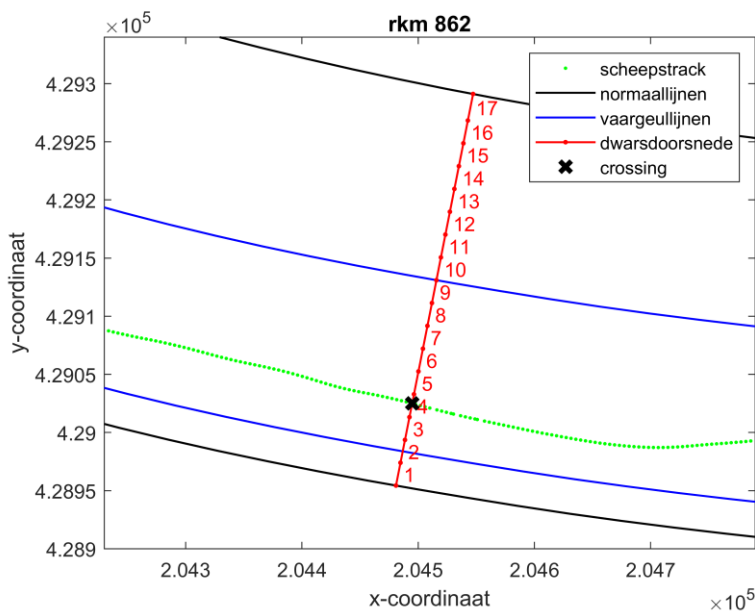
Gebruik van de vaarweg door de scheepvaart

Voor de kwantitatieve analyse naar het gebruik van de vaarweg door de scheepvaart (zowel ruimtelijke verdeling als reistijd) 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, en omdat niet voor de volledige periode van voor en na de suppleties AIS-data beschikbaar gemaakt kon worden.

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 kielspelings afgeleide waterdiepte en bodemligging zijn niet gebruikt. Bodemontwikkeling is in deelrapport 1 (Becker et al., 2023a, en paragraaf 5.1.3) geanalyseerd met behulp van multibeam bodempeilingen.

De positie-gegevens zijn geanalyseerd voor drie trajecten: In de eerste plaats het gebied van de suppleties zelf (Boven-Rijn rkm 858-867), en tevens een vergelijkbaar gebied zonder bochten in de Midden-Waal (rkm 900-910), waarmee het ruimtegebruik en reistijd kan worden vergeleken. Daarnaast een scherpe bocht in de Boven-Waal (rkm 872-882), om inzicht in het vaargedrag te krijgen, aangezien hier ook overwogen wordt een suppletie toe te passen. Ook is onderscheid gemaakt tussen de vijf periodes voor, tijdens, tussen en na de aanbreng van de suppleties.

Voor elke rivierkilometer (en tussen Boven-Rijn-km 862 en km 865 elke 250 m) zijn histogrammen van het aantal passerende schepen per segment van 20 m gemaakt voor de vijf periodes (zie voorbeeld van de segmenten in Figuur 22). Daarbij is 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.



Figuur 22 Voorbeeld van scheepstrack die rkm 862 passeert door segment 4. Passagetijd en -locatie aldus bepaald voor iedere track en iedere dwarsdoorsnede in de beschouwde trajecten.

Ook is 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) $Q > 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hoewel de data bepaalde beperkingen heeft (Becker et al., 2023b), 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.

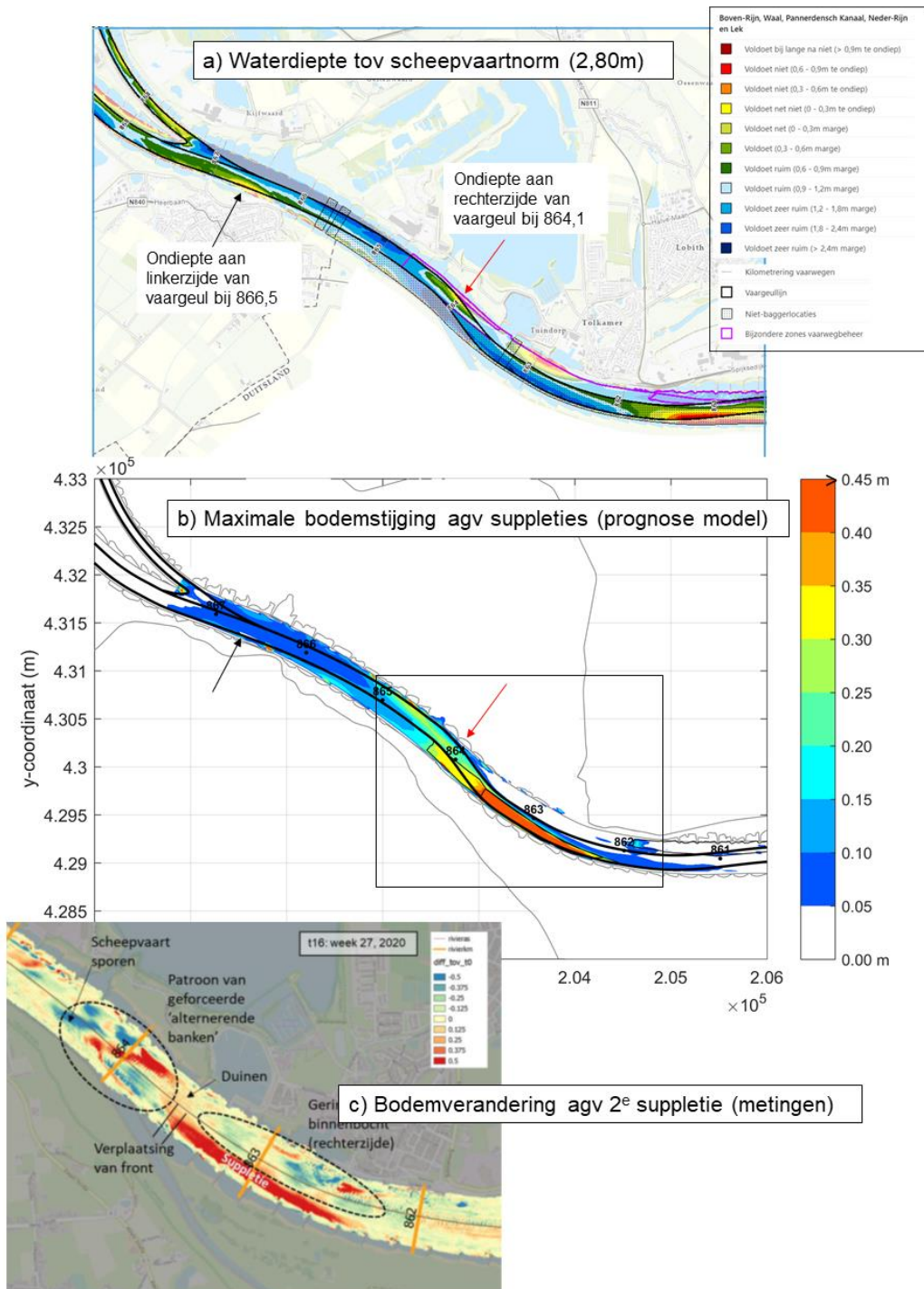
Reistijd van de scheepvaart

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.

6.2.3 Resultaten

Minimale diepte in de vaargeul

De maximale relatieve bodemstijging door de uitgevoerde suppleties gedurende de simulatieperiode van 20 jaar is weergegeven in Figuur 23b. Door de maximale bodemstijging te vergelijken met (op te tellen bij) de van metingen afgeleide waterdiepte bij OLR (Figuur 23a) 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 orde grootte 25 à 30 cm, en bij rkm 866,5 orde grootte 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 23c en Becker et al., 2023a). De berekende verondieping bij rkm 864,1 is consistent met de verondieping die in de peilingen wordt gezien (Becker et al., 2023a, en paragraaf 5.1.3). De verondieping bij het knelpunt bij rkm 866,5 is door Becker et al. (2023a) 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. (2023a). 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 23 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^e suppletie, verschil in bodemligging tussen maart 2019 (voor de 2^e suppletie) en juli 2020 (na suppletie en hoogwaterperiode).

Stroomsnelheden

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 dwarsstroming in de vaargeul kan hoger zijn dan op de bakenlijn.

Het verschil tussen de dwarsstroming met en zonder suppleties 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 (Figuur 24). Dit figuur toont de herverdeling van de stroming die plaatsvindt vanwege de suppleties, en die de 2D-reactie in de bodemligging veroorzaakt (paragraaf 5.1.3). 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 24). 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 24 Verschil in dwarsstroming (referentie – situatie met suppletie) voor een afvoer van $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rondom de suppletie zijn ook verschillen in de stroomsnelheid in langsrichting te zien, de stroomsnelheid naast de suppletie is iets hoger (maximaal $0,07 \text{ m/s}$) in de situatie met suppletie vanwege de herverdeling van de stroming, en op de suppletie wordt de stroomsnelheid iets verlaagd. Als gevolg hiervan kan de weerstand voor de opvaart licht afnemen, al zal de kleinere kielspeling dit deels tegen gaan. Voor de afvaart zal de hogere stroomsnelheid resulteren in een lichte afname in weerstand.

Ervaringen van schippers

Uit de respons kan niet geconcludeerd worden of het gasolieverbruik is toegenomen als gevolg van de suppleties. Er 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 benedenstrooms en bovenstrooms van de suppletielocatie.

Gebruik van de vaarweg door de scheepvaart

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 en 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., 2023a).

Reistijd van de scheepvaart

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 afvoerklassen 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 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.

Voor de toekomst worden geen veranderingen in reistijden, veroorzaakt door de suppleties, verwacht.

6.2.4 Conclusies

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

- Er moet 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. 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 prognoseberekningen 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 naast de suppletie. Als gevolg hiervan zal de weerstand voor de afvaart licht afnemen.
- 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 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 aangezien het effect van de suppletie op de bodem voor de toekomst niet toeneemt (Becker et al., 2023a).

6.3 Vaargeulonderhoud en MGDs

6.3.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in deze paragraaf 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.

6.3.2 Aanpak

Voor het vaargeulonderhoud is er gekeken naar het geregistreerde baggervolume op de Rijn tussen 2014 en 2021, 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. Ook is er met behulp van de morfologische modelberekeningen een prognose voor de toekomst gemaakt.

Voor de MGD is gekeken naar de locatie van de registratie. Een verschil in locatie van de MGDs voorafgaand en na de suppleties op de Boven-Rijn zou wijzen op een invloed van de suppleties.

6.3.3 Resultaten

Op het traject van de suppleties (rkm 862,55-864,55) wordt aan de Nederlandse kant van de rivier met enige regelmaat gebaggerd, ook al vóór aanleg van de suppleties. 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.

Voor het Duitse deel van de Niederrhein/Boven-Rijn konden geen gegevens verkregen worden, maar de WSV heeft aangegeven dat er in het Duitse deel rondom de suppletie geen onderhoud heeft plaats gevonden in de jaren sinds 2014 (persoonlijke communicatie R. Weisenburger, WSV).

Vanaf 2021 is er voor het Nederlandse deel minder gedetailleerde informatie over de baggervolumes beschikbaar dan tussen 2014 en 2020, ze zijn over een lange periode en een lang traject (Lobith – Nijmegen) samengenomen. Daardoor is het niet mogelijk om uit deze data conclusies over de invloed van de Boven-Rijn suppleties af te leiden. Wel is door RWS mondeling bevestigd dat in 2021 en 2022 geen vaargeulonderhoud heeft plaatsgevonden dat in verband gebracht kan worden met de suppleties.

Er is geen verandering in registratie van de MGD te zien op het traject rondom de suppleties en benedenstrooms, zowel ruimtelijk als op een temporele schaal.

6.3.4 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. Er wordt niet verwacht dat er in de toekomst MGDs ontstaan vanwege de Boven-Rijn suppleties.

6.4 Stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen

6.4.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag rondom de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen was:

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?

6.4.2 Aanpak

Informatie over locaties en dieptes van kabels en leidingen is afgeleid uit de online waterdieptekaarten van de Rijntakken⁹ en een objectcodelijst verstrekt door Rijkswaterstaat. 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.

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 m³/s en 8.592 m³/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). Daarvoor zijn de samenstelling van de ondergrond en de ligging en ontwikkeling van de rivierbodem geanalyseerd.

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. Dit is ook op de Boven-Rijn gezien (Becker et al., 2023a, en paragraaf 5.1).

⁹ https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_Waterdieptekaarten_Rijntakken.Webviewer

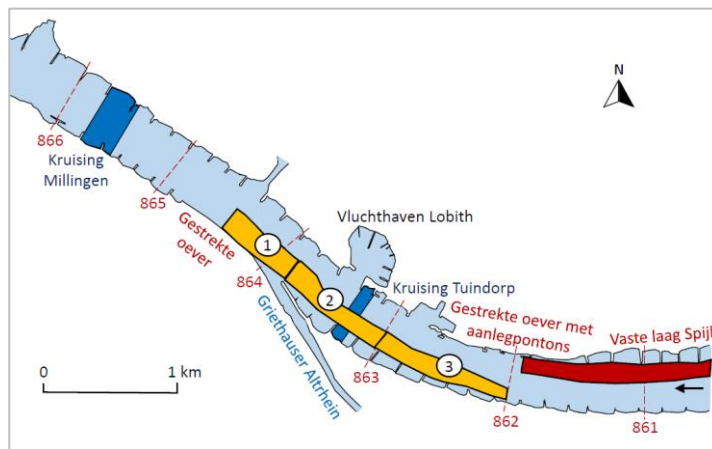
De ligging en de ontwikkeling van de bodem zijn afgeleid uit een reeks multibeam-bodempeilingen uit de periode 1999-2021 en uit de resultaten van langjarige morfologische berekeningen met Delft3D

6.4.3 Resultaten

De online waterdiepte kaarten suggereren twee kruisingen van kabels en leidingen (gebaseerd op de gedefinieerde niet-baggerlocaties, zie Figuur 26):

- bij Tuindorp tussen km 863,2 en km 863,3¹⁰;
- 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. De ligging van constructies (kribben, gestrekte oevers en de vaste laag bij Spijk) worden getoond in Figuur 25.



Figuur 25 Ligging van kabelkruising bij Millingen (km 865,5-865,9) en ligging van mogelijke kruising van kabels of leidingen bij Tuindorp (km 863,2-863,3) ten opzichte van de drie vakken van de eerste suppletie (bron: Online waterdiepte kaarten van de Rijntakken (<https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON> Waterdiepte kaarten Rijntakken.Webviewer)) , en locaties van drie vakken van de eerste suppletie, kribben, gestrekte oevers en de vaste laag bij Spijk.

De berekende bodemschuifspanningen voor de referentiesituatie zonder suppleties liggen rond 15 N/m² met uitschieters tot circa 20 N/m² op de alluviale bodem en circa 25 N/m² op de vaste laag. In de langjarige prognoseberekening verhogen de suppleties de bodemschuifspanningen met maximaal 0,75 N/m². 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. Ze geven daarom geen aanleiding tot schuifspanningen die vallen buiten het bereik waarop de kribben ter plaatse zijn berekend.

De beoordeling van de stabiliteit van de kabelkruisingen beperkte zich tot de veiligheidsmarge voor erosie, omdat de suppleties aanvullende erosie opgewekt kunnen hebben. Hiervoor onderscheidt de methodiek verschillende faalpaden.

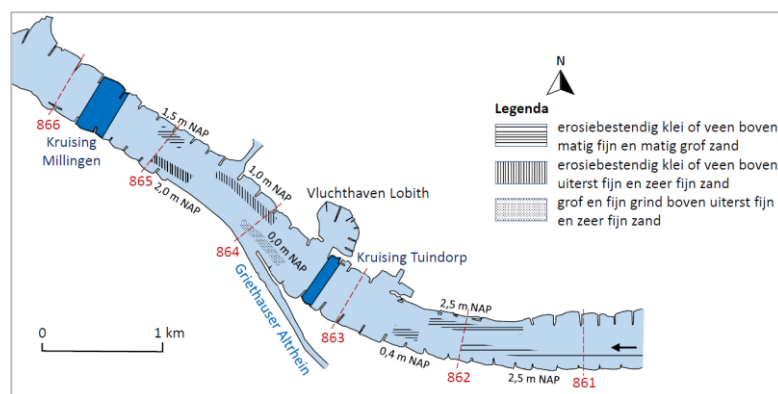
¹⁰ In de zoektocht naar het wel of niet bestaan van deze kruising werd gesuggereerd dat de niet-baggerlocatie bij Tuindorp gedefinieerd kon zijn vanwege het meetstation Lobith haven. Dat station ligt echter benedenstrooms van de haveningang, terwijl de niet-baggerlocatie bovenstrooms daarvan ligt.

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 en de ligging en de ontwikkeling van de rivierbodem. Deze worden in de volgende alinea's beschreven.

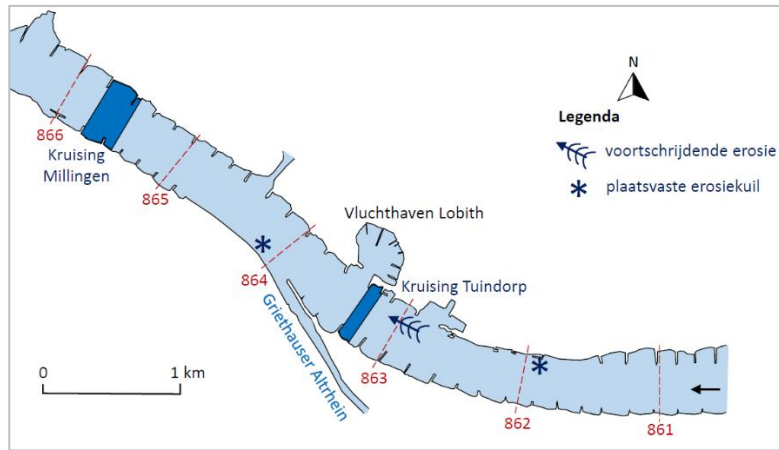
Over het gehele traject van de Boven-Rijn bevindt zich een actieve laag van grind boven fijnere onderlagen. Het sediment van die onderlagen is echter niet altijd zo fijn dat zij na blootstelling aan erosie door stroming diepe kuilen vormen. Slechts in een aantal zones is sprake van matig fijn, zeer fijn of uiterst fijn zand onder een bovenlaag van grind of erosiebestendig klei of veen. Deze zones zijn weergegeven in Figuur 26. 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. (2023a) vinden hiervoor aanwijzingen (zie ook paragraaf 5.1).

De analyse van de ligging en ontwikkeling van de rivierbodem heeft een aantal locaties naar voren gebracht waarop erosie plaatsvindt. Deze zijn samengevat in Figuur 27. Erosie boven de kruising bij Millingen brengt geen significante risico's met zich mee. Alleen erosie boven de mogelijke 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 26 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).



Figuur 27 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.

6.4.4 Conclusies

De kabelkruising bij Millingen ligt te ver van de suppleties om een significante invloed te ondergaan. Mogelijk liggen er ook kabels of leidingen bij Tuindorp, die de rivier pal onder de suppleties kruisen. 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 mogelijke 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.

7 Ervaring uit andere projecten

Naast de analyses van de suppleties op de Boven-Rijn in Becker et al. (2023a en 2023b) is gekeken welke leerpunten uit andere, vergelijkbare projecten gehaald kunnen worden, met name wat betreft de uitvoering van suppleties. Daarvoor zijn interviews uitgevoerd met:

- WSV Duisburg-Rhein: suppleties en monitoring ervan langs de Niederrhein
- RWS-WNZ: suppleties in het gebied van de Rijn-Maasmonding (over het algemeen bedoeld om ontgrondingskuilen op te vullen of de dekking op kabels en leidingen te vergroten)
- RWS-ON: vaargeulonderhoud Rijntakken
- RWS-PPO: kribvaksuppleties en opvullen van de kuil benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen (beide projecten worden op moment van schrijven van dit rapport voorbereid en zijn nog niet uitgevoerd)

7.1 Uitvoering

De WSV bepaalt voorafgaand aan een nieuw suppletiejaar welke locaties langs de Niederrhein geschikt zijn voor suppleties. Daarbij wordt net als bij de suppleties van RWS gelet op de beschikbare ruimte, uitgedrukt door de bodemligging ten opzichte van de GLW (de Duitse OLR), en de kans op scheepvaarthinder benedenstrooms, maar ook op de dynamiek van de bodemligging ter plekke (is er voldoende kans dat de suppletie 'bult' snel weer verdwijnt?). Het potentiële suppletiegebied wordt ingedeeld in vakken met een lengte die past bij de grootte van de spleetbakken voor de suppletie: een bak moet voldoende materiaal leveren voor één strook over de lengte van een vak. Kort voor aanleg van een suppletie wordt ter controle opnieuw gepeild en worden de suppletievakken definitief vastgelegd. Gesuppleerd wordt, net als bij de Boven-Rijn suppletie, met spleetbakken en tegen de stroomrichting in, omdat de suppletie op die manier het beste gestuurd kan worden. Binnen de aangewezen suppletievakken wordt in stroken gesuppleerd, orde 5 à 7 stroken naast elkaar. Als een vak op die manier is "opgevuld", wordt begonnen met een volgend vak. De WSV geeft zo wenselijk aan welke vakken als eerste gevuld moeten worden, en welke beschikbaar zijn voor kleinere hoeveelheden restmateriaal zo nodig. Achter de spleetbakken aan vaart een peilschip om direct na elke stortactie te controleren of lokaal het maximale stortniveau niet wordt overschreden. In dat geval moet de ondiepte binnen 24 uur worden verwijderd. De peilingen worden niet gebruikt om de hoeveelheid aangebracht materiaal te controleren, de uitbesteding gebeurt op basis van tonnen materiaal in de bak in plaats van volume op de rivierbodem. Dit omdat het gewicht veel beter gecontroleerd kan worden dan een volume op de rivierbodem. Het is immers een eenduidige maat, terwijl het volume afhangt van de porositeit en door bijvoorbeeld inklinken kan veranderen in de tijd. Ook berekent de WSV het jaarlijkse sedimenttekort dat door suppletie aangevuld moet worden in tonnen materiaal, er is dus geen verdere omrekening nodig in het uitbestedingsproces. Controle op het volume of zelfs de geometrie van de suppleties is in het geval van de WSV niet nodig, omdat de suppleties bedoeld zijn om het sedimenttransport aan te vullen. Het materiaal is dus bedoeld om in beweging te komen. Bij andere types suppleties, bijvoorbeeld met het doel om waterstanden op te hogen of in kribvakken of voor natuurbeheer, kan controle op volume of geometrie wel relevant zijn.

De WSV biedt de aannemer zo veel suppletievakken aan dat die het materiaal zeker kwijt kan. Nadat de suppletie volledig is uitgevoerd volgt een slotpeiling als afsluitende controle op scheepvaartknelpunten.

Bij RWS-WNZ worden suppleties met name uitgevoerd om erosiekuilen (bijvoorbeeld in de Oude Maas) op te vullen of de bodem op te hogen op plekken waar er niet meer voldoende dekking op kruisingen van kabels of leidingen is. Met name in het laatste geval moet de suppletie nauwkeurig worden uitgevoerd, omdat enerzijds een minimale dekking gerealiseerd moet worden maar anderzijds een maximaal stortniveau niet mag worden overschreden om de vaargeulafmetingen te waarborgen. Tussen de twee niveaus zit vaak weinig marge. Deze suppleties worden uitgevoerd met boten met dubbele bodemschuifdeuren. Het is belangrijk dat deze langzaam en gecontroleerd geopend kunnen worden vanwege de vereiste nauwkeurigheid in het stortniveau. Ook is langzaam storten belangrijk om te voorkomen dat er door het storten kuilen op de rivierbodem ontstaan. Dit is een risico omdat de bodem uit fijn materiaal bestaat. Omdat relatief fijn sediment (zand) wordt gesuppleerd is het ook belangrijk om op de stromingscondities te letten. Bij te hoge stroomsnelheden zou het stortmateriaal te ver meegevoerd worden met de stroming. De waterdiepte is immers vrij groot. Daarom wordt voorafgaand aan een suppletie bepaald in welk tijdvenster (rond doortij) de stroomsnelheden voldoende laag zijn om een gecontroleerde suppletie mogelijk te maken, en wordt door combinatie met de valsnelheid van het stortmateriaal berekend hoe ver dat naar verwachting zal afdriften van de stortlocatie. Hiermee wordt rekening gehouden bij de positionering van de suppletieboot. Ook voor suppleties op de Bovenrivieren moet bij de keuze van de techniek voor de uitvoering rekening gehouden worden met de hydraulische condities en de grootte van het suppletiemateriaal (korreldiameters). Op trajecten waar fijner materiaal (zand) gestort moet worden dan op de Boven-Rijn kunnen de stroomsnelheden in de hoofdgeul te groot zijn om vanuit een splijtbak nauwkeurig op een voorgegeven locatie op de rivierbodem te kunnen storten. In dat geval moet een andere stortmethode worden gekozen (bijvoorbeeld door een zuigbagger).

Net als bij de WSV wordt bij RWS-WNZ elke stort direct gecontroleerd door een peilboot. Voor het geval dat het maximale stortniveau wordt overschreden staat altijd een ploegboot op stand-by. RWS-WNZ geeft aan dat er in elk geval op de Nieuwe Waterweg voldoende ruimte aanwezig is voor 'gewone' schepen om de suppletieboot als hindernis te omvaren. Een goede communicatie met de scheepvaart via de verkeerspost, voorafgaand aan en tijdens een suppletie, wordt echter als cruciaal ervaren.

7.2 Ontwerp

7.2.1 Geometrie, volume en locatie

De WSV legt vast welke riviervakken voldoende overruimte en voldoende dynamiek voor een suppletie bieden om te zorgen dat het suppletiemateriaal binnen één jaar in transport gaat. Binnen deze vakken wordt alleen een maximaal stortniveau voorgeschreven. Binnen die grenzen mag de aannemer zelf bepalen hoe hij stort. Dat biedt volgens de WSV voldoende sturing. Dit is mogelijk omdat het doel van deze suppleties enkel het aanvullen van het sedimenttransport is. Bij andere types van suppleties, bijvoorbeeld in kribvakken of voor natuurbeheer, kan de geometrie wel relevant zijn. Van de ervaringen met de Boven-Rijn suppleties kunnen echter geen aanbevelingen voor de geometrie bij deze types suppleties worden afgeleid.

De modelberekeningen rondom het slim suppleren op de Boven-Waal (Becker, 2021) hebben laten zien dat, bij gelijkblijvend volume en locatie, een dikkere suppletie meer invloed op de waterstand heeft. Als opstuwung van waterstanden een doel van de suppletie is, kan hierop met de dikte van de suppletie (of uiteraard het volume of de locatie) worden gestuurd. Ook kan de dikte (via het waterstandseffect) relevant zijn voor de invloed op de hoogwaterveiligheid.

7.2.2 Samenstelling

Omdat in de toepassing van RWS-WNZ meestal gewenst is dat het stortmateriaal blijft liggen (in tegenstelling tot een suppletie waarmee het natuurlijke sedimenttransport moet worden aangevuld), wordt over het algemeen alleen een minimale korrel diameter voorgeschreven. Er wordt het liefst sediment gebruikt dat in de buurt van de stortlocatie beschikbaar is om onnodige reisbewegingen te voorkomen.

Bij de voorbereiding van het opvullen van de kuil benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen en ook van de kribvaksuppleties is als een van de belangrijkste aanbevelingen vanuit de Boven-Rijn suppleties gevonden dat het voorschrijven van een bepaald sedimentmengsel de prijs van het materiaal en daarmee van de uitvoering sterk kan beïnvloeden. Moeilijk te verkrijgen mengsels kunnen heel duur zijn (zie ook paragraaf 4.4). Omdat er voor suppleties over het algemeen ook grote hoeveelheden sediment nodig zijn kan dat belangrijk zijn.

De WSV leidt de samenstelling van suppleties in de Niederrhein af uit samenstellingen van gemeten sedimenttransport. Doel is om dat materiaal aan te vullen wat ontbreekt, zodat de transportgradiënt vermindert. Omdat dit een enorme claim op transportmetingen legt, is in Nederland als uitgangspunt gekozen om te grote lokale sprongen in samenstelling te voorkomen, om de eventuele lokale bodemreactie daarop te beperken.

7.3 Monitoring

Boringen (freeze cores) hebben de WSV interessante inzichten opgeleverd over het verblijf van hun tracer, zowel qua horizontale verspreiding als qua menging in de verticaal. Met de freeze cores kon tot ongeveer 1,5 m diep gekeken worden. Gepland had de WSV overigens gewone boorkernen, die niet alleen goedkoper maar ook nog dieper uitgevoerd hadden kunnen worden. Op de locatie waar dat gewenst was (in de buurt van Keulen en Leverkusen) werd echter geen boring van voldoende diameter toegestaan vanwege de mogelijke aanwezigheid van restanten van bommen uit WOII. Het verblijf van de tracer is interessant om processen van sedimenttransport en (verticale) menging beter te begrijpen. Vooral het laatste is nog maar beperkt onderzocht, en de manier hoe dit proces wordt meegenomen in de numerieke modellen van RWS is sterk vereenvoudigd. Een analyse van deze WSV-data zou kunnen bijdragen aan het vergroten van onze kennis en de verbetering van onze modelconcepten.

7.4 Invloed op de morfodynamiek en rivierfuncties

De WSV let er bij de keuze van de suppletielocaties op dat er een voldoende sterke erosietrend aanwezig is om het suppletiemateriaal het gebied weer uit te krijgen. Over het algemeen is de verstoring in de bodemligging dan ook na een jaar niet meer zichtbaar. Het benedenstroomse deel van de eerste suppletie op de Boven-Rijn lag ook op zo'n locatie (de diepe kuil bij de uitmonding van de Griethauser Altrhein) en is bij het eerste hoogwater volledig geërodeerd. Ondanks deze snelle erosie is de WSV bij hun suppleties geen grote sedimentdynamiek opgevallen (niet groter dan gebruikelijk op de suppletietrajecten). Er loopt bij de BfG nog een onderzoek naar de invloed van hun suppleties op beddingvormen (persoonlijke communicatie WSV, februari 2023). De WSV heeft ook na vele jaren van regelmatig suppleren geen nadelige invloed op het vaargeulonderhoud kunnen vaststellen. Wel is inmiddels aangetoond dat de bodemerosie op de Niederrhein door de regelmatige suppleties is gestopt (Abel, 2018).

8 Advies voor ontwerp, uitvoering en monitoring van nieuwe suppleties

8.1 Ontwerp

8.1.1 Locatie

Bij de Boven-Rijn suppleties heeft het storten in een overdiepte in de buitenbocht van de rivier en tot een maximale storthorizon ruim onder de vaargeul (OLR-3,60 m) ervoor gezorgd dat knelpunten voor de scheepvaart konden worden voorkomen. Voor toekomstige suppleties wordt aanbevolen de locatie op een vergelijkbare wijze te kiezen. Daarbij dient rekening te worden gehouden met de verwachte ontwikkeling van de bodemligging naast en benedenstrooms van de suppletie. Deze wordt in paragraaf 5.1 in detail beschreven. Hierdoor kunnen risico's ontstaan voor grotere onderhoudskosten of aanzanding op niet-baggerlocaties en voor erosie op ongewenste plekken, zoals kruisingen van kabels en leidingen of locaties met een verhoogd risico op erosiekuilen (erosiegevoelige lagen in de ondergrond).

Bij suppleties op locaties met geringe vaardiepte zou het handig kunnen zijn om een grotere overdiepte ten opzichte van de vaargeul aan te houden dan bij de Boven-Rijn suppleties, om het risico op creëren van ondieptes verder te verkleinen.

Het (2D) patroon als reactie op een asymmetrische suppletie is met morfologische modelberekeningen redelijk te voorspellen. Hetzelfde geldt naar verwachting voor de voortplanting van het suppletiefront, echter kon dat niet worden getoetst op de Boven-Rijn, omdat de suppleties daar nauwelijks verplaatst zijn. Golven van geërodeerd suppletiemateriaal hebben, gebaseerd op het beperkte aantal geobserveerde golven op de Boven-Rijn, naar verwachting een relatie met de dikte van de suppleties (zie ook paragraaf 8.1.2). Deze conclusie is echter mogelijk niet zomaar over te dragen naar andere riviertrajecten met ander, bijvoorbeeld fijner, bodemmateriaal of meer natuurlijke dynamiek. In hoeverre natuurlijke bodemvormen zoals duinen worden beïnvloed door een suppletie kon op de Boven-Rijn niet worden gezien, omdat op dat traject van nature weinig bodemvormen optreden.

Houd er bij grotere suppleties met een groter opstuwend effect op de waterstand ook rekening mee dat deze voor aanzanding bovenstrooms kunnen zorgen. Dit is op de Boven-Rijn niet geobserveerd maar kan bijvoorbeeld met een numeriek model worden aangetoond. Echter neemt de waterdiepte niet af door de aanzanding, vanwege de opstuwung.

De lokale dynamiek op de suppletielocatie en de directe omgeving kan de invloed van de suppletie beïnvloeden, bijvoorbeeld door extra dynamiek in de bodemligging benedenstrooms te veroorzaken. Op de Boven-Rijn was dat het geval bij de diepe kuil in de monding van de Griethauser Altrhein. Daarom is het zinvol om bij de keuze van een toekomstige suppletielocatie de lokale dynamiek op die locatie grondig te analyseren. Hiervoor kunnen de beschikbare bodempeilingen worden gebruikt. Aanvullende (project)peilingen, bijvoorbeeld van net vóór en net na een hoogwater, kunnen nuttige aanvullende inzichten over de lokale dynamiek leveren.

Ook kunnen er in het toekomstige suppletiegebied grootschaligere trends in de ontwikkeling van de bodemligging aanwezig zijn of worden verwacht door geplande maatregelen. Deze kunnen de geschiktheid van de suppletielocatie beïnvloeden.

Dit werd op de Boven-Rijn zichtbaar in de trend die door de aanleg van de vaste laag bij Spijk is veroorzaakt en die de suppletielocatie beïnvloedt. Uiteindelijk veroorzaken zowel de vaste laag als de suppleties op de Boven-Rijn een erosietrend in een gebied met fijn erosiegevoelig materiaal onder een grovere top laag, waardoor diepe erosiekuilen zijn ontstaan. En doordat de vaste laag op de suppletielocatie een trend voor aanzanding veroorzaakt, blijft de suppletie op deze locatie liggen in plaats van langzaam te eroderen en het sedimenttransport benedenstrooms aan te vullen. Er wordt aanbevolen om reeds aanwezige grootschalige trends in de bodemligging op het traject rond de suppletielocatie voor de locatiekeuze te analyseren met behulp van de beschikbare peilingen. Modelberekeningen zijn een aanvullend hulpmiddel voor deze analyse en kunnen bovendien helpen om toekomstige trends, bijvoorbeeld veroorzaakt door geplande maatregelen, in te schatten.

Voor een suppletie om het sedimenttransport aan te vullen moet een locatie worden gekozen waar erosie van de suppletie niet wordt belemmerd.

In het geval van suppleties van grotere hoeveelheden sediment kan het lastig zijn om voldoende locaties met voldoende overdiepte in de hoofdgeul (tussen de normaallijnen) te vinden. Ook kan het grote aantal restricties in de rivier, zoals MGD-locaties, niet-baggerzones en niet-stortzones, of locaties met risico op aansnijden van erosiegevoelige onderlagen, het lastig maken om voldoende geschikte locaties met voldoende klein risico te vinden. Er kan dan overwogen worden om op een ander type locatie te suppleren, bijvoorbeeld in een binnenbocht maar buiten de vaargeul of in een kribvak. De Boven-Rijn suppleties leveren echter geen inzichten op hoe de geschiktheid van zo'n locatie beoordeeld kan worden.

Een suppletie op de eerste kilometers benedenstrooms van een splitsingspunt (bijvoorbeeld op de Boven-Waal) heeft invloed op de waterstand en daarmee ook de afvoerverdeling. Als dat ongewenst is moet de suppletie voldoende ver van het splitsingspunt worden geplaatst. Hoe ver dat is hangt af van de grootte van de suppletie (lengte, dikte, breedte) en kan worden onderzocht met (hydraulische) modelberekeningen.

Ook de opstuwung door een geplande suppletie langs de primaire kering of overige objecten in de uiterwaard kan van tevoren worden getest met hydraulische modelberekeningen. Op basis daarvan kan worden beoordeeld in hoeverre de suppletielocatie (en geometrie) een risico vormt voor bijvoorbeeld de hoogwaterveiligheid. Als de suppletie op een locatie wordt geplaatst waar het materiaal weer kan eroderen is de opstuwung echter maar tijdelijk. Modelberekeningen kunnen een (grove) indicatie geven van de te verwachten tijdschaal.

8.1.2 Geometrie en volume

Er wordt aanbevolen om de geometrie en het volume van toekomstige suppleties minimaal te beschrijven door:

- 1) een maximaal stortniveau. Daardoor kan immers ruimte onder de vaargeul worden gegarandeerd voor de boven beschreven reacties van de bodemligging op de suppletie.
 - 2) een maximale dikte. Dit omdat de sterkte van de reactie van de bodemligging (2D-patroon en golven van geërodeerd suppletiemateriaal) hieraan gerelateerd is: een dikkere suppletie kan grotere bodemveranderingen veroorzaken (zie paragraaf 5.1).
- Hierbij wordt de kanttekening geplaatst dat deze dynamiek bij een suppletie op een andere locatie dan de Boven-Rijn, met ander (bijvoorbeeld fijner) materiaal, anders en mogelijk groter kan zijn. Daarom wordt voortsnog aanbevolen om de huidige bodemligging, met beheersbare risico's, niet te veel te verstoren door een suppletie.

Als er meer monitoringsgegevens beschikbaar komen van suppleties op meer dynamische trajecten met fijner materiaal, waarmee de invloed van suppleties op de natuurlijke bodemdynamiek nog beter ingeschat kan worden, kan dit worden heroverwogen. Uit de ervaring met de Boven-Rijn suppleties kan geen duidelijke leidraad voor een maximale dikte worden afgeleid.

De hoeveelheid sediment kan worden voorgeschreven in tonnen in de beun in plaats van een volume op de rivierbodem. De Boven-Rijn suppleties hebben namelijk laten zien dat door snelle bodemdynamiek het middels peilingen nauwkeurig aantonen van een volume op de bodem lastig kan zijn. De frequentie van de peilingen is daarbij belangrijk; op de Boven-Rijn waren wekelijkse¹¹ peilingen niet voldoende, dagelijkse¹² wel. Bij suppleties met meer doelen dan het aanvullen van het sedimenttransport benedenstrooms, bijvoorbeeld het ophogen van waterstanden of natuurbeheer, kan controle op volume wel relevant zijn.

Op locaties met sterk variërende bodemligging, zoals scherpe bochten, kan een vlakvullende suppletie lokaal vrij dik worden. Om het risico op een sterke reactie in de bodemligging te voorkomen wordt vooralsnog aanbevolen om op zo'n locatie profielvolgend te suppleren of, bij een vlakvullende suppletie, aanvullend een maximale dikte voor te schrijven. Dat laatste is ook toegepast bij de Boven-Rijn suppletie uit 2019.

Met name de dikte van een suppletie bepaalt, samen met de locatie, hoe sterk de suppletie de waterstanden beïnvloedt. Het risico op ongewenst grote opstuwing kan in de planfase onderzocht worden met hydrodynamische modelberekeningen.

8.1.3 Samenstelling van het suppletiemateriaal

Ook na de monitoringscampagne van de Boven-Rijn suppleties is nog steeds niet goed bekend wat de invloed van de samenstelling van een suppletie op het gedrag van de suppletie is. Dit kan ook nog niet goed worden voorspeld met modellen. Czapiga et al. (2022) doen uitspraken hierover, echter zijn deze gebaseerd op theoretisch onderzoek met bepaalde modelconcepten en vooralsnog alleen in één dimensie. De resultaten daarvan kunnen niet zonder meer worden overgedragen naar suppleties in een echte rivier. Om het proces van menging en verspreiding van het suppletiemateriaal beter te begrijpen is significante monitoring van toekomstige suppleties of andere geschikte projecten nodig (paragraaf 8.3).

Vooralsnog lijkt de veiligste keuze voor de samenstelling van toekomstige suppleties nog steeds een vergelijkbare samenstelling als het natuurlijke bodemmateriaal. Het gedrag van de bodem blijft dan vermoedelijk vergelijkbaar als nu, ook na suppletie.

In geval van toekomstige suppleties in de Boven-Rijn kan ervan worden uitgegaan dat enkelvoudige toepassing van een relatief grof mengsel, waarin de zandfractie grotendeels ontbreekt, niet zal leiden tot een vergroving van de toplaag van de bedding. Daarentegen betekent dit ook dat, voor een mogelijk gewenste vergroving van de toplaag, er een aanzienlijke hoeveelheid grof sediment moet worden gesuppleerd voordat het leidt tot een zichtbare vergroving (zichtbaar in de toplaag die wordt bemonsterd).

De suppleties op de Boven-Rijn hebben laten zien dat bij het voorschrijven van een bandbreedte in de zeefkromme het risico bestaat dat het toegepaste materiaal in totaal vrij fijn of grof wordt vergeleken met het van nature aanwezige bodemmateriaal.

¹¹ een in-peiling op maandag ochtend en een uit-peiling vrijdag middag

¹² een in-peiling 's ochtends voor begin van het suppleren en een uit-peiling 's avonds na afsluiting

Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld aparte bandbreedtes voor te schrijven voor verschillende sedimentfracties (bijvoorbeeld via de percentages en een mediaan per fractie voor bijvoorbeeld de zand- en de grindfractie) en door de keuze van de data waarmee de bandbreedtes worden gedefinieerd goed te onderbouwen (welk deel van het riviertraject is representatief voor “de ontvangende bodem”?). Overigens zullen er bij uitvoering van een suppletie altijd afwijkingen zijn ten opzichte van het materiaal op de ontvangende bodem. Dit vanwege een mogelijke invloed van het stortproces en de stroming tijdens het storten enerzijds en de onzekerheid in de samenstelling van de ontvangende bodem anderzijds. Bij de Boven-Rijn suppleties kon niet worden vastgesteld dat deze afwijking tot neveneffecten heeft geleid.

Ook is in de pilot duidelijk geworden dat de samenstelling van het materiaal dat op de bodem terecht komt kan verschillen van de samenstelling in de bak. Het kan daarom uitmaken of de samenstelling wordt voorgeschreven voor de bak of voor op de bodem. Er is echter niet voldoende betrouwbare informatie beschikbaar om dit effect te kwantificeren. Vooral nog wordt geadviseerd er van uit te gaan dat de samenstelling in de bakken kenmerkend is voor de gemiddelde samenstelling van de suppletie-laag op de bedding.

Een sedimentmengsel dat moeilijk in grote hoeveelheden verkrijgbaar is op de markt kan de prijs van een suppletie sterk opdrijven. Echter is het niet noodzakelijk dat het suppletiemateriaal volledig van eenzelfde locatie afkomstig is, menging van apart ingekochte onderdelen van het mengsel aan wal kan immers ook. Ook zou met een volgende suppletie getest kunnen worden of het qua uitvoering en neveneffecten een optie is om verschillende onderdelen van het mengsel in aparte lagen aan te brengen. Daarbij zouden bewust grovere en fijnere lagen afgewisseld moeten worden om vermenging ter plaatse door de bodemdynamiek te bevorderen.

8.1.4 Frequentie

De Boven-Rijn suppleties geven inzicht in het gedrag van een enkelvoudige suppletie. Het is op dit moment nog niet duidelijk wat de langere termijn gevolgen van regelmatige suppletie op bodemligging en bodemsamenstelling zouden zijn. Als RWS in de toekomst regelmatige suppleties overweegt om de erosietrend op bepaalde riviertrajecten te stoppen wordt daarom aanbevolen om de invloed op bodemligging en bodemsamenstelling te blijven monitoren en een adaptieve aanpak te volgen.

8.1.5 Overige aanbevelingen voor de planfase van een toekomstige suppletie

Morfologische modelberekeningen kunnen bij toekomstige suppleties helpen om de effecten met name op de bodemligging van tevoren in te schatten. Omdat deze effecten sterk afhangen van de afvoerhydrograaf in de toekomst en de aanvoer van sediment van bovenstrooms wordt aanbevolen om met deze parameters een gevoeligheidsstudie uit te voeren om de bandbreedte van effecten te kunnen bepalen. Ook kan het model worden gebruikt om te experimenteren met de locatie, geometrie en samenstelling van toekomstige suppleties.

8.2 Uitvoering

De aanbevelingen in deze paragraaf komen voort uit de aanbevelingen van de aannemer van de eerste Boven-Rijn suppletie in 2016 (Weijnans, 2016) en de ervaring binnen RWS met andere suppletieprojecten (hoofdstuk 7). Daarnaast is veel kennis en ervaring beschikbaar bij de diverse baggerbedrijven. Suppleties voor erosiebestrijding vinden op dit moment onder andere plaats in de Rijnmaasmonding en in Zeeland, en op diverse internationale projecten. Er wordt daarom aanbevolen om voorafgaand aan een nieuw suppletieproject ook daar kennis in te halen specifiek voor het geplande project.

8.2.1 Voorbereiding van de suppletie

De Boven-Rijn suppleties hebben geleerd dat er risico's kunnen ontstaan door de afstemming tussen een opdrachtnemer en zijn onderaannemers. Er wordt aanbevolen hierop te letten bij de aanbesteding van toekomstige suppleties.

De aannemer van de eerste Boven-Rijn suppletie heeft de inhoudelijke uitleg van RWS voor aanvang van de uitvoering als waardevol ondervonden (Weijnans, 2016). Daarom wordt aanbevolen om dit in toekomstige aanbestedingen ook te doen.

8.2.2 Uitvoering van de suppletie

Bij de keuze van de uitvoeringsmethode voor een suppletie moet rekening worden gehouden met de hydraulische condities (stroomsnelheden en waterdieptes) en de grootte van het suppletiemateriaal (korreldiameters). De suppleties op de Boven-Rijn hebben aangetoond dat het daar met splijtbakken mogelijk is om suppletiemateriaal van voornamelijk grind snel, kostenefficiënt en bovendien nauwkeurig aan te brengen (Weijnans, 2016). Op trajecten waar fijner materiaal (zand) gestort moet worden dan op de Boven-Rijn is aan te bevelen om bij de positionering van de splijtbak of onderlosser rekening te houden met de vermoedelijke afdrift van het stortmateriaal, gebaseerd op de verwachte stroomsnelheid en valsnelheid (paragraaf 7.1). De stroomsnelheden in de hoofdgeul kunnen echter ook te groot zijn om vanuit een splijtbak/onderlosser nauwkeurig op een voorgegeven locatie op de rivierbodem te kunnen storten. In dat geval moet een andere stortmethode worden gekozen, die het suppletiemateriaal direct naar de bodem brengt (bijvoorbeeld een sleephopperzuiger).

Ook moet op trajecten met fijner bodemmateriaal rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat door de kracht waarmee het materiaal op de bodem landt er kratervorming kan optreden en eventuele aanliggende taluds instabiel kunnen worden (paragraaf 7.1).

Gebaseerd op de ervaring met de Boven-Rijn suppleties is de verwachting dat, bij uitvoering met splijtbakken, schaalvergroting naar grotere volumes of laagdiktes of naar meerdere suppletielocaties vanuit het oogpunt van uitvoerbaarheid zonder problemen mogelijk is. De duur van de uitvoering zal daarbij afhankelijk zijn van de afstand naar een geschikte overslaglocatie en de grootte en het aantal beschikbare duwboot-splijtbak-combinaties (Weijnans, 2016). Bij toepassing van sleephopperzuigers kan wellicht gebruik worden gemaakt van groter materieel, waarbij grotere stortvolumes per reis zijn te realiseren.

Wel bleek uit de Boven-Rijn suppleties dat dunne stortlagen, kleine toleranties in de stortlaagdikte of smal of spits toelopende geometrieën lastiger nauwkeurig te storten zijn vanuit splijtbakken (Weijnans, 2016). Daarom wordt aanbevolen deze alleen dan voor te schrijven als dat voor het doel van de suppletie noodzakelijk is (zie ook paragraaf 8.1.2).

De Boven-Rijn suppleties hebben bovendien laten zien dat het controleren van de positie en route van de splijtbakken wordt beïnvloed door de aanwezigheid van vaarverkeer en dwarsstromingen als gevolg van neren ter plaatse van kribben (Weijnans, 2016). Het is gebruikelijk dat voor manoeuvreerbaarheid het schip met een zekere snelheid vaart tijdens het storten. Ook bij toekomstige suppleties met splijtbakken moeten er dus duwbotten met voldoende vermogen om de splijtbakken goed te positioneren worden gekozen. Om koerscorrecties tijdens het suppleren te beperken en dus het materiaal in een rechte lijn te kunnen storten is het handig om de splijtbak op tijd stroomafwaarts in de lijn van het gewenste stortvak te positioneren en vervolgens stroomopwaarts varend te suppleren (Weijnans, 2016). Dat laatste is handig voor de manoeuvreerbaarheid en het nauwkeurig kunnen positioneren.

Bij het voorbereiden van toekomstige suppleties met splijtbakken kan bij de Duitse WSV nog kennis/ervaring opgehaald worden met het aanbrengen van suppleties met behulp van zelf varende splijtbakken. Daarnaast is veel kennis en ervaring beschikbaar bij de diverse baggerbedrijven. Suppleties voor erosiebestrijding vinden op dit moment onder andere plaats in de Rijnmaasmonding en in Zeeland, en op diverse internationale projecten.

Voor een (tijds)efficiënte overslag van suppletiemateriaal naar splijtbakken, bij overslag op de rivier zelf, dus onder stroom, beveelt de aannemer van de eerste suppletie op de Boven-Rijn aan om het materiaal aan te laten voeren door binnenvaartschepen met spudpalen (Weijnans, 2016).

8.2.3 Voorkomen van scheepvaarthinder

Bij de Boven-Rijn suppleties hebben het verbieden van vaste voorzieningen of overslag tussen de normaallijnen, het storten in vaarrichting (opvarend aan de stuurboordwal zijde van de rivier) en het kiezen van een voldoende groot tijdvenster zonder scheepvaart voor elke stort er voor gezorgd dat de scheepvaart geen hinder heeft ondervonden door de uitvoering van de suppleties. Deze eisen zijn deels afkomstig van de Duitse WSV omdat op Duits grondgebied is gesuppleerd. Bij toekomstige suppleties op Nederlands grondgebied moet RWS afwegen hoe streng de eisen met betrekking tot scheepvaarthinder moeten worden.

Een goede communicatie met de scheepvaart via de verkeerspost, voorafgaand aan en tijdens een suppletie, is bij de Boven-Rijn suppleties en in de ervaring van RWS-WNZ in elk geval als waardevol ondervonden en wordt daarom ook voor toekomstige suppleties weer aanbevolen.

Met name op drukbevaren trajecten, zoals de Boven-Rijn en de Waal, of op smalle trajecten, zoals de IJssel en het Pannerdensch Kanaal, kan het nuttig zijn om rekening te houden met hinder voor de scheepvaart. Dit geldt ook voor trajecten met scherpe bochten. De analyse van het gebruik van de vaarweg heeft immers laten zien dat op de (bochtige) Boven-Waal de opvarende schepen een groter deel van de breedte benutten dan op de redelijk rechte Boven-Rijn of Midden-Waal (Becker et al., 2023b, en paragraaf 6.2). RWS moet afwegen hoeveel hinder voor de scheepvaart acceptabel is in verhouding tot eventuele extra kosten of uitvoertijd van toekomstige suppleties.

8.2.4 Monitoren van de uitvoering

Bij suppleties op trajecten waar scheepvaarthinder door geringe vaardiepte moet worden beperkt wordt aanbevolen om direct na elke stortactie een peiling uit te voeren om te controleren of het maximale stortniveau is overschreden. In combinatie met een peiling van voor aanleg van de suppletie kan bovendien worden gecontroleerd of de maximale dikte niet wordt overschreden.

Bij een suppletie waar het aanbrengen van een specifiek volume op de bodem gewenst is (vergelijk ook paragraaf 8.1.2) moet dit worden gecontroleerd door in- en uitpeilingen. Bij de eerste Boven-Rijn suppletie is dat dagelijks gebeurd. Bij de tweede suppletie in 2019 zijn de in-peilingen niet dagelijks uitgevoerd en kon niet het volledige volume op de bodem worden aangetoond (Bulsink, 2019), mogelijk vanwege de lokale dynamiek tussen de peilingen. Dit betekent dat er veel peilingen moeten worden uitgevoerd, waardoor kosten en de CO₂-uitstoot hoog zijn. Ook dit is een reden om alleen als dat echt noodzakelijk is het aantonen van een specifiek volume op de bodem voor te schrijven.

Om de invloed van de bodemdynamiek en de (verticale) tolerantie van het peilsysteem zo klein mogelijk te houden wordt aanbevolen om de volumes te bepalen over het oppervlak waarbinnen effectief is gesuppleerd.

Tijdens de dagelijkse in-survey van het suppletievak kan het beste het gehele vak worden gepeild. Het peilen van alleen een sub-vak beperkt immers de mogelijkheid om uit te wijken naar een ander sub-vak als dat nodig is (Weijnans, 2016)).

8.3 Monitoring

Er wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende types monitoring:

1. monitoring voorafgaand aan een project zoals een nieuwe suppletie, om bijvoorbeeld een geschikte locatie te kunnen kiezen en bepaalde risico's beter in beeld te brengen;
2. monitoring voor- en achteraf aan een project zoals een nieuwe suppletie, om de effecten te bepalen en ervan te leren;
3. periodieke monitoring ten behoeve van rivierbeheer, over het algemeen van hele riviertrajecten;
4. monitoring op specifieke locaties voor onderzoek.

Onderstaande paragrafen gaan in op de eerste twee types, dat wil zeggen de monitoring ten behoeve van een specifiek aanlegproject, zoals de aanleg van een suppletie.

Voor beide types monitoring wordt aanbevolen om van tevoren goed na te denken over de grootte van het traject waarover gemonitord moet worden. De ervaring met de Boven-Rijn suppleties leert dat daarbij niet alleen rekening moet worden gehouden met het traject dat naar verwachting wordt beïnvloed door het aanbrengen van een nieuwe suppletie, maar ook met trajecten boven- en benedenstrooms waarop ontwikkelingen plaatsvinden die van invloed kunnen zijn op het gedrag van de suppletie. Een voorbeeld is de invloed van de vaste laag bij Spijk op de suppleties op de Boven-Rijn. Vergeet hierbij niet om ook rekening te houden met de invloed van geplande ingrepen.

8.3.1 Monitoring in de planfase van een nieuwe suppletie

Om grootschalige trends in de bodemligging te analyseren voor de keuze van een geschikte locatie voldoen de beschikbare halfjaarlijkse peilingen van het hele Rijntakkegebied. De verwachte effecten van geplande ingrepen moeten daarbij worden opgeteld en kunnen op basis van expert judgement of modelberekeningen worden bepaald. Naar verwachting is er voor de Rijntakken ook voldoende kennis beschikbaar over de (maximale) afmetingen van bodemvormen. Op locaties in het stortgebied waarvoor sterke dynamiek verwacht wordt, zoals gezien bij de monding van de Griethauser Altrhein op de Boven-Rijn, kan het nuttig zijn om aanvullende peilingen uit te voeren bij verschillende afvoerniveaus om deze beter te begrijpen.

Als er in een erosiezone naast of benedenstrooms van de nieuwe suppletie kans is op fijnzandige onderlagen afgedekt door een mobiele pleisterlaag is het zinvol een aantal boringen uit te voeren om de structuur van lagen vast te stellen. Ondiepe boringen (orde 1 á 2 m) zullen vaak volstaan. Daarmee kan het risico van eventuele doorbraak en ontstaan van erosiekuilen (zoals bij de Boven-Rijn suppleties) worden ingeschat.

8.3.2 Monitoring voor het uitbreiden van onze kennisbasis

Als er in de toekomst suppleties op de meer benedenstroomse Rijntakken gepland worden, zoals de Waal, wordt aanbevolen om deze weer uitgebreid te monitoren (projectmonitoring). Niet alle conclusies over de suppleties op de Boven-Rijn zijn namelijk geldig voor de andere riviertakken, waar de ontvangende bodem over het algemeen uit duidelijk fijner materiaal (zand) bestaat. Met name de door de suppleties opgewekte kleinschaligere dynamiek (zoals golven van geërodeerd suppletiemateriaal) kan bij fijner sediment afwijken. Ook is de Boven-Rijn, in tegenstelling tot andere trajecten van de Bovenrivieren, een traject met weinig bodemdynamiek.

De invloed van een suppletie op een traject met meer dynamiek kan anders zijn dan op de Boven-Rijn. En tot slotte is de voortplanting van een suppletiefront en de invloed daarvan op de 2D-reactie van de bodemligging nog onvoldoende gezien bij de Boven-Rijn suppleties.

De regelmatige bodempeilingen in het invloedgebied hebben bij de Boven-Rijn suppletie veel inzichten opgeleverd. Op de Boven-Rijn geven de standaardpeilingen twee keer per jaar, aangevuld met een peiling kort na elk hoogwater, voldoende informatie. Bij een suppletie op een andere riviertak met meer dynamiek wordt aanbevolen om in elk geval in het eerste jaar vaker (bijvoorbeeld maandelijks) te peilen, om te kunnen controleren of er initieel en daarna ook bij lagere en middelgrote afvoeren een invloed van de suppletie te zien is, en hoe de suppletie beweegt en uitdempt. De frequentie van de peilingen in het vervolg kan worden afgestemd op de inzichten uit het eerste jaar.

De processen die leiden tot de verspreiding en menging van het suppletiemateriaal zijn ook na analyse van de gegevens over de Boven-Rijn suppleties nog niet voldoende begrepen. De bodemmonsters en de Medusa-metingen hebben immers alleen inzichten over de bovenste sedimentlaag (10-30 cm) opgeleverd. Bovendien zijn er maar weinig monsters op en nabij de suppletie genomen. Het is daarom belangrijk dat ook bij nieuwe suppletieprojecten vóór en na de uitvoering van het project bemonsteringen worden uitgevoerd voor effectbepaling. Er wordt aanbevolen om voor deze bemonstering zoveel mogelijk gebruik maken van de Hamon happer (met name op de gegradeerde trajecten). Er wordt aanbevolen om (naast een bemonstering vóór aanleg) in het eerste jaar na de suppletie minimaal twee keer te bemonsteren: zowel na een periode van laagafvoer wanneer de invloed van scheepvaart mogelijk een rol speelt en duinen zijn uitgedempt, en direct na hoogwater, vooral wanneer duinen zijn ontstaan of pleisterlagen opgebroken. Dit in een tweede jaar herhalen.

Om ook meer inzichten in de verticale mengprocessen te verkrijgen wordt aanbevolen om bij toekomstige suppleties weer een tracer toe te passen en ook de verticale menging ervan te achterhalen door middel van een aantal boringen, waarin de tracer vervolgens terug gezocht wordt.

De tracer is belangrijk om een goed begrip te krijgen van het menggedrag van het suppletiemateriaal, dat de invloed van de suppletie op de bodemligging kan beïnvloeden. Dit begrip is noodzakelijk om goede aanbevelingen voor de samenstelling van toekomstige suppleties te kunnen geven. Ook is deze kennis nodig om een goede validatie van modelconcepten en modelinstellingen uit te kunnen voeren, wat tot betrouwbaardere modelresultaten in de toekomst leidt.

De analyse van verhanglijnmetingen die in het kader van recente projecten zoals de suppleties op de Boven-Rijn en de aanleg van de langsdammen op de Midden-Waal zijn uitgevoerd heeft laten zien dat deze te grillig zijn om kleinere waterstandseffecten (minder dan orde 10 cm) ervan af te leiden. Hiervoor kan beter gebruik gemaakt worden van een numeriek model. Wel leveren verhanglijnen nuttige aanvullende informatie voor de kalibratie van de numerieke modellen van RWS over waterstanden en het verhang tussen de LMW-stations. Er wordt daarom aanbevolen om deze in de cyclus van periodieke monitoring op te nemen. Daarbij is een relatief lage frequentie (elke 5 of 10 jaar, of na een grotere verandering in het systeem zoals de aanleg van de Ruimte voor de Rivier projecten) voldoende.

8.3.3 Afstemmen met periodieke monitoring en monitoring voor andere projecten

Naast de projectmonitoring van een toekomstig suppletieproject wordt er op de Rijntakken periodieke monitoring uitgevoerd, bijvoorbeeld de halfjaarlijkse bodempeilingen en campagnes voor bodemmonsters (tot nu toe niet regelmatig uitgevoerd).

Voor specifieke project-gerelateerde monitoring is het zinvol aansluiting te zoeken bij bovengenoemde periodieke monitoring. Dit betreft enerzijds de gebruikte meetmethodes. Als deze in de projectmonitoring gelijk worden gehouden aan de methodes voor het periodieke monitoring zorgt dat voor consistentie in en vergelijkbaarheid van alle beschikbare gegevens, waardoor belangrijke onzekerheden in de analyse worden voorkomen. Anderzijds betreft dit monitoringslocaties. Als het gaat om bodemonsters voor een project is bijvoorbeeld aan te bevelen dat in ieder geval ook een monster wordt genomen op de nabijgelegen standaard raaien die periodiek zijn bemonsterd.

Om te kunnen beoordelen of ingrepen in de rivier invloed hebben op het vaargeulonderhoud is monitoring met hoge resolutie in de ruimte (1-2 km) en de tijd (minstens maandelijks) nodig. Sinds 2021 worden de baggervolumes alleen nog voor vrij lange trajecten en perioden samengevat geregistreerd. Dat is niet voldoende voor effectbepaling, en ook niet voor de validatie van morfologische modellen. Er wordt daarom aanbevolen weer terug te gaan naar de resolutie van vóór 2021.

8.3.4 Uniformeren van dataformaten en naamgeving en centrale opslag van data

Daarnaast wordt sterk aanbevolen om binnen RWS het bestandsformaat, de naamgeving van bestanden en de mee te leveren metadata zoveel mogelijk te uniformeren. Dit is uitermate belangrijk voor de vindbaarheid en de verwerkbaarheid van meetgegevens, ook op de langere termijn.

Voor de eindevaluatie van de Boven-Rijn suppleties zijn bijvoorbeeld de bodempeilingen in meerdere verschillende formaten (ascii of raster, bodemhoogtes aangegeven in meters, decimeters of centimeters boven NAP, ...) en met andere naamgeving toegeleverd aan Deltares. Dat maakte handmatige en dus tijdrovende bewerking van elk bestand nodig voordat een (geautomatiseerde) analyse van het geheel aan projectdata uitgevoerd kon worden. Ook is het hierdoor moeilijk om de projectdata in latere studies toe te passen, samen met bijvoorbeeld de periodieke monitoring.

Als men aan de aannemer geen formaten wil voorschrijven kan de uniformering plaatsvinden in een nabewerkingsslag bij RWS.

Er wordt bovendien aanbevolen om projectdata net als de data van periodieke monitoring centraal op te slaan en terug te laten komen in overzichtslijsten, om de vindbaarheid te vergroten. Ook al is de data ingewonnen voor een specifiek project kan het heel nuttige informatie bevatten voor andere uitvoerings- of onderzoeksprojecten.

In 2016 zijn door een groep van wetenschappers en organisaties de "FAIR data principes" gedefinieerd om data vindbaar, toegankelijk, interoperabel en herbruikbaar (**F**indable, **A**ccessible, **I**nteroperable and **R**eusable) te maken voor mens en computer (Wilkinson et al., 2016). Deze hebben tot doel het gebruik en hergebruik van gegevens, onderzoek en kennisontwikkeling te verbeteren. Er wordt aanbevolen deze principes te handhaven.

9 Literatuurverwijzingen

- Abel, D. (2018): Geschiebebewirtschaftung am Niederrhein. Presentatie op de “20. Gewässermorphologisches Kolloquium. Gewässermorphologie – Ein Querschnitt über zwei Jahrzehnte“, 7./8. november 2018 in Koblenz.
- Becker, A., S. Giri, A. Paarlberg, K. Sloff, P. van Denderen & M. Zagonjoli (2023a). Eindevaluatie suppletie Boven-Rijn; Deelrapport 1: Data en effecten. Deltares rapport met kenmerk 11208437-000-ZWS-0007.
- Becker, A., R. van der Mark, R. van der Wijk & E. Mosselman (2023b): Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn; Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties. Deltares rapport met kenmerk 11208437-000-ZWS-0010.
- Bokkes, B.J., en W. Peters (2015): Klanteisenspecificatie (KES) 2.0: Project: Sedimentsuppletie Boven-Rijn. Programma Groot Variabel Onderhoud Nat. Dienst Oost-Nederland. 24 februari 2015.
- Bulsink, D. (2019): Verslag Evaluatieatelier SSBR. Verslag van Rijkswaterstaat Programma's, Projecten en Onderhoud, 20 november 2019.
- Czapiga, M.J., A. Blom & E. Viparelli (2022): Sediment Nourishments to Mitigate Channel Bed Incision in Engineered Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 148, Issue 6, Juni 2022.
- Grujters, 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.
- Jans, L. (2018): Waterdieptekaarten Rijntakken RWS ON. Geraadpleegd via webviewer: <https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON> Waterdieptekaarten Rijntakken. Webviewer.
- Koolstra, F.J. (2020a): Suppletie Boven-Rijn. Deel I: Rapportage data en inwinning.
- Koolstra, F.J. (2020b): Suppletie Boven-Rijn Deel II: Rapportage analyse en interpretatie.
- Lokin, L. & Barneveld, H.J. (2019): Morfologische en rivierkundige analyses Suppleties Bovenrijn. HKV memo PR3986.10, 25 november 2019.
- Mosselman, E. (2022). Dekking op buisleidingen in rivieren. Rapport 11208033-007, Deltares, Delft, concept augustus 2022.
- 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.
- Tuijnder, A. (2018): Analyse hoogwaterveiligheid sedimentsuppletie Boven-Rijn. Eindrapport. Arcadis, 15 juni 2018.
- Voorend, B. (2019): 763 Sedimentsuppletie Boven-Rijn 2019; Verificatiemethode. Memo Martens en van Oord, 18-09-2019.
- Weijnans, J. (2015): Uitvoeringsplan Sedimentsuppletie Boven-Rijn. Rapport De Vries en Van der Wiel, 5265-SBR-WKP-001-2.0, februari 2015.
- Weijnans, J. (2016): Suppletieadvies. Sedimentsuppletie Boven-Rijn. Rapport De Vries & van de Wiel, kenmerk 5265-SBR-OPL-004_1.0 20160728, 28 juli 2016.

Wilkinson, M.D., M. Dumontier, I.J.J. Aalbersberg; et al. (15 March 2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 3 (1): 160018. doi:10.1038/SDATA.2016.18. ISSN 2052-4463.

A Monitoringsplan

B Overzicht van voor- en nadelen van verschillende opties voor de uitvoering van de suppleties op de Boven-Rijn volgens Weijnans (2016)

Bijlage criterium 1: TOM uitvoeringmethode

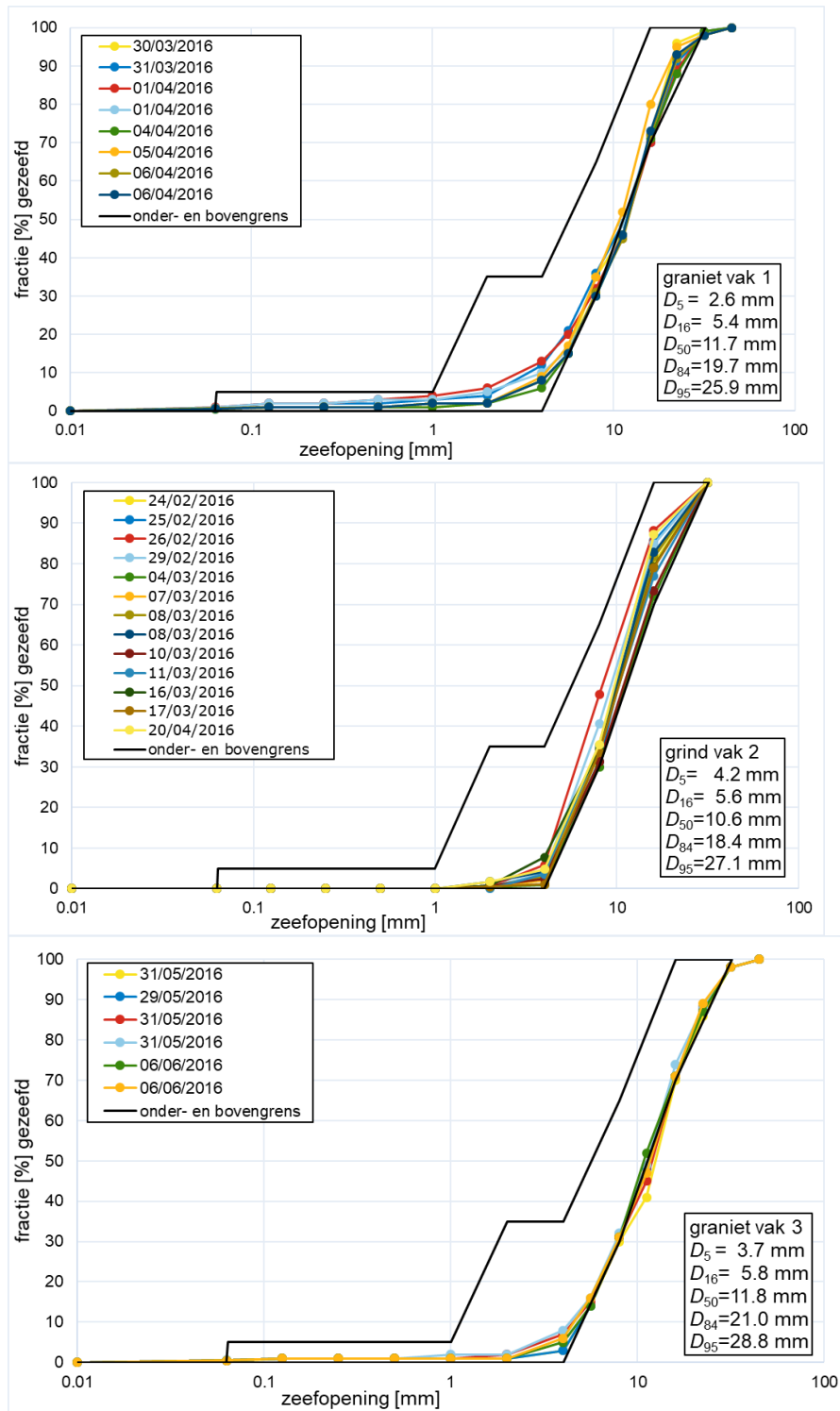
| Uitvoeringmethode | Voordelen | Nadelen | Extra overslag | Plaatsingsnauwkeurigheid | Verkeershinder | Kostenefficiënt | Productiesnelheid | Diepgang mate-riël | Overall score |
|---|---|--|----------------|--------------------------|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------|
| 1. Plaatsing van tracermateriaal uit transportbak direct in het werk met hydraulische kraan vanaf een baggerponton (mechanisch) | <ul style="list-style-type: none"> Geen overslag via een depot nodig Hoge plaatsingsnauwkeurigheid door kraan met Crane Monitoring System uit te rusten Kostenefficiënt Overzichtelijk logistiek proces | <ul style="list-style-type: none"> Verkeershinder in verband met werken op spudpalen (stilstiggend) | + | + | - | + | 0 | + | +3 |
| 2. Aanbrengen tracermateriaal met spuitbak en wanneer nodig uitvallen met behulp van een ploegboot | <ul style="list-style-type: none"> Minimale verkeershinder Hoge productiesnelheid Eenvoudig extra quality control mogelijk | <ul style="list-style-type: none"> Overslag via depot Traag varend tijdens storten | - | 0 | 0 | 0 | + | + | +1 |
| 3. Plaatsing van tracermateriaal uit transportbak direct in het werk met behulp van een grondpers en sproeiopont | <ul style="list-style-type: none"> Geen overslag via een depot nodig Aanbrengen in dunne laagdiktes mogelijk met sproeiopont Hoge plaatsingsnauwkeurigheid door verhalen sproeiopont op ankerpatroon | <ul style="list-style-type: none"> Niet kostenefficiënt (extra units benodigd) Verkeershinder door ankerpatroon sproeiopont (stilstiggend) Complex logistiek proces | + | + | -- | - | 0 | + | 0 |
| 4. Aanbrengen tracermateriaal met een zijstorter (Stone Dumping Vessel) | <ul style="list-style-type: none"> Zelf varend Hoge productiesnelheid | <ul style="list-style-type: none"> Diepgang en breedtebeperking Niet kostenefficiënt Vastlopen van schuiven door fijne grade-ring Traag varend tijdens storten Overslag via depot | - | 0 | 0 | - | - | - | -2 |
| 5. Aanbrengen tracermateriaal met een kleine hopperzuiger (terugstorten door de zuigbuis) | <ul style="list-style-type: none"> Zelf varend Minimale verkeershinder Hoge productiesnelheid | <ul style="list-style-type: none"> Diepgang en breedtebeperking Aanpassing nodig aan leidingplan hopper Positionering en dosering Brugvorming tracermateriaal in beun van hopper (onvoldoende jetwater om tracermateriaal in suspensie te krijgen) Overslag via depot Traag varend tijdens storten | - | 0 | 0 | - | + | - | -2 |
| 6. Aanbrengen tracermateriaal vanaf een zelfvarend kraanschip via een stortkoker | <ul style="list-style-type: none"> Zelf varend Hoge plaatsingsnauwkeurigheid | <ul style="list-style-type: none"> Overslag via depot Zeer traag varend tot stilstiggend tijdens storten Niet kosten efficiënt (extra units nodig) | - | + | - | - | - | + | -2 |

Een korte evaluatie van de niet gekozen uitvoeringsmethoden:

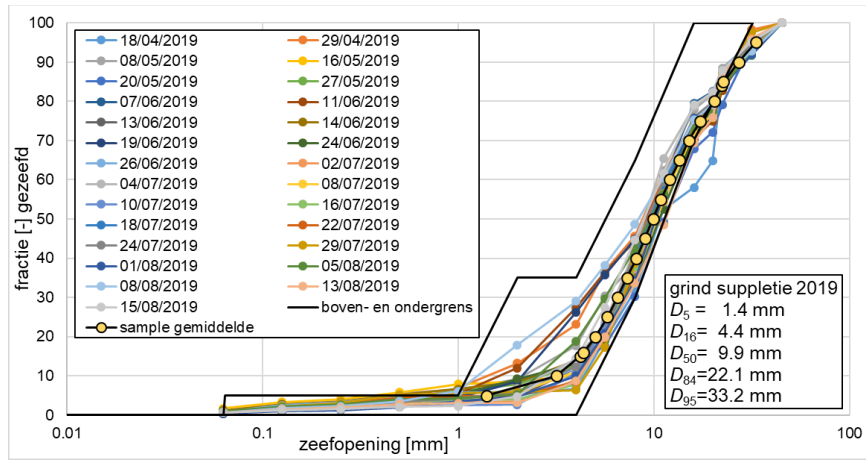
- Plaatsing van tracer materiaal uit transportbak direct in het werk met hydraulische kraan vanaf een baggerponton (mechanisch)
Dit blijft nog steeds één van de meest voor de hand liggende uitvoeringsmethoden. Het lossen direct vanuit het schip op de juiste locatie scheelt meerdere handelingen ten opzichte van het overslaan in slijtbakken. Deze uitvoeringswijze was niet mogelijk omdat dit conflicteerde met de contracteisen. Omdat er in het werkgebied ankerplaatsen aanwezig zijn waar schepen/bakken (ook 's nachts) mogen liggen is er voor de scheepvaart geen extra hinder ten opzichte van de normale situatie. ON had het kraanponton 's avonds kunnen verplaatsen naar de vluchthaven of een kribvak.
- Plaatsing van tracer materiaal uit transportbak direct in het werk met behulp van een grondpers en sproei-ponton
Deze uitvoeringswijze was niet mogelijk omdat het stationaire sproei-ponton conflicteert met de gestelde contracteisen betreffende de hinder. Daarnaast blijft het hydraulisch transporteren van het relatief grove mengsel een uitdaging.
- Aanbrengen tracer materiaal met een zijstorter (Side Stone Dumping Vessel)
Een zijsteenstorter is een groot schip met een relatief grote diepgang. Dit had voor problemen kunnen zorgen bij een lage waterstand. Daarnaast is een zijstorter niet kostenefficiënt voor een relatief klein project op het binnenwater. Zijstorters worden normaliter 168 uur per week ingezet, dit is in conflict met het verbod op werken na zonsondergang en op zon- en feestdagen. Ook zijn de bewegingen van de zijstorter tijdens het storten traag ten opzichte van de omringende scheepvaart. Daarnaast is het vastlopen van de schuiven door de relatief fijne gradering (voor een zijstorter) een risico.
- Aanbrengen tracer materiaal met een kleine hopperzuiger (terugstorten door de zuigbuis)
Deze uitvoeringswijze behoeft aanpassingen aan het leidingplan van de hopper. Daarna is het nog maar de vraag of er voldoende jetvermogen is om het relatief grove mengsel in suspensie te brengen en hydraulisch te transporteren. Daarnaast zorgt het grove mengsel voor veel slijtage aan de pomp en leidingen en is het de vraag of het geheel kosten efficiënt is.
- Aanbrengen tracer materiaal vanaf een zelfvarend kraanschip via een stortkoker
Lastige uitvoeringsmethode waarbij stationair liggen (op palen en/of ankers) op de rivier niet is uit te sluiten. Daarnaast moet het kraanschip eerst worden aangepast wat het minder kostenefficiënt maakt.

C Samenstelling van de suppleties

C.1 Eerste suppletie 2016



C.2 Tweede suppletie 2019



D Analyse modelfout overlaten

D.1 Inleiding

Binnen een studie gebruikmakend van het DVR-model (delft3d_4-rijn-2021-v1) is geconstateerd dat het gebruikt keyword voor overlaten niet juist was. In plaats van “Fil2dw” was het keyword “Fil2dwr” opgenomen. Hierdoor werden de overlaten niet aangesloten in het model. Dezelfde fout zat ook al in de modelversie die voor de suppleties op de Boven-Rijn is gebruikt (delft3d_4-rijn-2017-v1). Dit memo gaat in op de gevolgen van deze fout op de studies over de suppleties op de Boven-Rijn.

D.2 Projecten

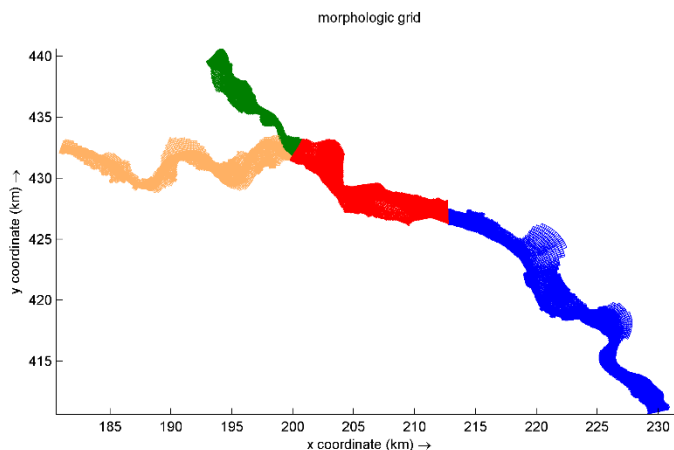
Het model delft3d_4-rijn-2017-v1 is gebruikt voor de volgende studies:

- Tussenevaluatie eerste suppletie Boven-Rijn + advies voor de uitvoering van de tweede suppletie (2017)
- Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn (2023)

D.3 Kenmerken model

Het model delft3d_4-rijn-2017-v1 is afgeleid van het DVR-model uit 2015 (Ottevanger, Giri & Sloff, Sustainable Fairway Rhinedelta II: Effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta program and training walls, 2015). De volgende wijzigingen t.o.v. dat model zijn relevant:

- De zomerbedbodem is vervangen door die uit baseline-rijn-j16_5-v1, welke is gebaseerd op peilingen van november 2015.
- Het model is ingekort naar 4 domeinen en dekt de Boven-Rijn (br0 en br2), de Waal tot rkm 891,8 (wl2a) en het Pannerdensch Kanaal (pk2) (Figuur 28).
- Op de benedenranden (IJsselkop en rkm 891,8) zijn vaste waterstanden opgelegd (per afvoerniveau een andere waterstand). Deze zijn uit het grote model uit 2015 gehaald. In dat model zaten wel overlaten, de overlatenfout zit dus niet in de gebruikte randvoorwaarden. De afvoerverdeling is met deze randvoorwaarden niet vrij. De waterstanden op de randen wijken voor afvoerniveaus tussen 3.600 en 6.200 m³/s af van de waterstanden die met het 1D-model in Sobek3, j19_5, worden berekend (30-40 cm lager in het DVR-model). Dat wijst er op dat het (hele) DVR-model toe is aan een herkalibratie. Bij de start van de eindevaluatie van de suppleties is dit geaccepteerd.
- Tijdens gebruik van dit model in een later project bleek dat de Pannerdensch Overlaat niet volledig in het model zit (alleen de drempel in de bodem maar niet de schotjes). Dit is bij start van de eindevaluatie geaccepteerd, omdat het naar verwachting geen noemenswaardige invloed op het effect van de suppleties heeft.
- De actievelaagdikte is gekoppeld aan de waterdiepte ($D_{act} = \alpha H$, met $\alpha=0,12$, met een minimum van 0,5 m).
- De korrelgrootteverdeling is ingespeeld over een periode van 10 jaar zonder morfologische veranderingen. De tweede inspelstap is het morfologisch inspelen met de ingespeelde korrelgrootteverdeling als invoer. Het model wordt morfologisch ingespeeld over een periode van vijf jaar, waarbij de vaste laag bij Spijk is ingevoerd als niet-erodeerbare laag. De resulterende bodem en korrelgrootte wordt gebruikt als invoer voor alle volgende sommen.



Figuur 28 Overzicht van de deeldomeinen br0 (blauw), br2 (rood), pk2 (groen) en wl2a (oranje).

D.4 Invloed van de overlaten: hydrodynamische berekeningen met vaste bodem

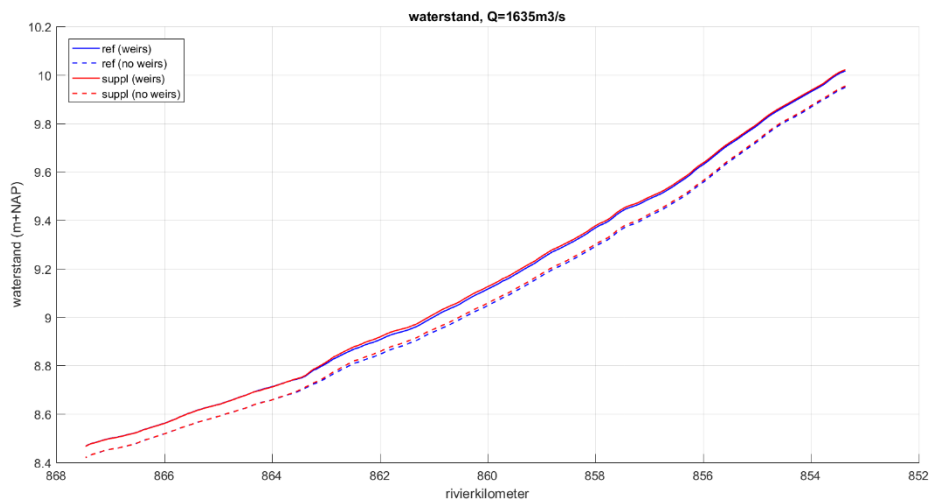
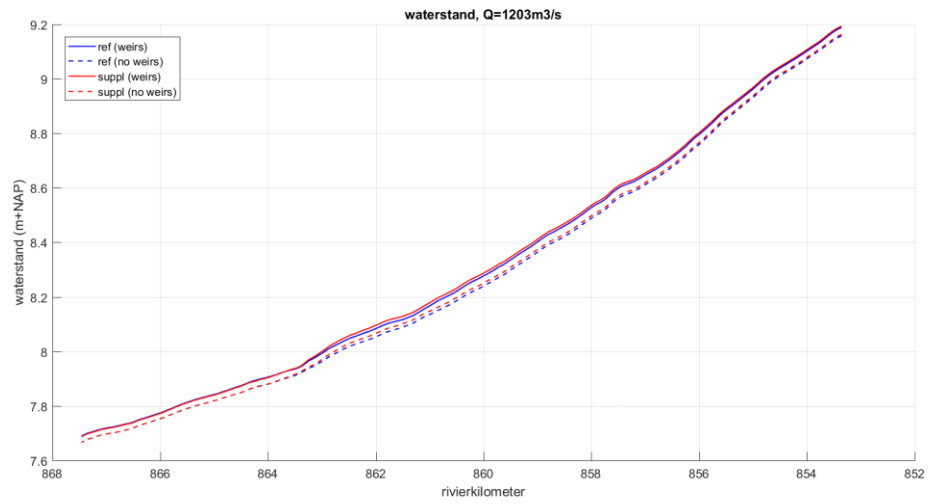
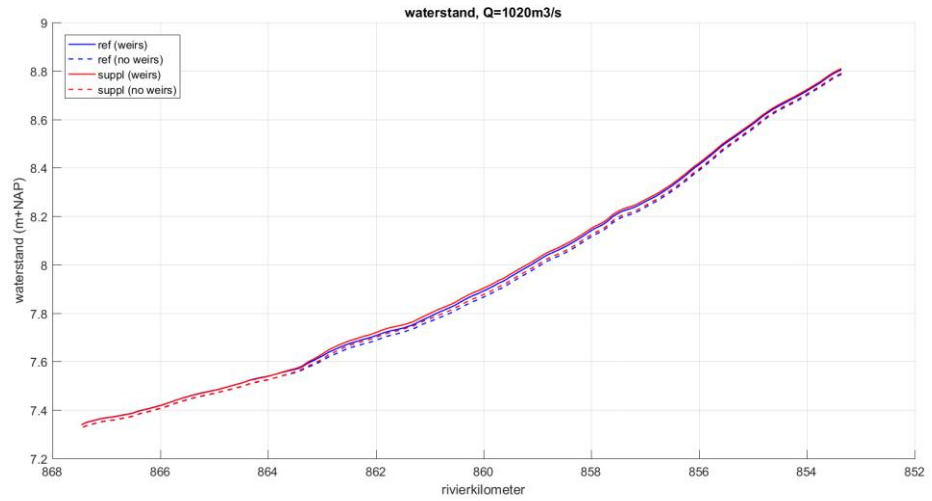
In eerste instantie zijn er berekeningen met vaste bodem uitgevoerd. Uitgangspunt is de startsituatie in de reeds gerapporteerde resultaten van de morfologische berekeningen zonder overlaten. Dat zijn berekeningen met (zonder overlaten) ingespeelde bodemligging, met en zonder supplementies. Er zijn voor alle afvoerniveaus van de standaard afvoerhydrograaf berekeningen uitgevoerd, die voldoende lang zijn om een stationaire toestand te bereiken.

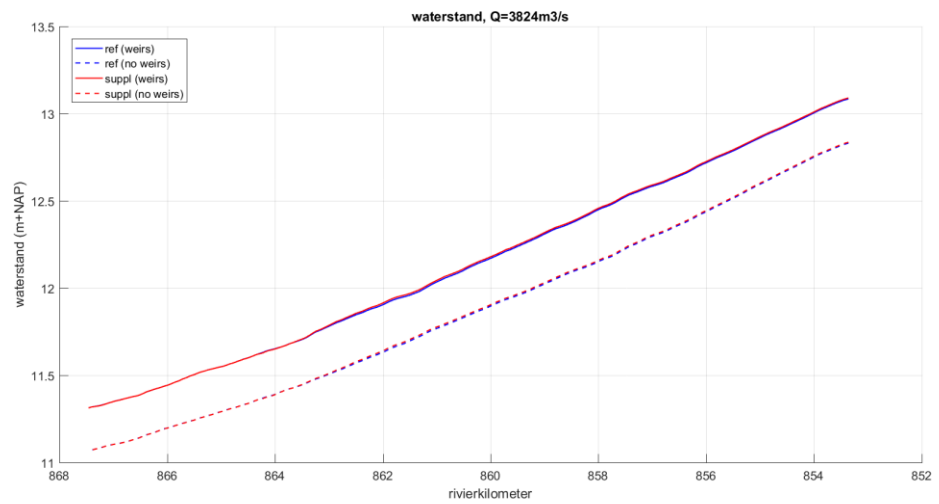
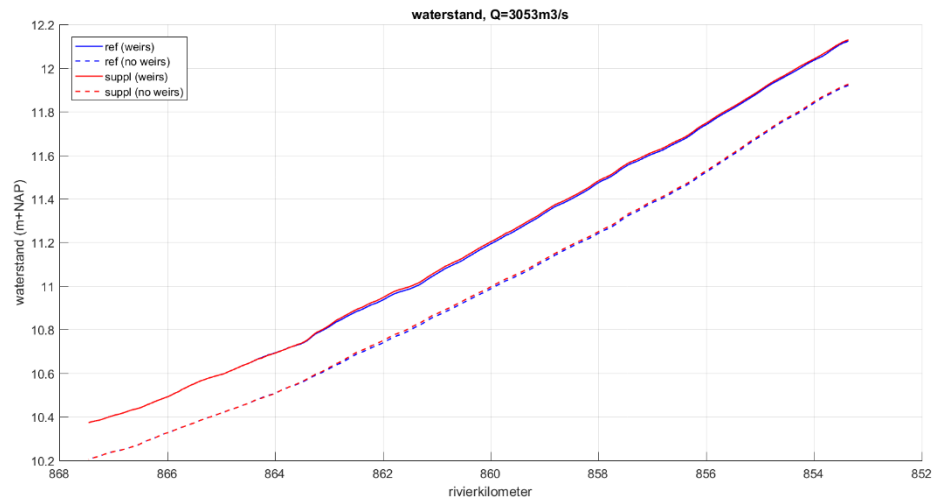
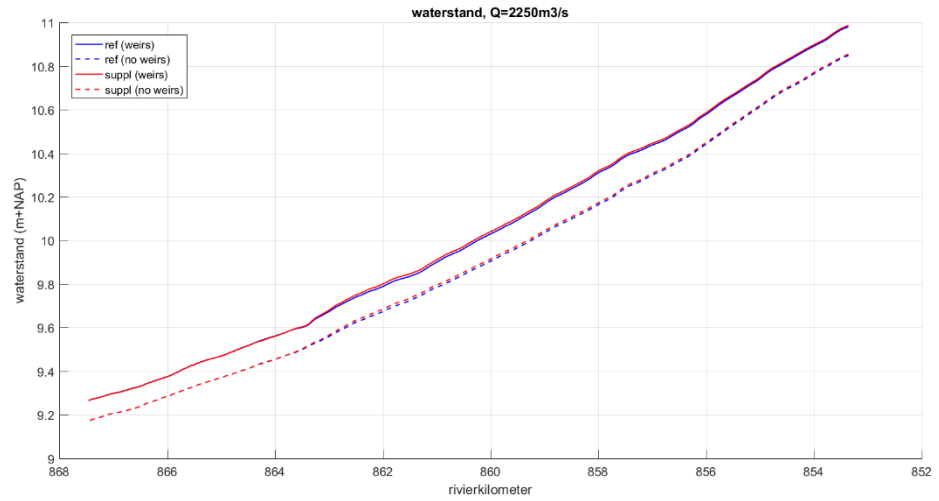
De berekeningen zijn uitgevoerd met en zonder overlaten. De paragrafen hieronder laten de verschillen zien, om de invloed van de overlaten op de hydrodynamica inzichtelijk te maken.

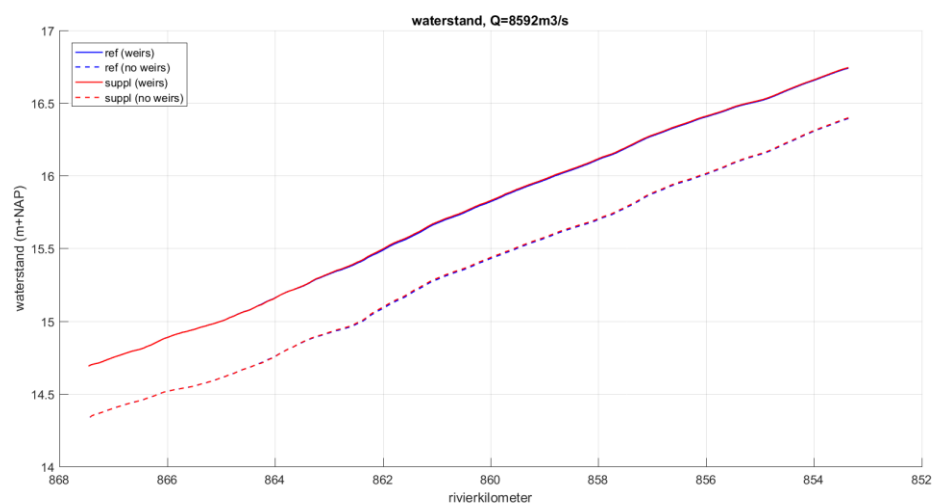
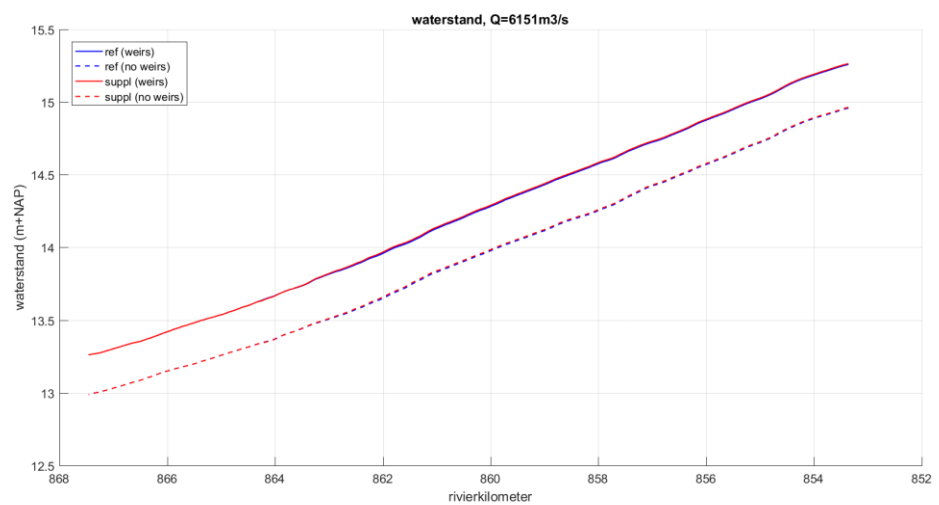
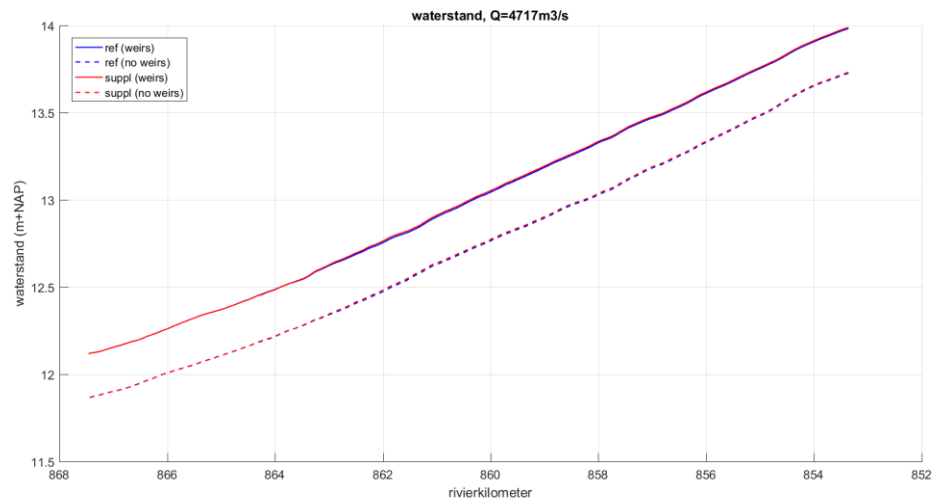
D.4.1 Waterstanden

De volgende figuren tonen het verloop van de absolute waterstanden langs de Boven-Rijn voor alle afvoerniveaus. De overlaten zorgen voornamelijk voor een verschuiving van de waterstanden naar boven en alleen lokaal voor een kleine verandering in verhang. Dat is ook te zien aan de kleine variatie in waterstandsverschil langs de as van de rivier (verder beneden in deze paragraaf).

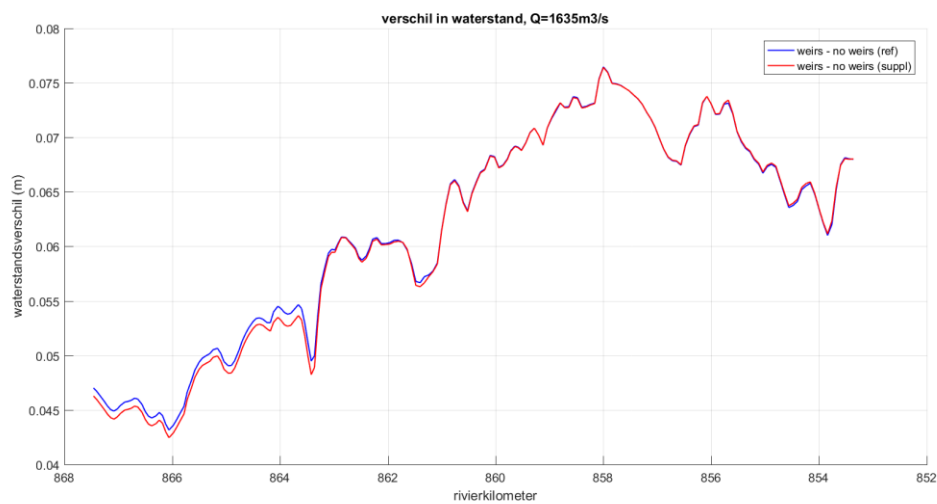
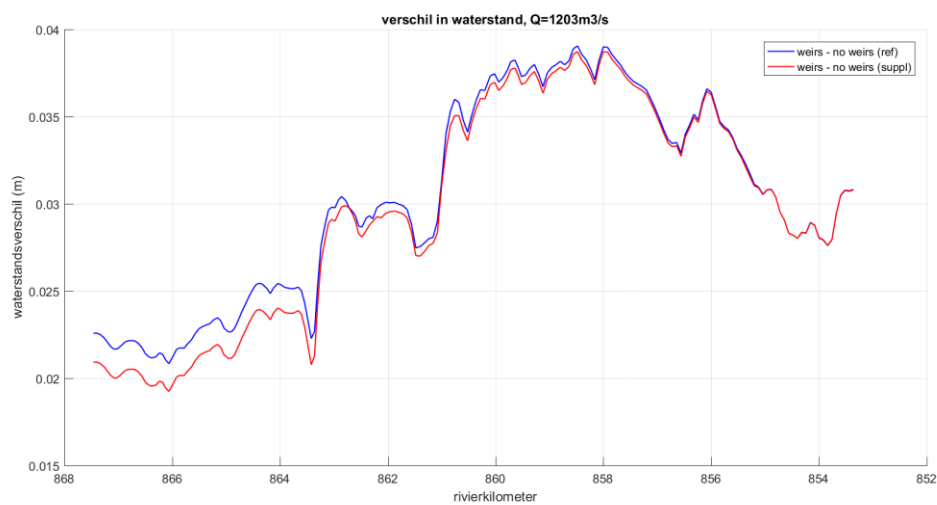
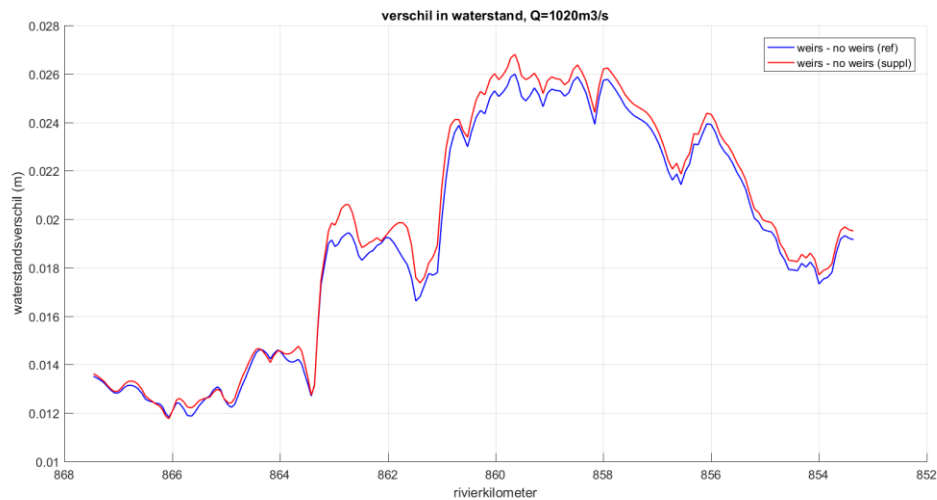
De absolute waterstanden komen met overlaten dus nog hoger uit dan in het model zonder overlaten. Op de Boven-Rijn liggen ze nu dus nog hoger dan de verhanglijnmetingen uit 2016.

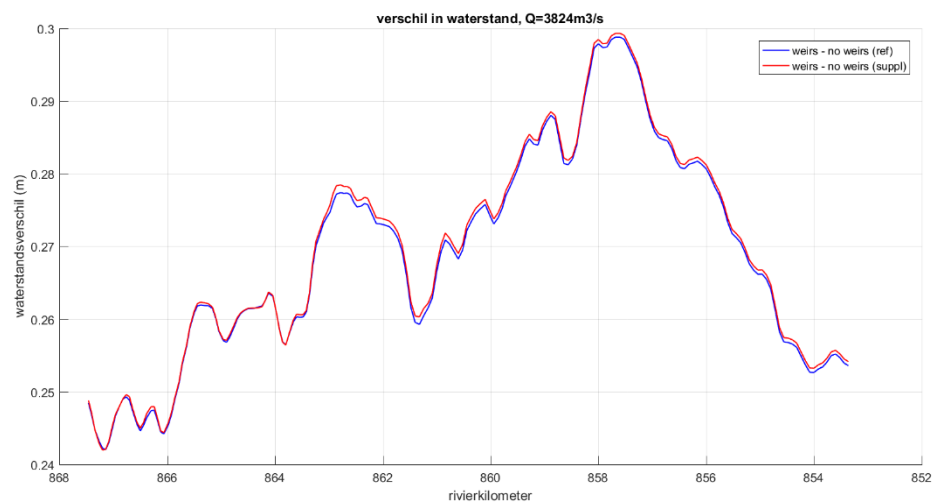
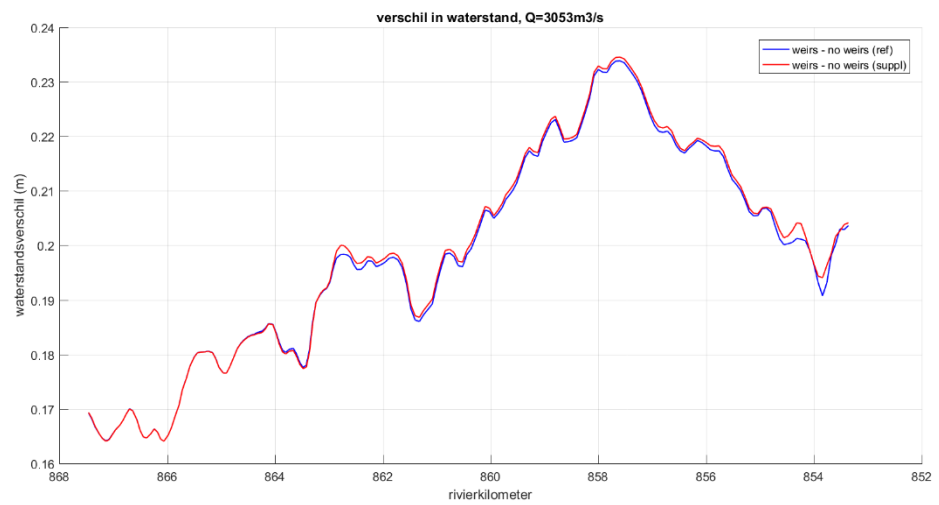
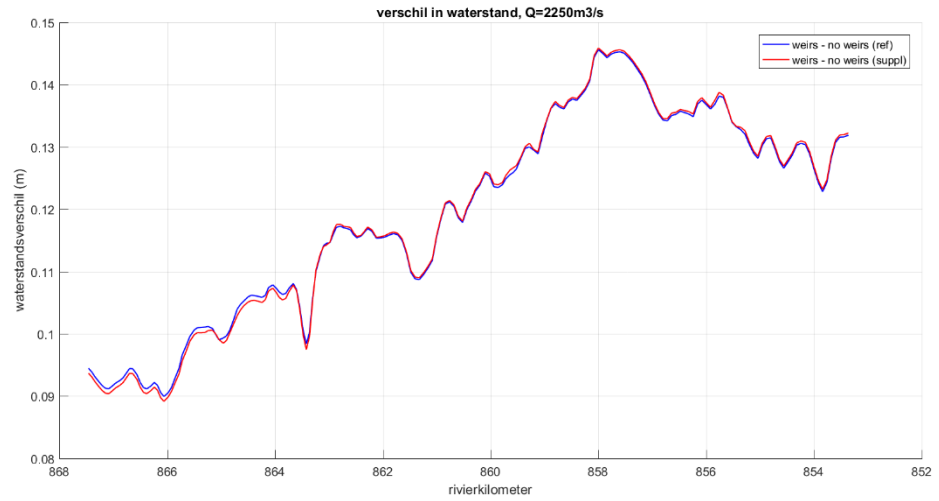


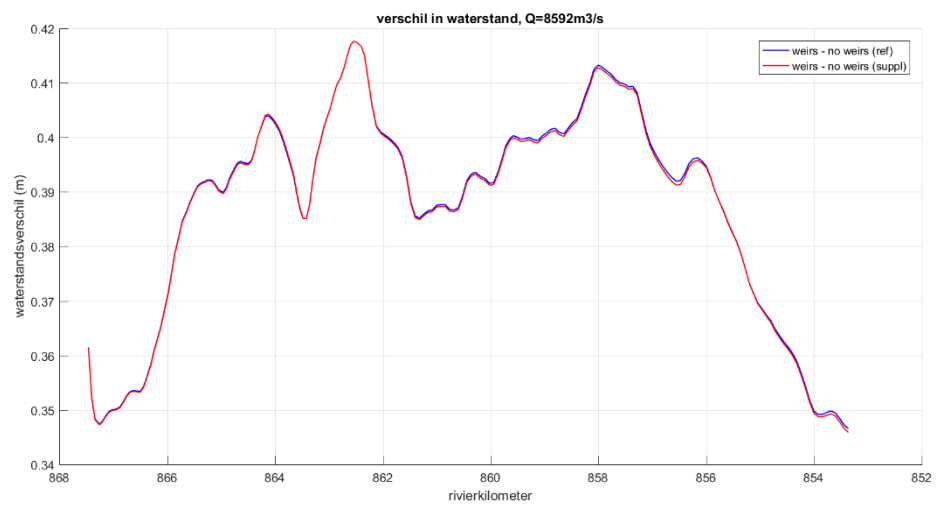
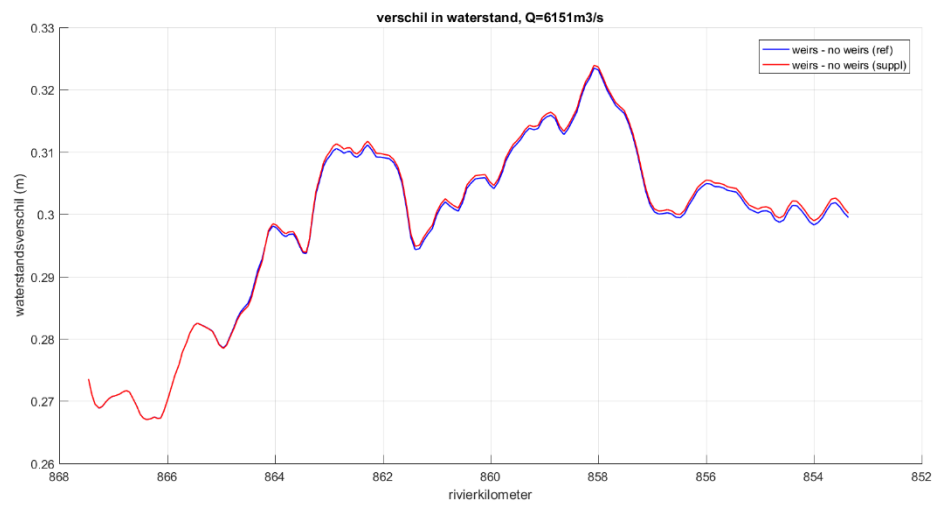
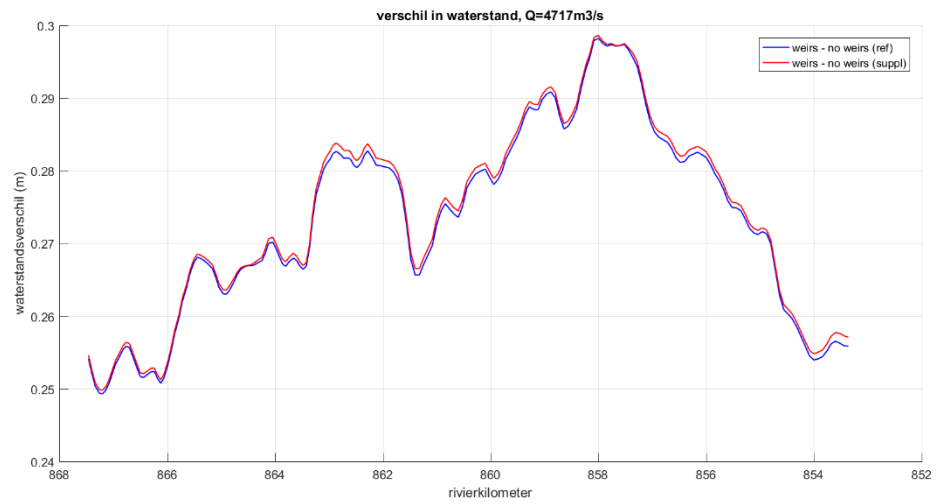




Onderstaande figuren tonen de verschillen in waterstanden op de rivieras tussen de situatie met en zonder overlaten. Zoals verwacht zijn de waterstanden met overlaten hoger. Hoe groter de afvoer, hoe groter het verschil. Bij 1.020 m³/s bij Lobith is het verschil orde 2 cm, bij 8.592 m³/s bij Lobith is het verschil toegenomen tot ongeveer 40 cm.

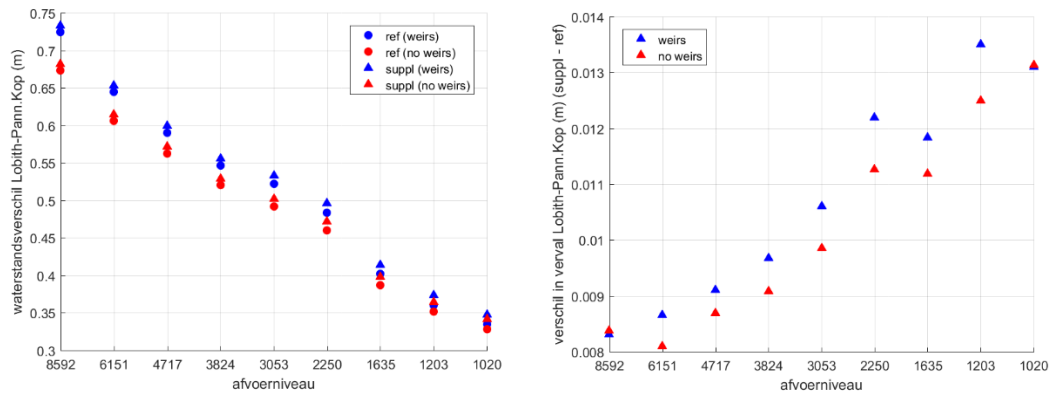






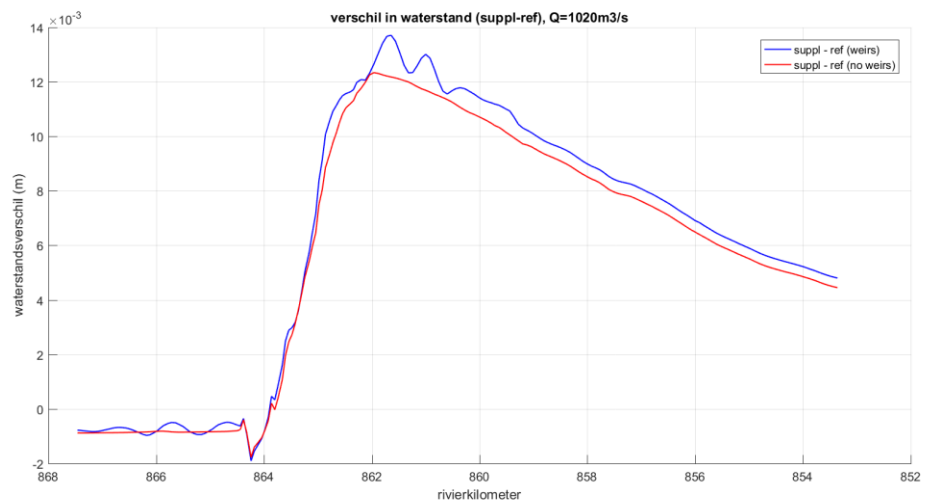
D.4.2 Waterstandsverval tussen Lobith en Pannerdensch Kop

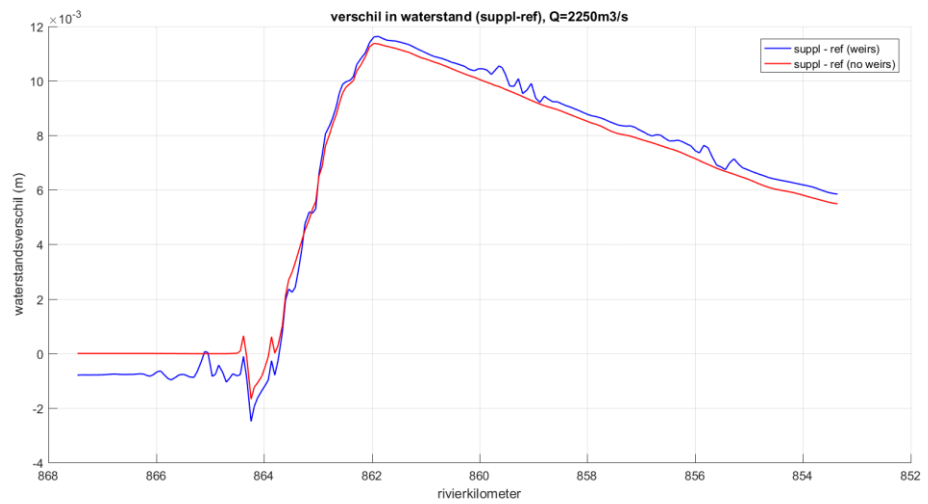
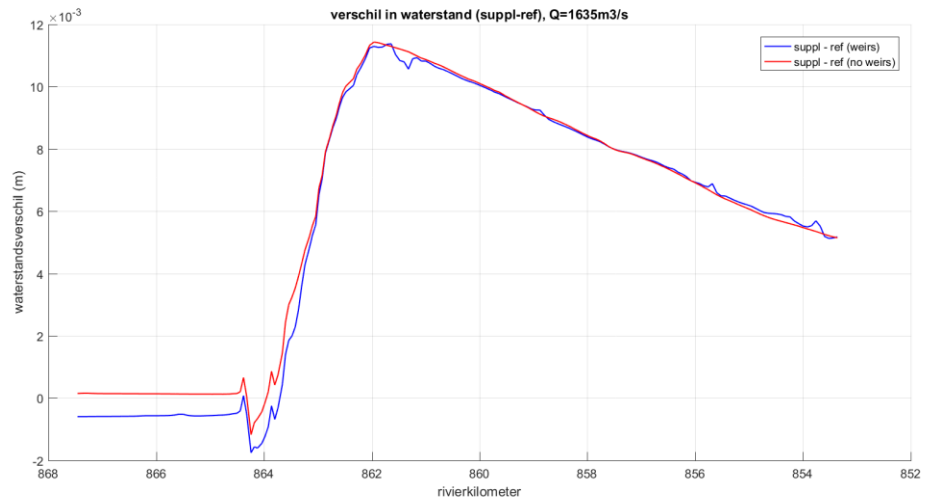
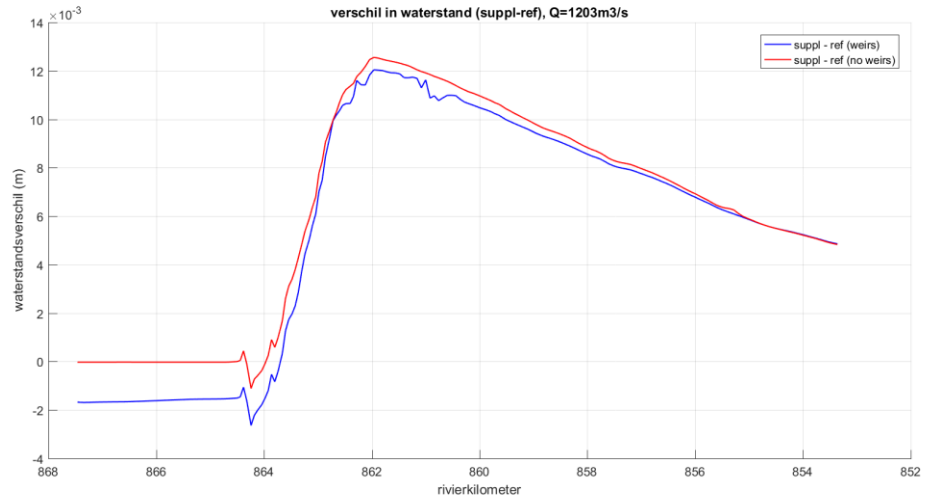
De volgende figuren tonen het waterstandsverschil tussen Lobith en Pannerdensch Kop voor alle afvoerniveaus (links) en het verschil daarvan tussen de situatie met en zonder suppleties. Hieruit wordt duidelijk dat het verval tussen Lobith en Pannerdensch Kop niet sterk verschilt tussen de situaties met en zonder overlaten.

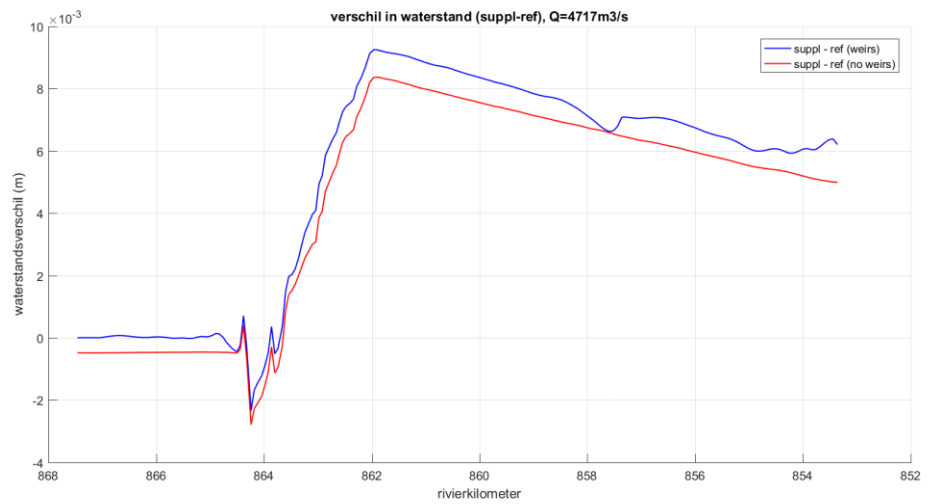
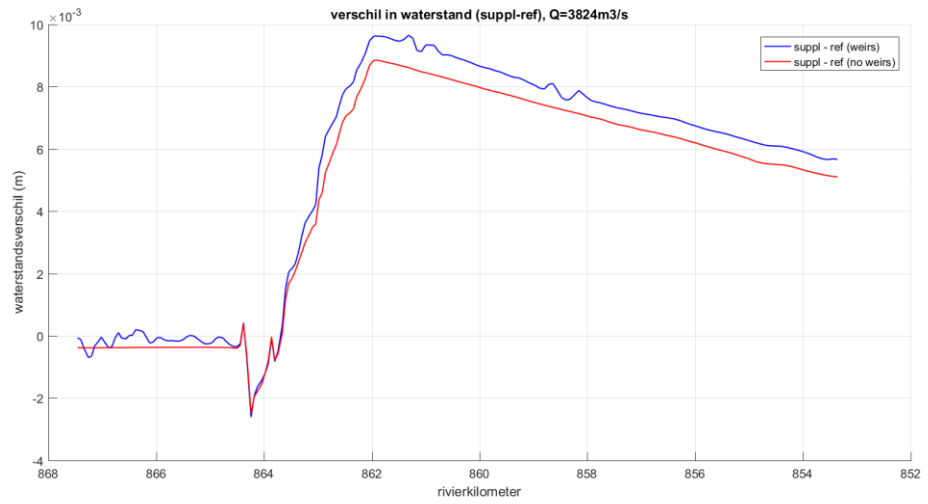
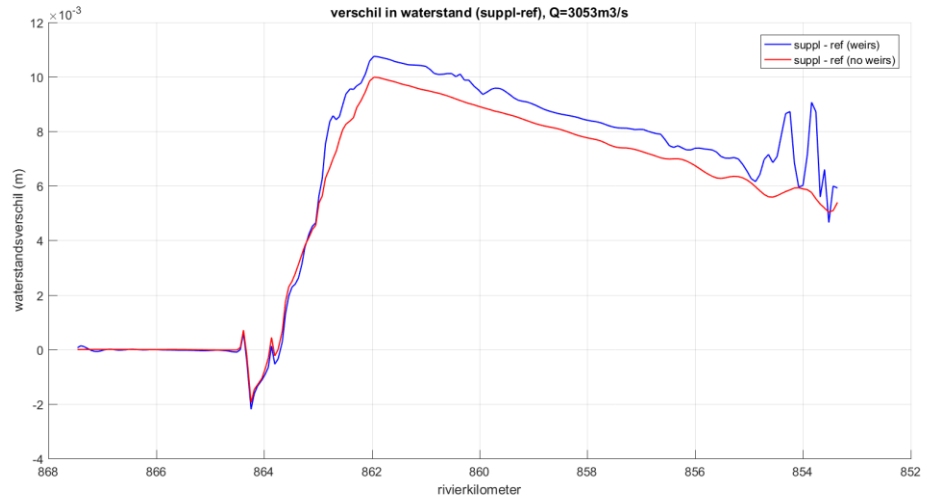


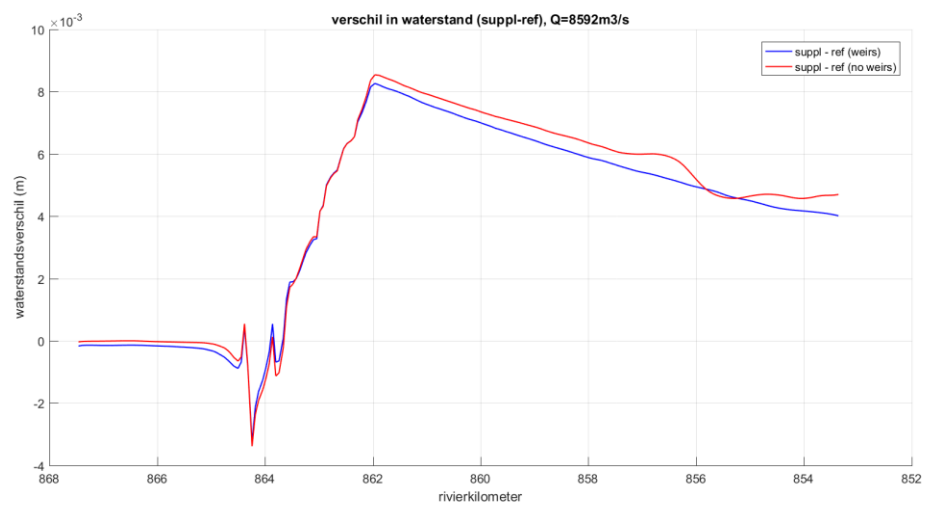
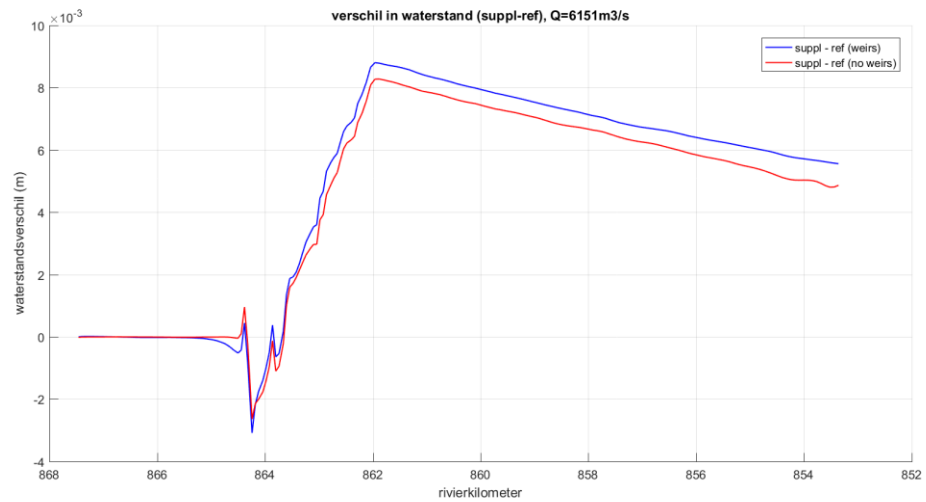
D.4.3 Waterstandsverschillen (suppletie – referentie)

De waterstandsverschillen op de rivieras tussen de situaties met en zonder suppletie verschillen nauwelijks in de modellen met en zonder overlaten (zie volgende figuren), ondanks de verschillen in waterdiepte door de overlaten.









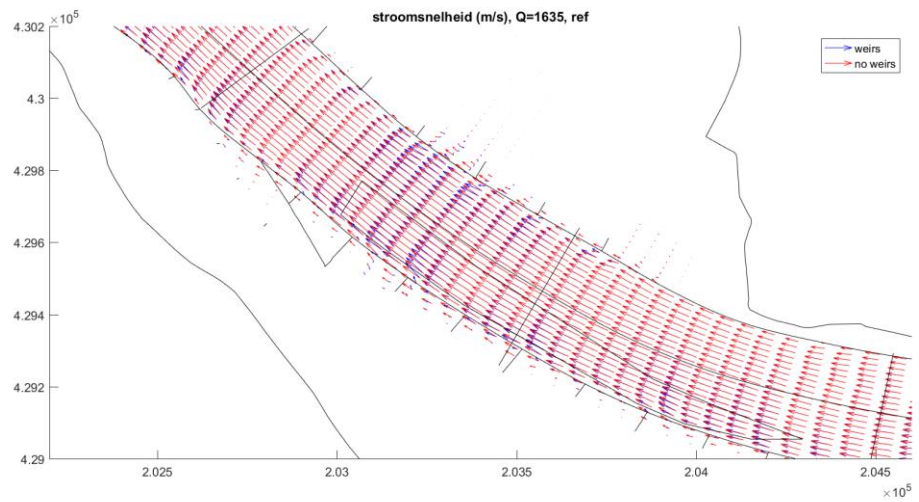
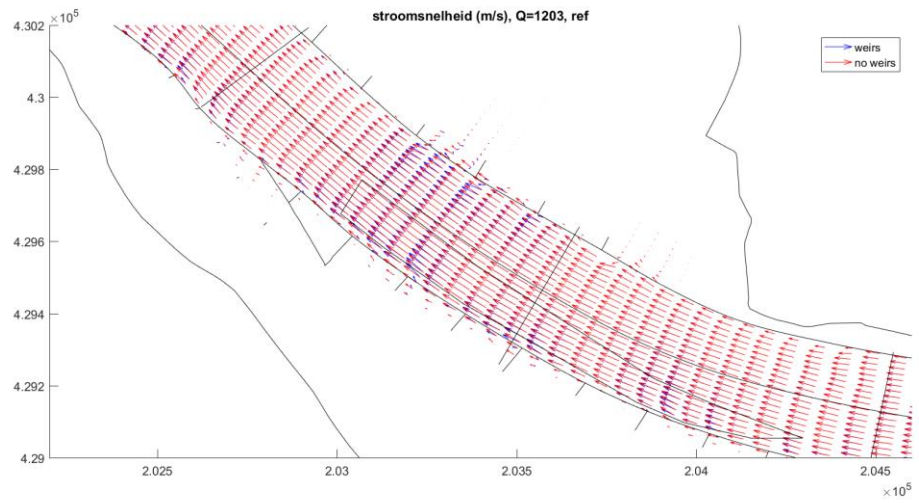
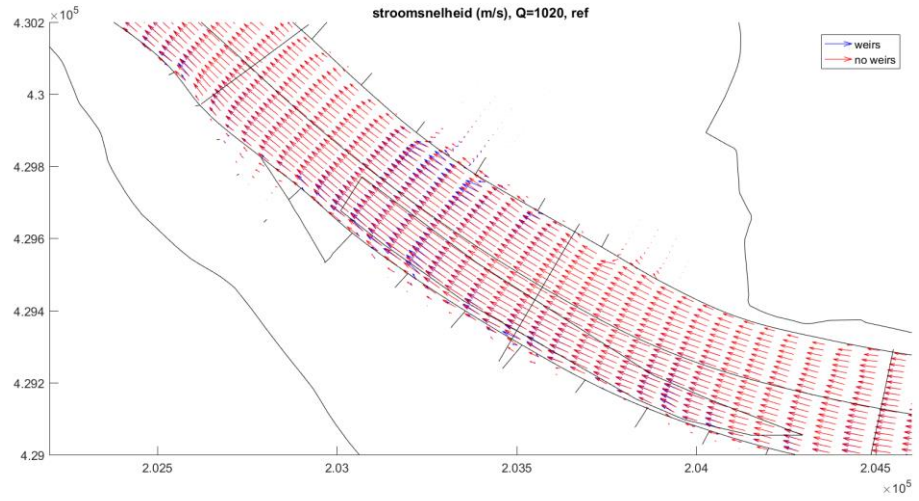
D.4.4 Stroomsnelheden (vectoren)

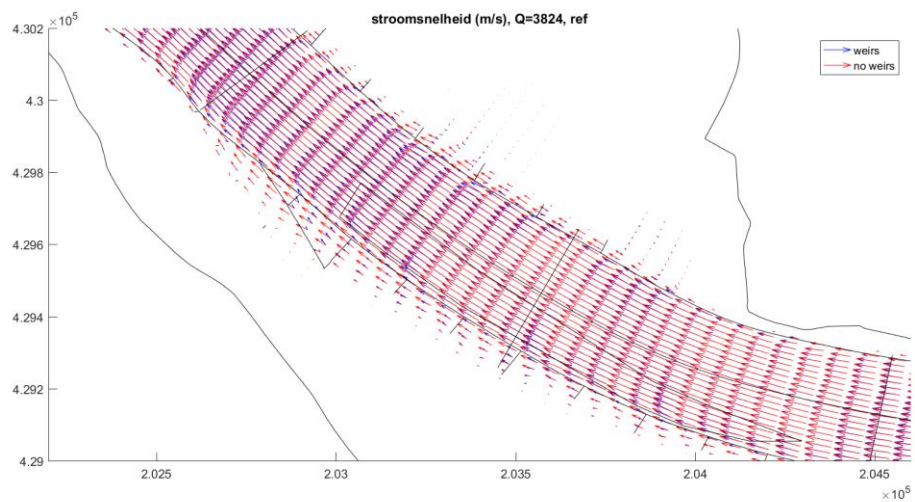
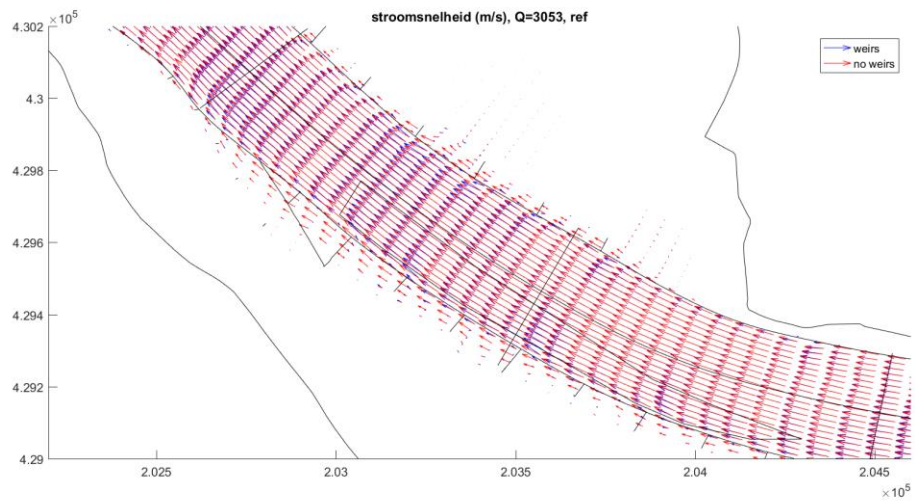
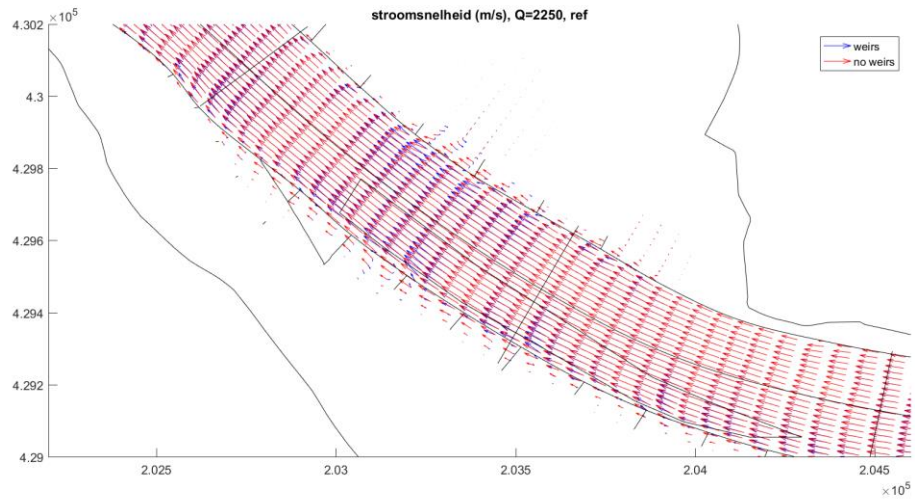
De stroomsnelheden verschillen met name in de kribzone en de uiterwaarden, omdat daar overlaten zitten. Lokaal worden ook de stroomsnelheden in de hoofdgeul beïnvloed door de aanwezigheid van overlaten (richting en absolute waarde), maar de verschillen zijn klein.

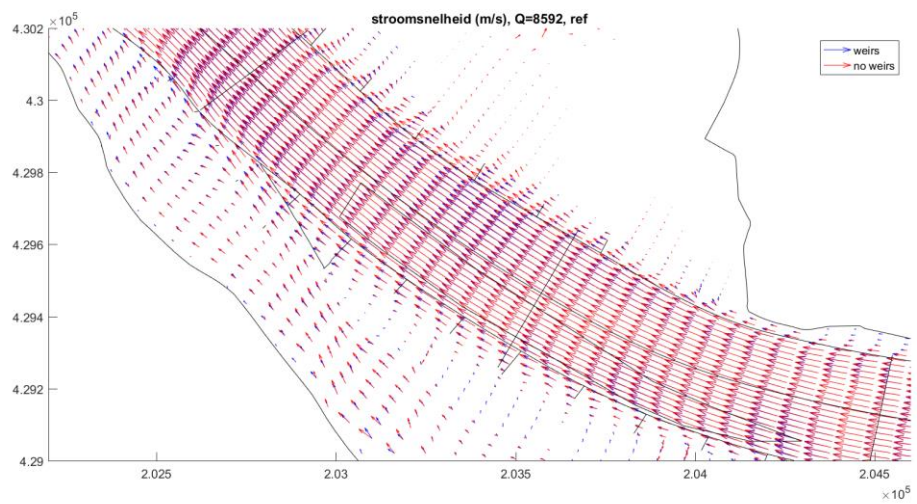
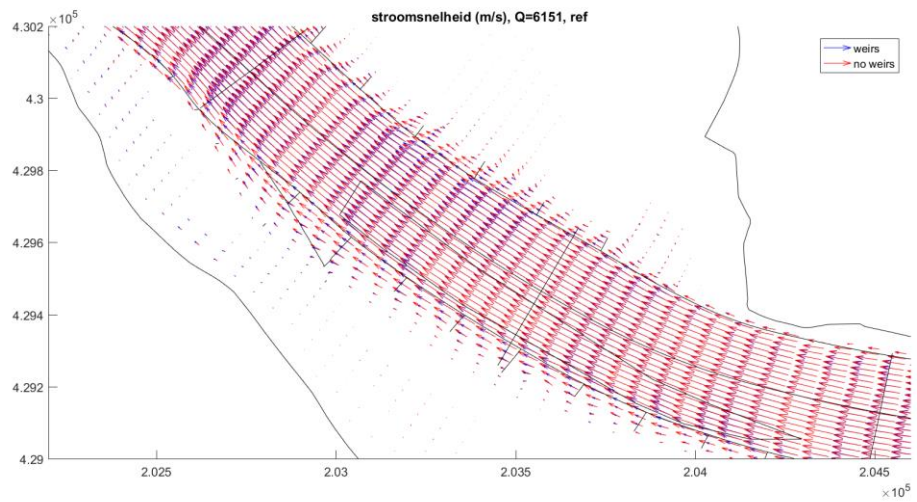
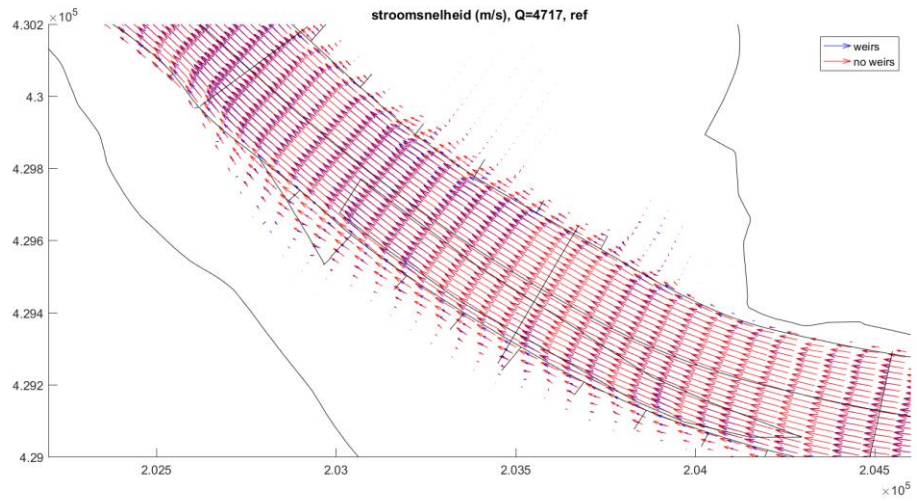
De gemeten stroomsnelheden in de hoofdgeul van de Boven-Rijn waren orde 10% hoger dan de met het foute model berekende snelheden (Niesten et al., 2017). Na correctie van het model (toevoegen van de overlaten) zijn de berekende stroomsnelheden in de Boven-Rijn over het algemeen iets hoger dan gemeten, maar nog steeds is de overeenkomst goed.

Het polygoon in onderstaande figuren is de contour van de tweede suppletie uit 2019.

Referentie

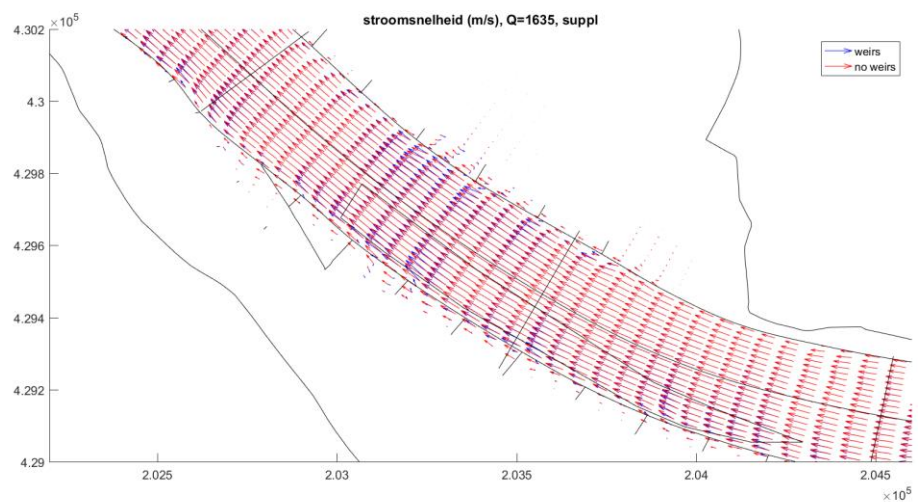
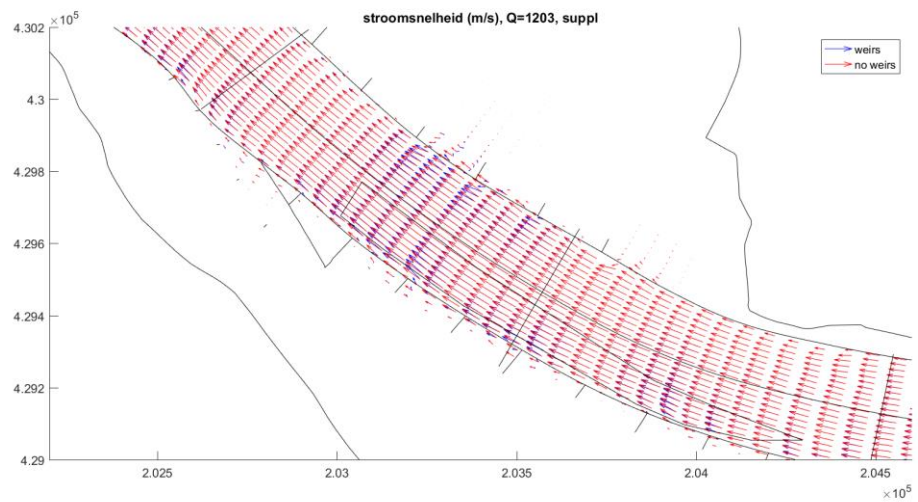
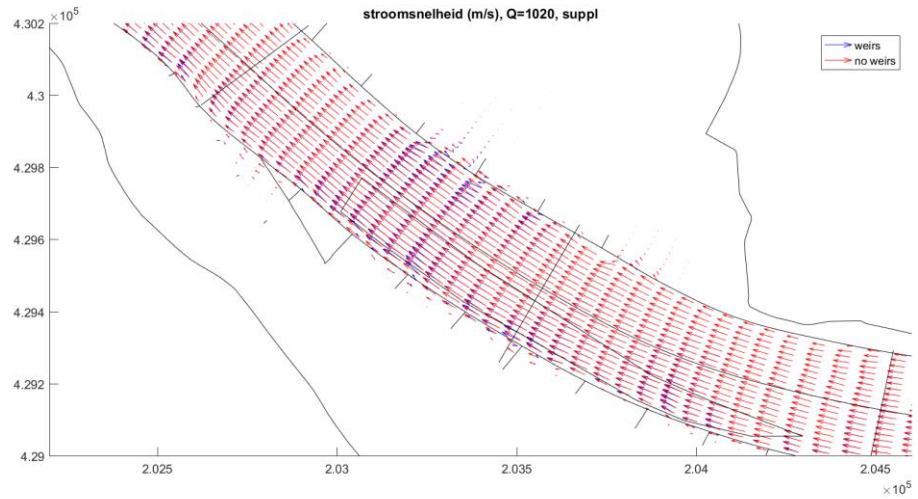


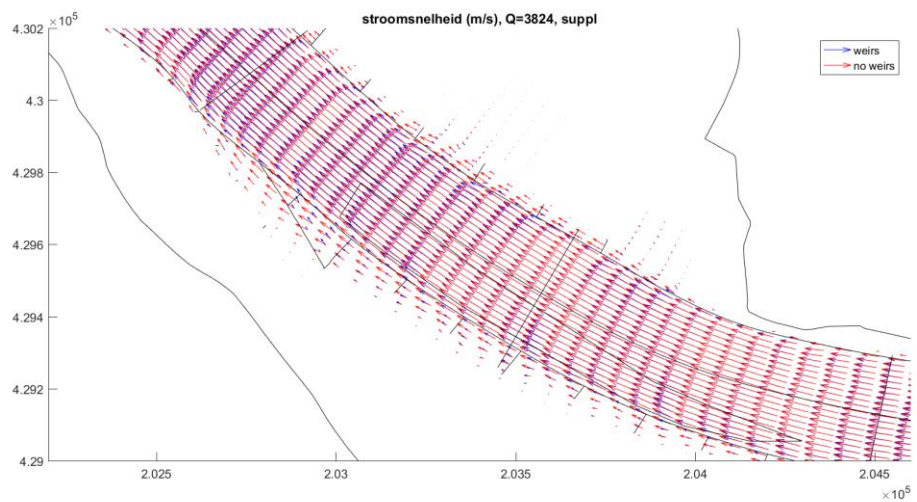
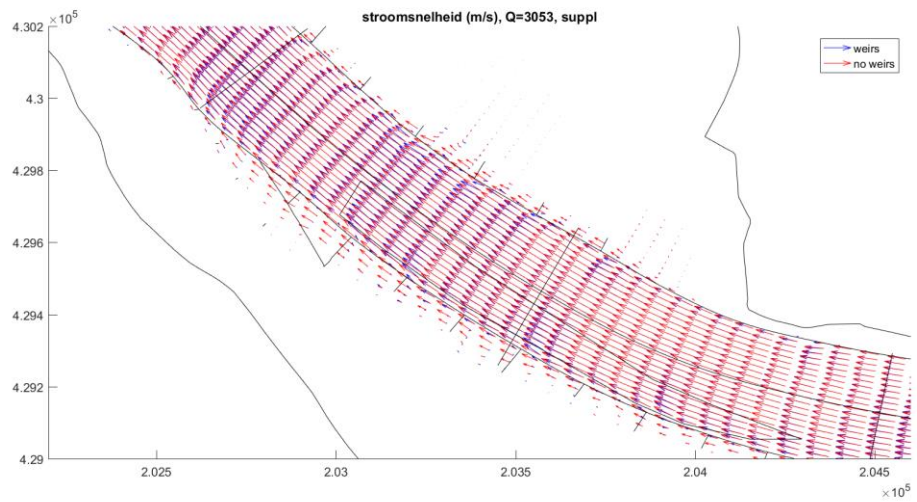
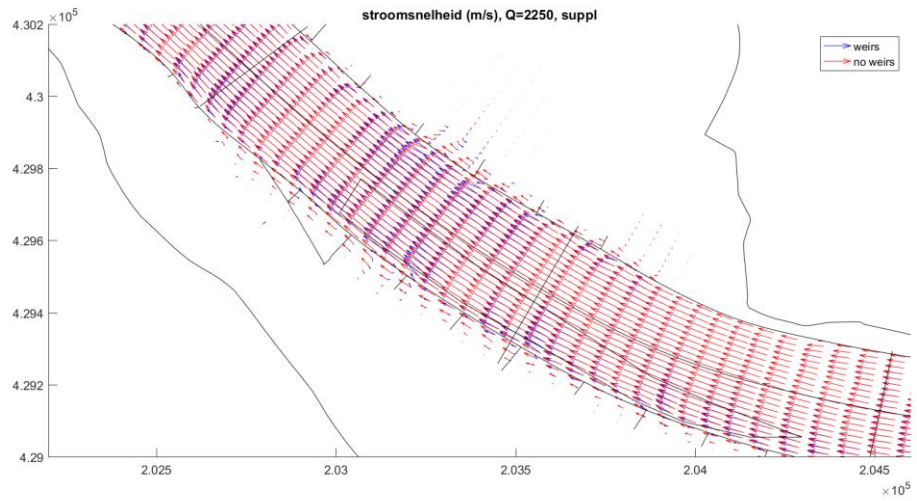


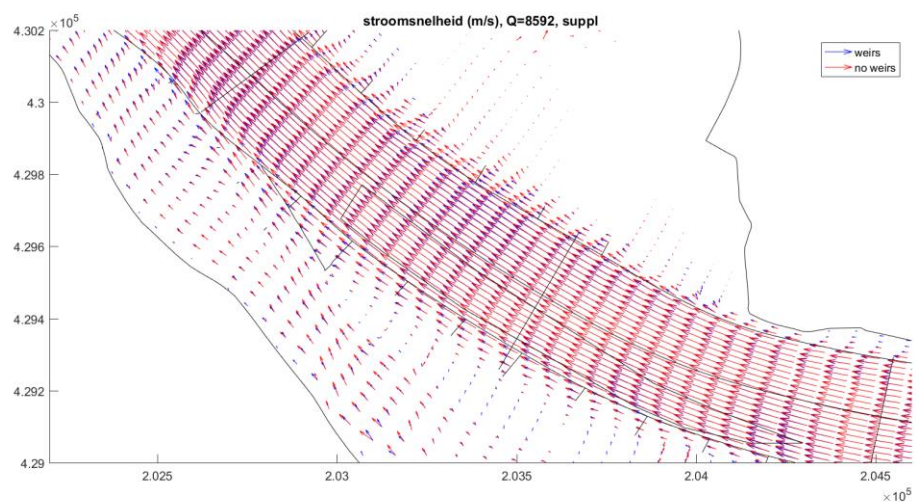
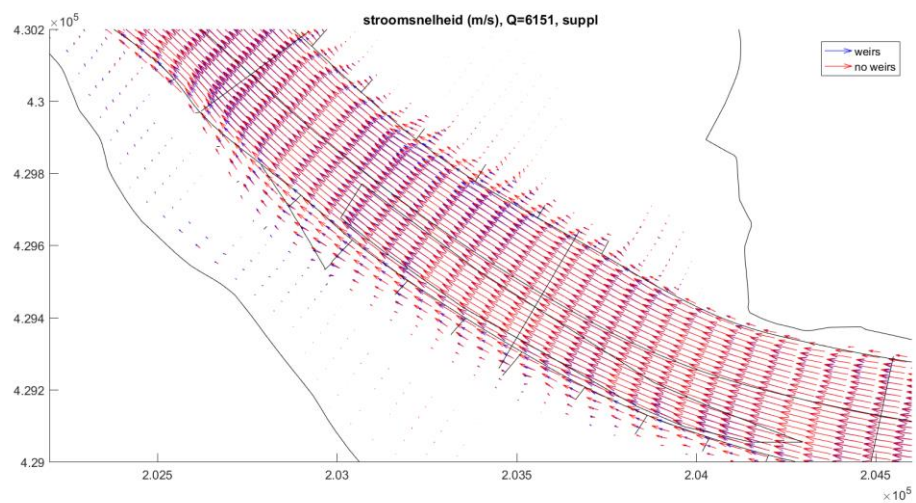
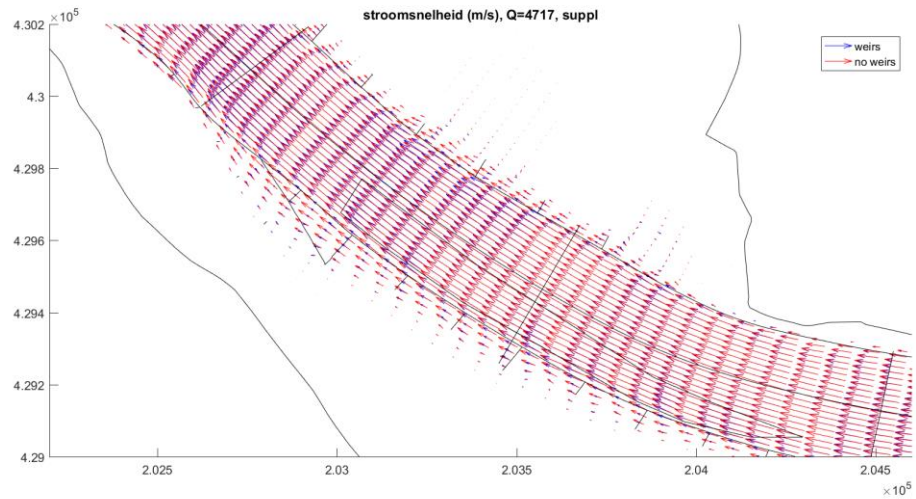


Berekening met suppletie 2016

De snelheidsverschillen in de situatie met suppletie 2016 zijn heel erg vergelijkbaar met de verschillen in de referentiesituatie.





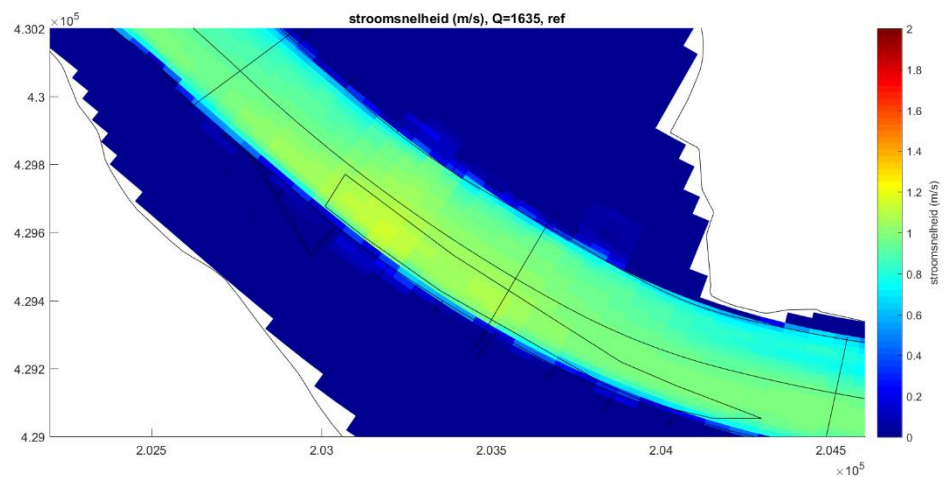
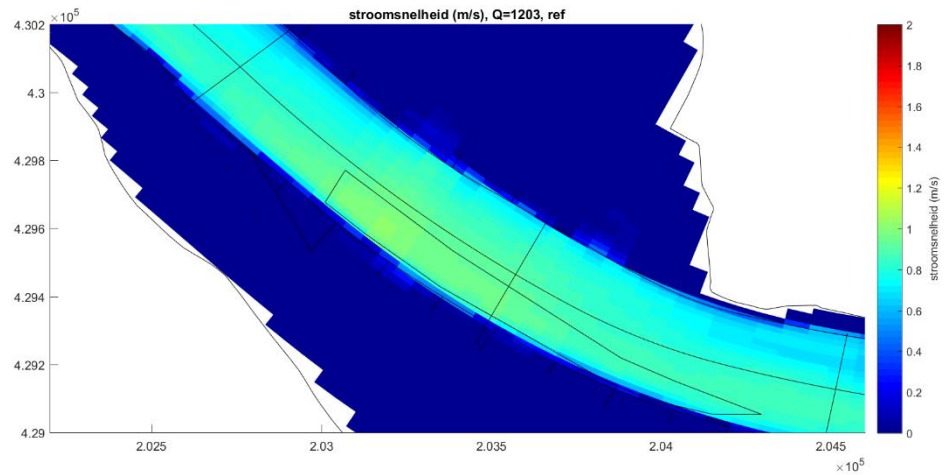
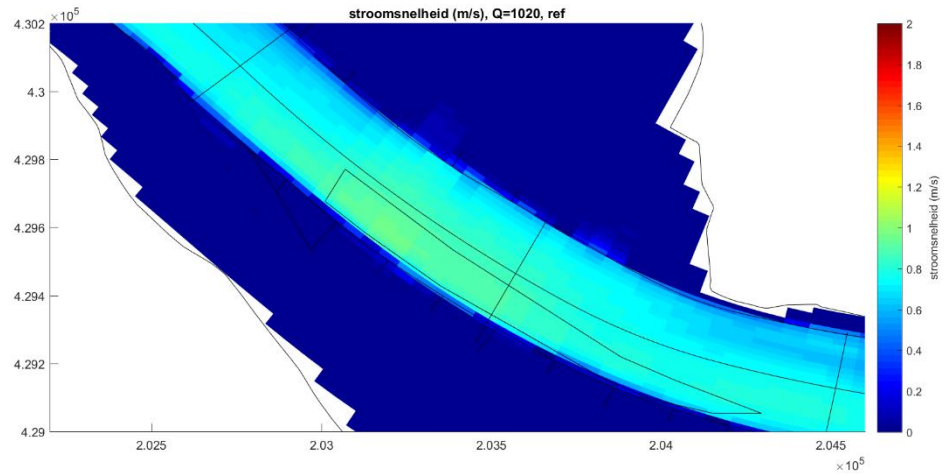


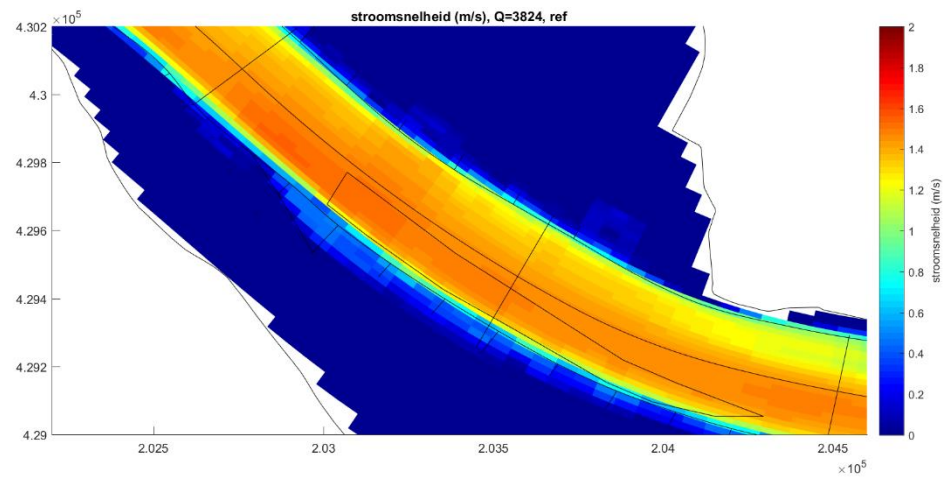
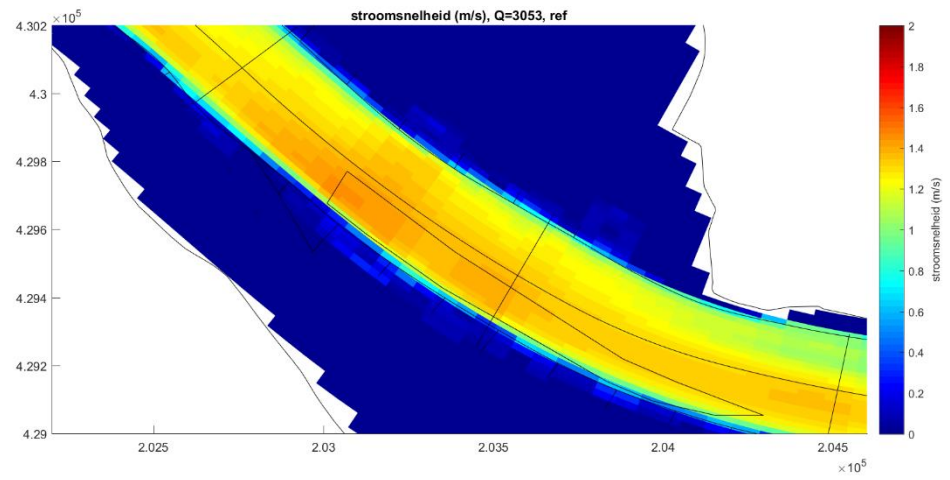
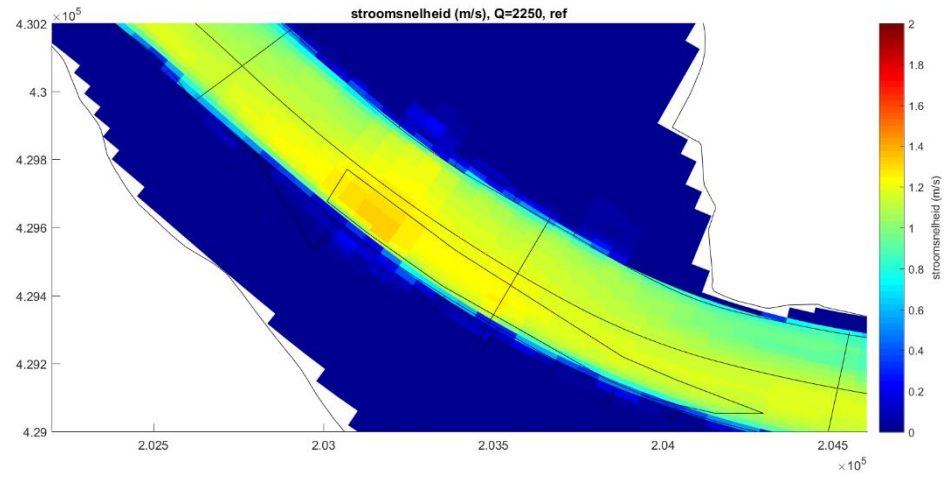
D.4.5 Stroomsnelheden (absolute waarde/magnitude)

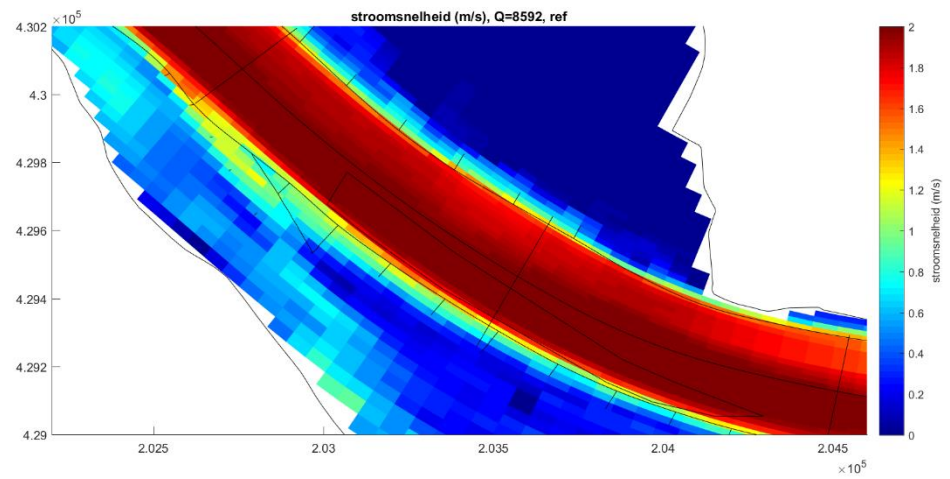
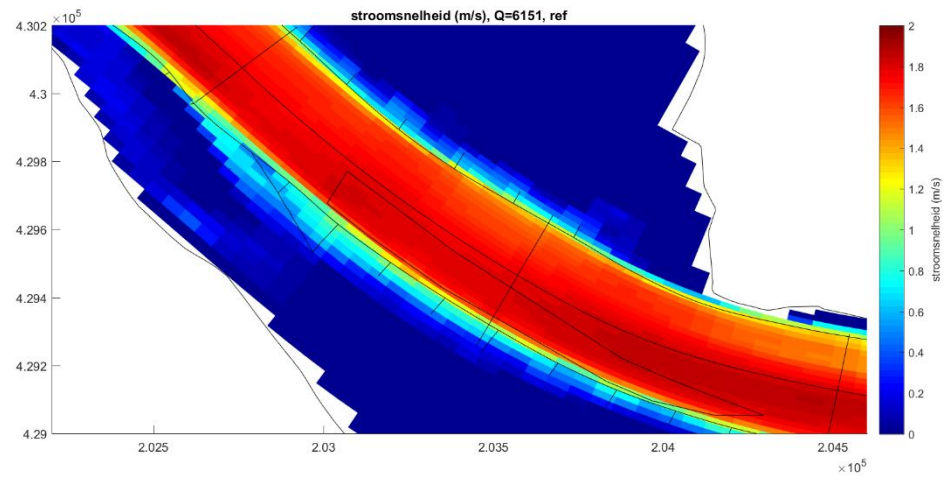
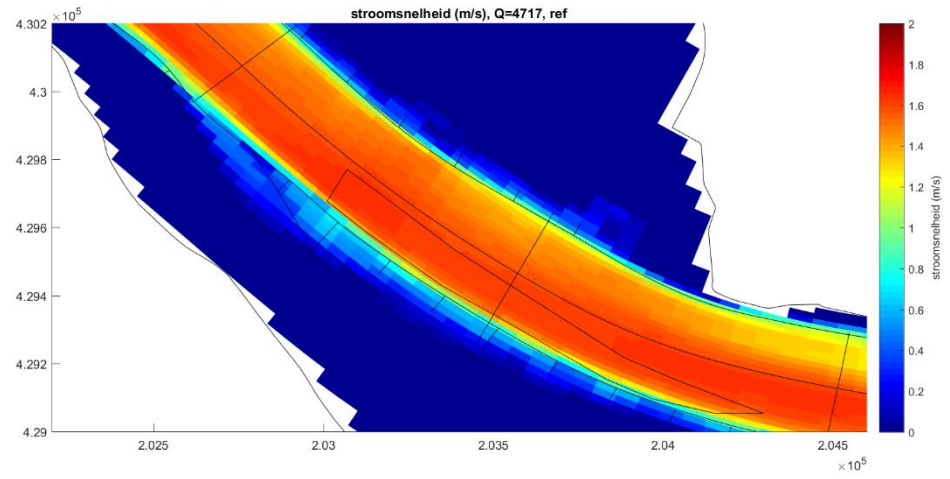
De volgende figuren laten de absolute stroomsnelheden (magnitude) zien voor de situaties met en zonder overlaten (beiden voor de referentiesituatie). De verschillen in stroomsnelheden tussen de berekeningen met en zonder overlaten worden in paragraaf D.4.6 getoond.

Bij OLA liggen de stroomsnelheden in de hoofdgeul tussen 0,6 en 1,0 m/s. Bij de hoogste afvoer (8.592 m³/s) zijn de stroomsnelheden opgelopen tot 1,8 tot meer dan 2,0 m/s. De verschillen in stroomsnelheid in de hoofdgeul variëren tussen 0 en 0,15 m/s.

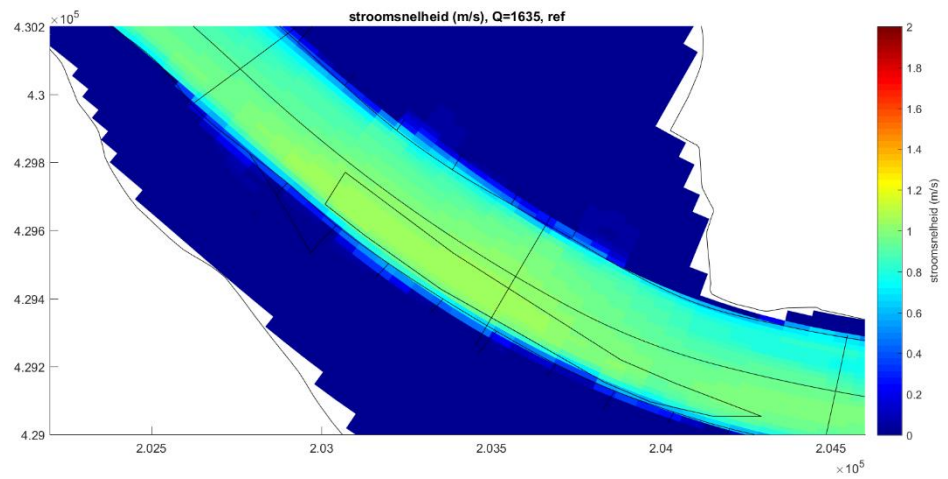
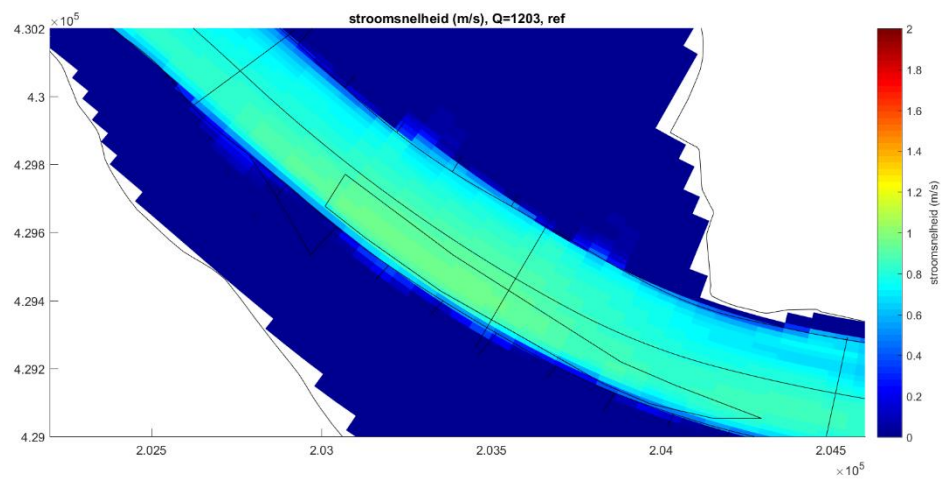
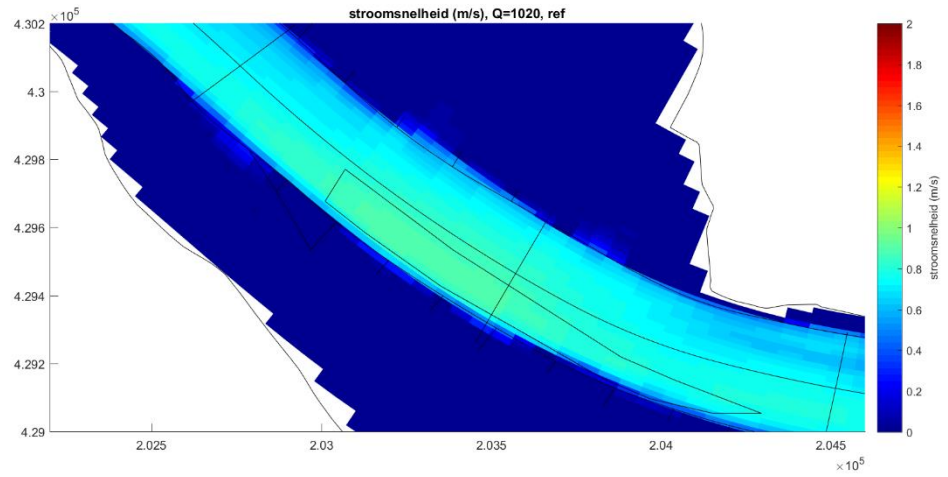
Met overlagen (referentie)

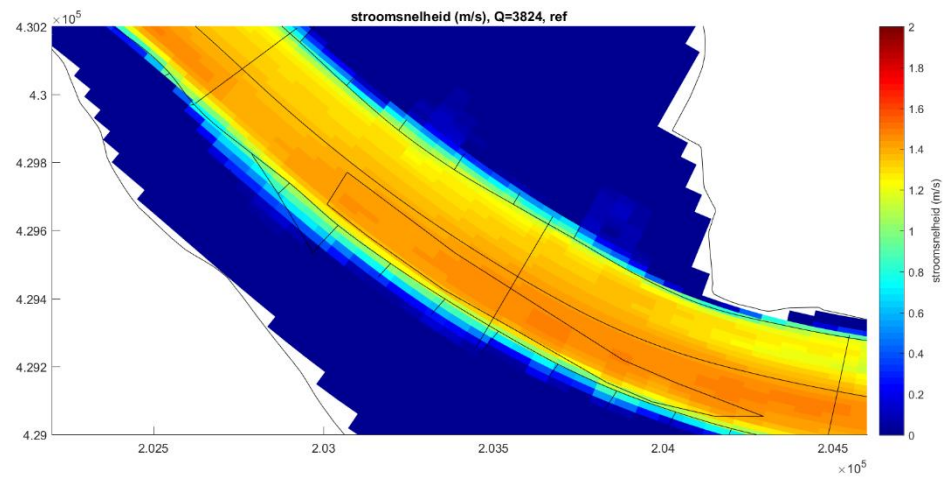
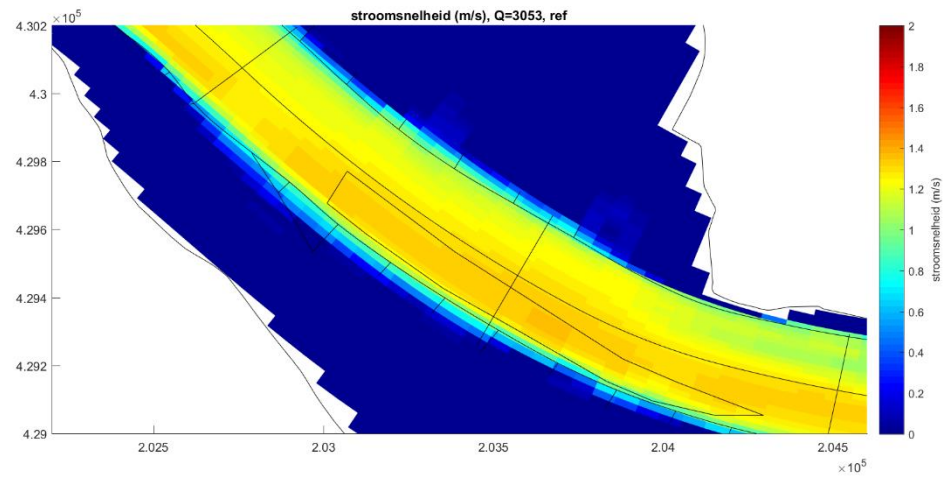
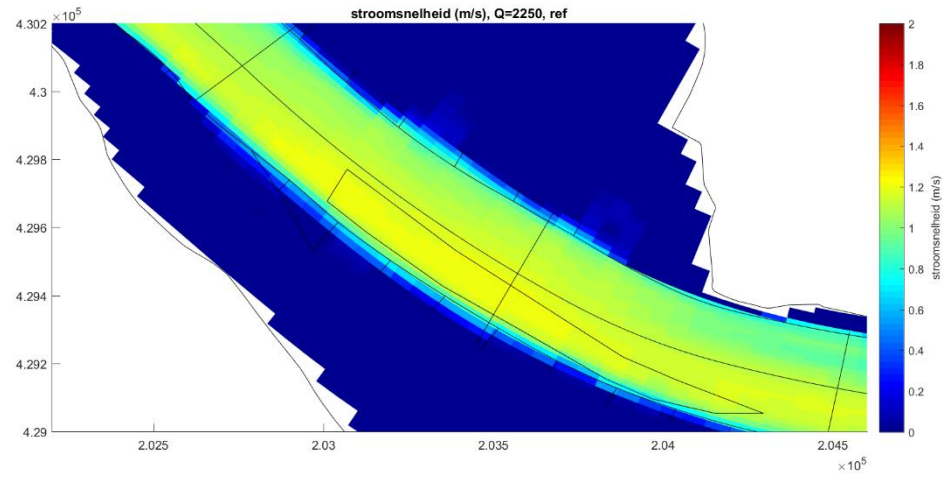


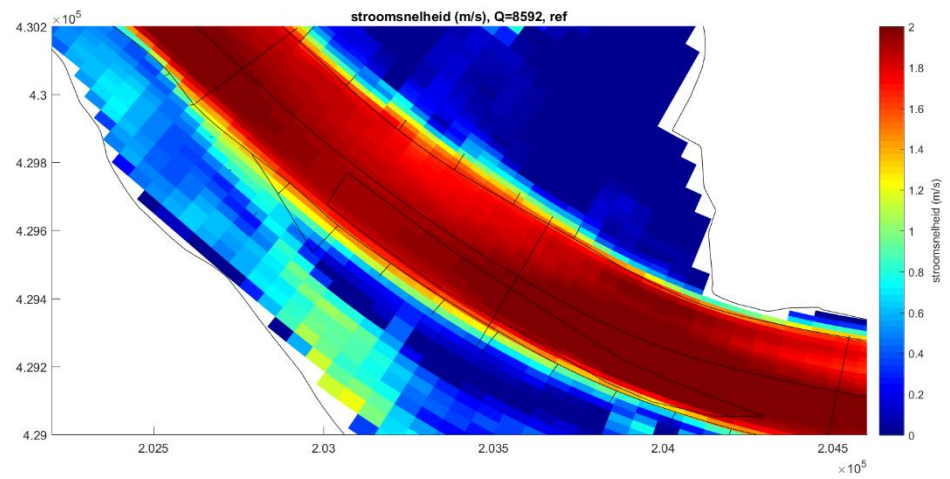
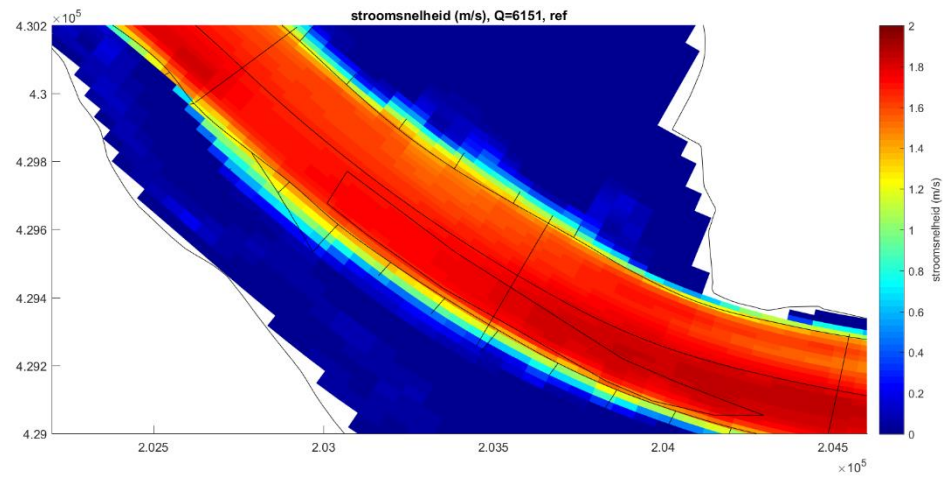
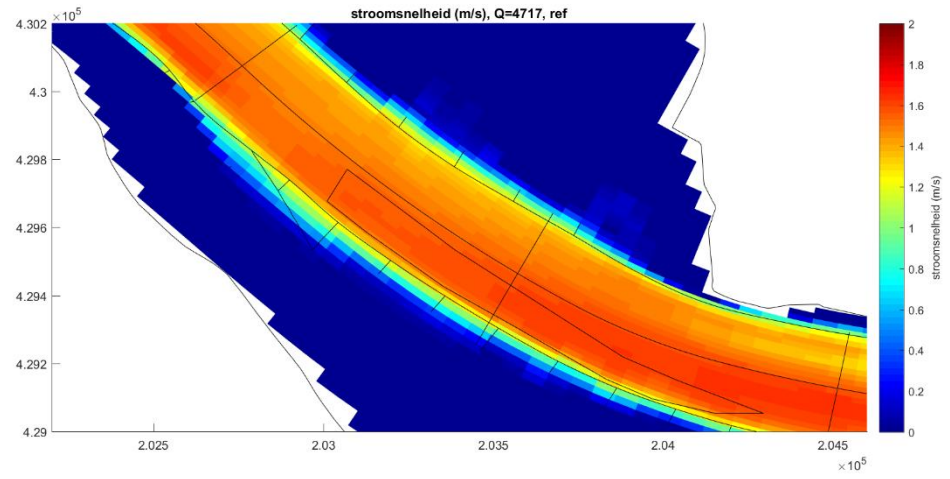




Zonder overlagen (referentie)

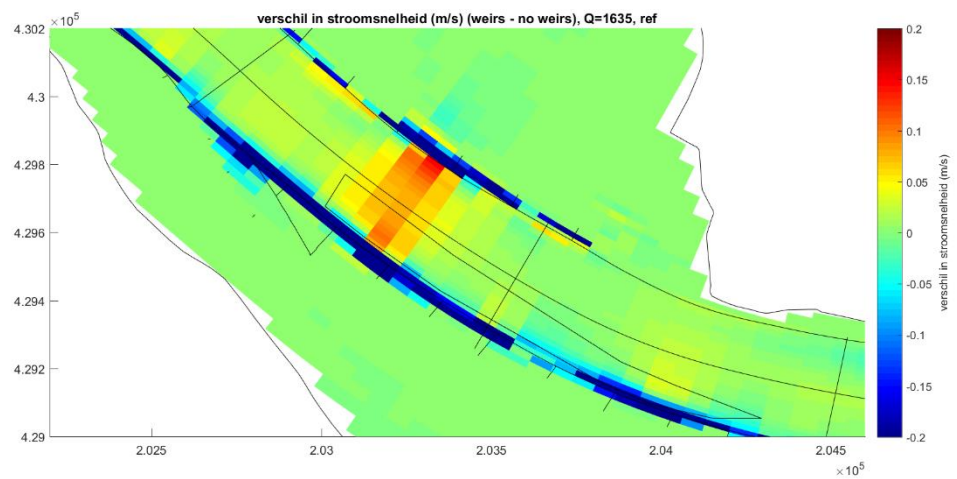
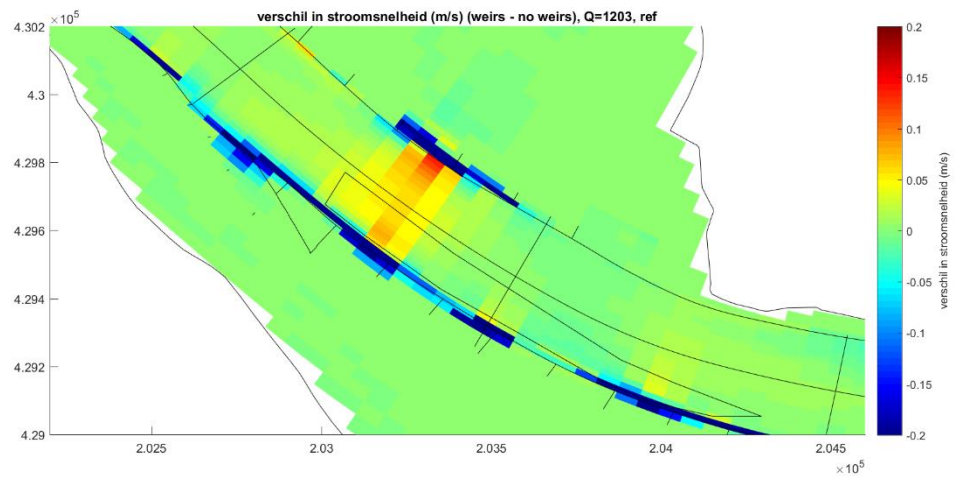
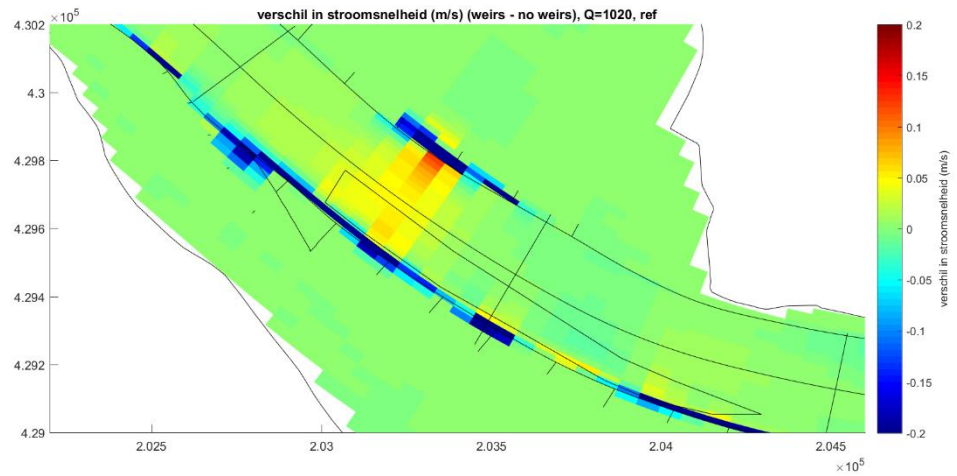


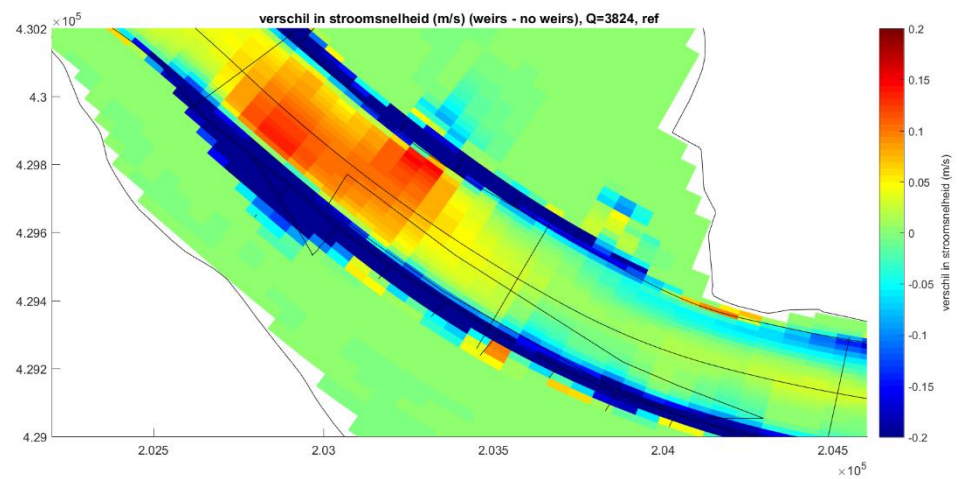
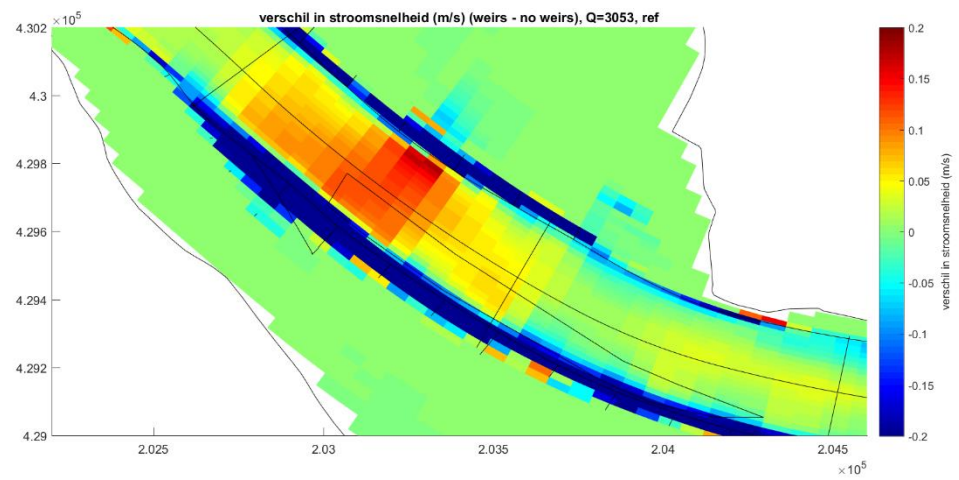
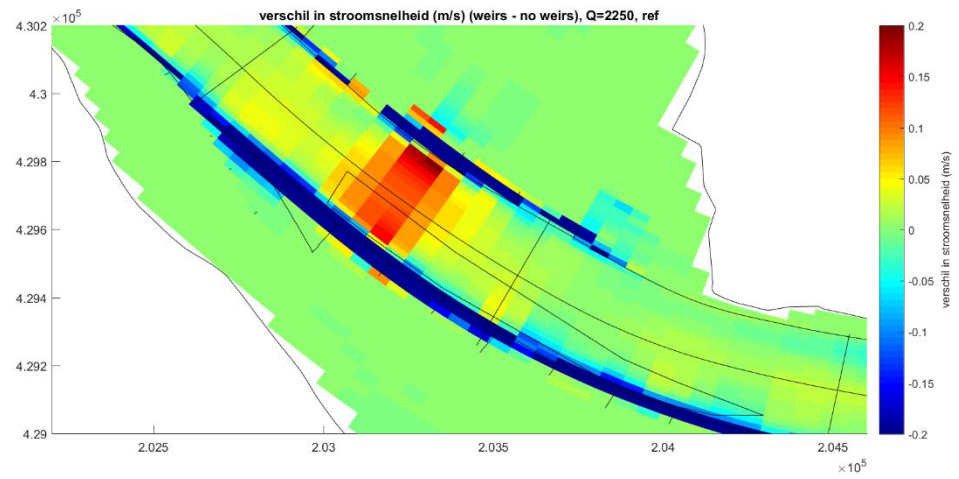


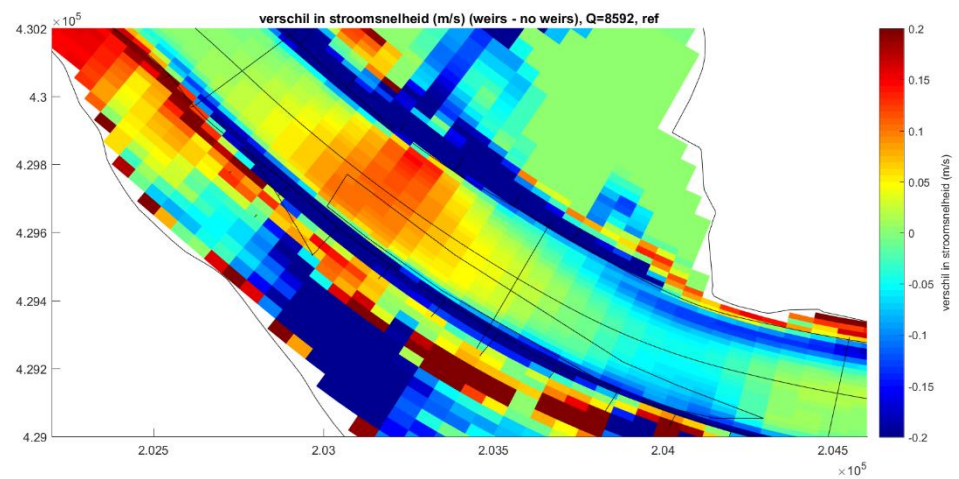
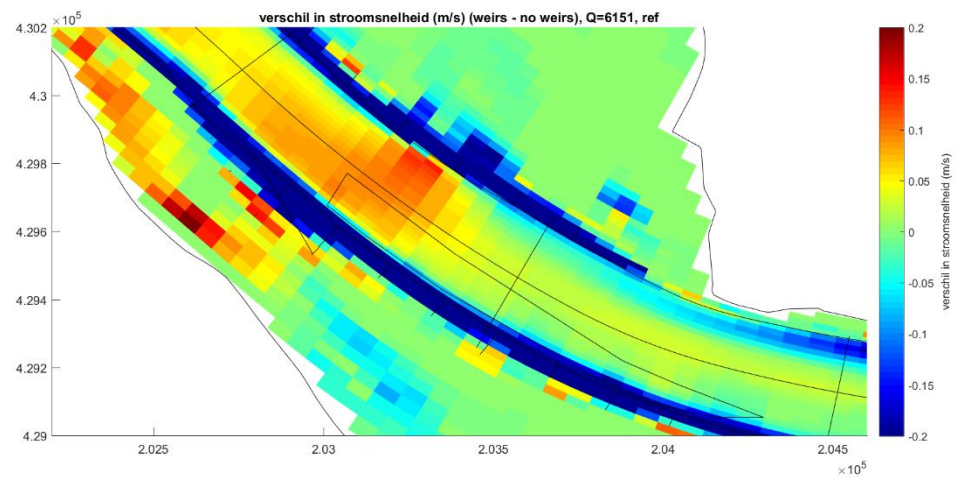
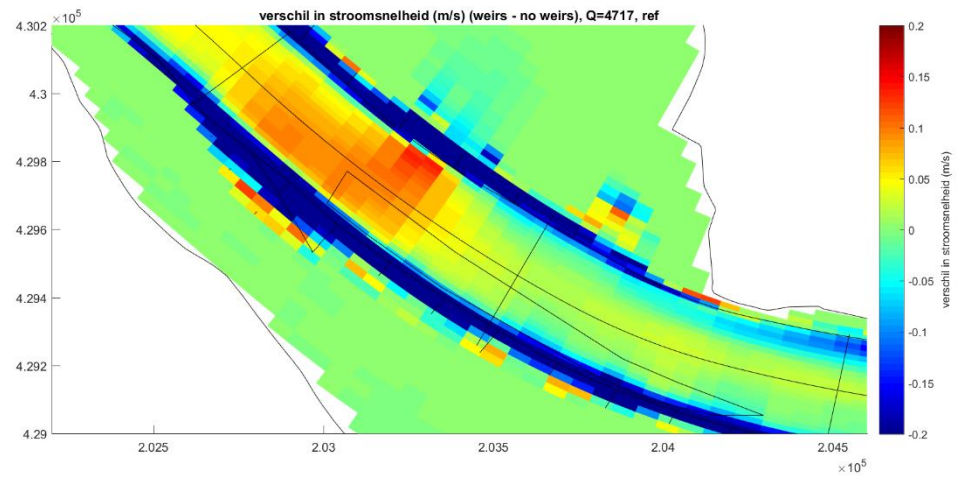


D.4.6 Verschillen in stroomsnelheden (absolute waarde/magnitude)

Referentie





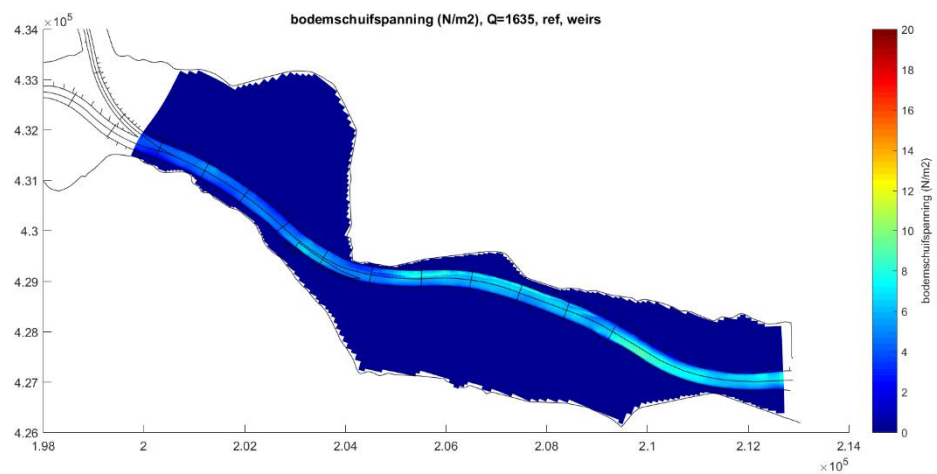
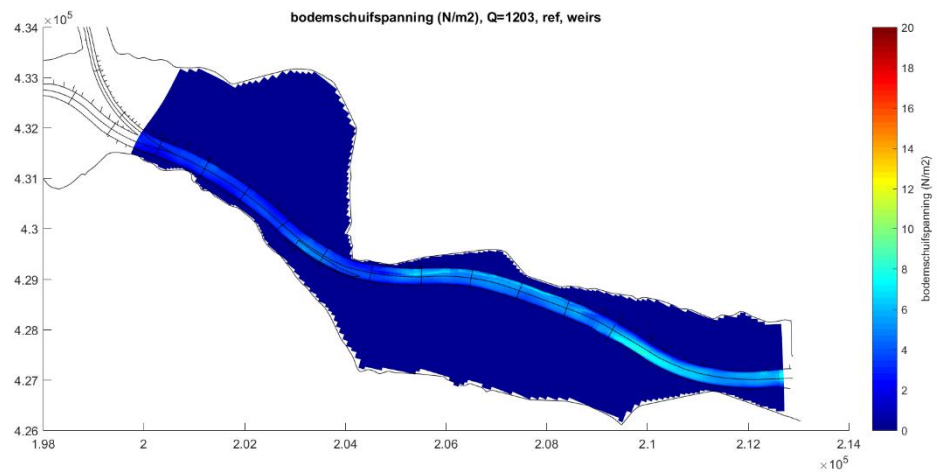
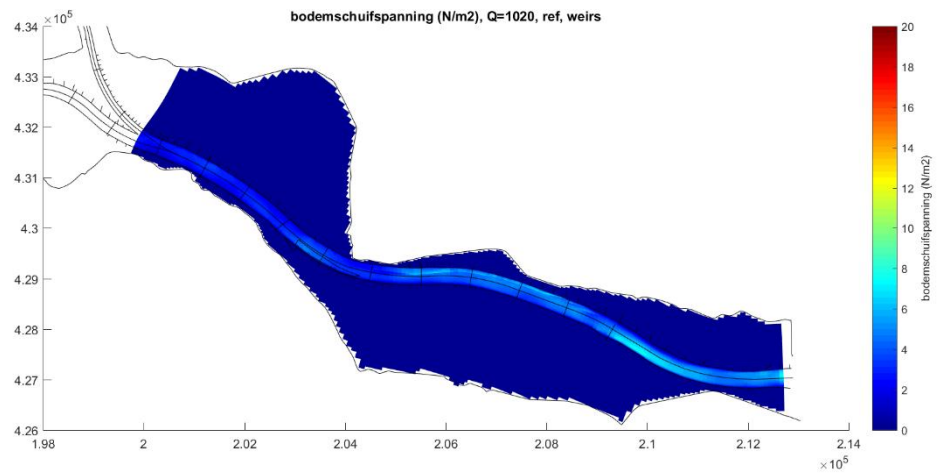


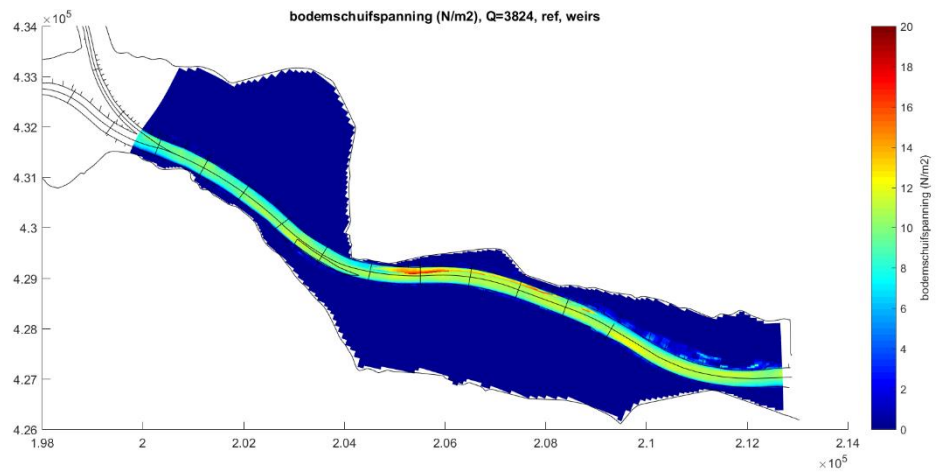
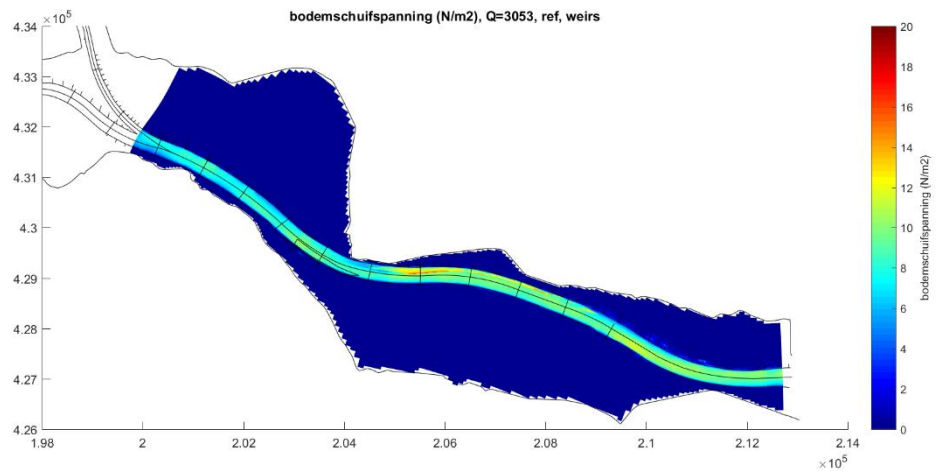
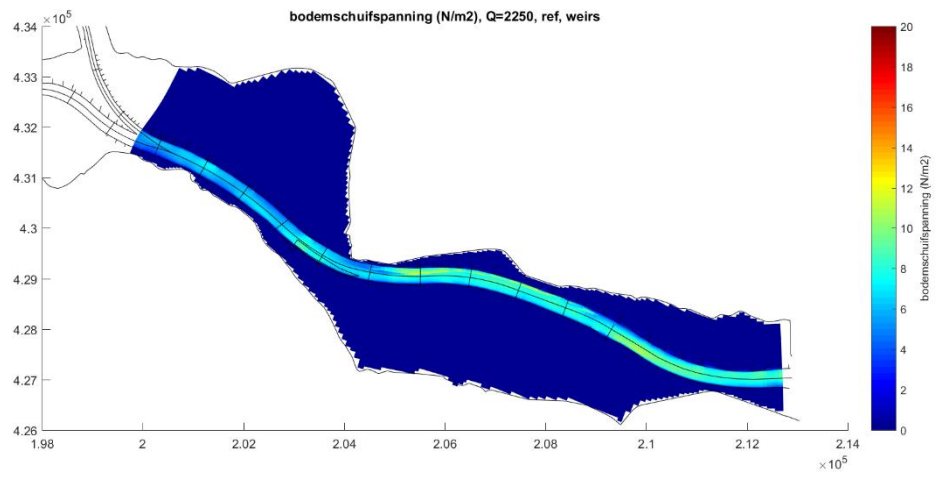
Berekening met suppletie 2016

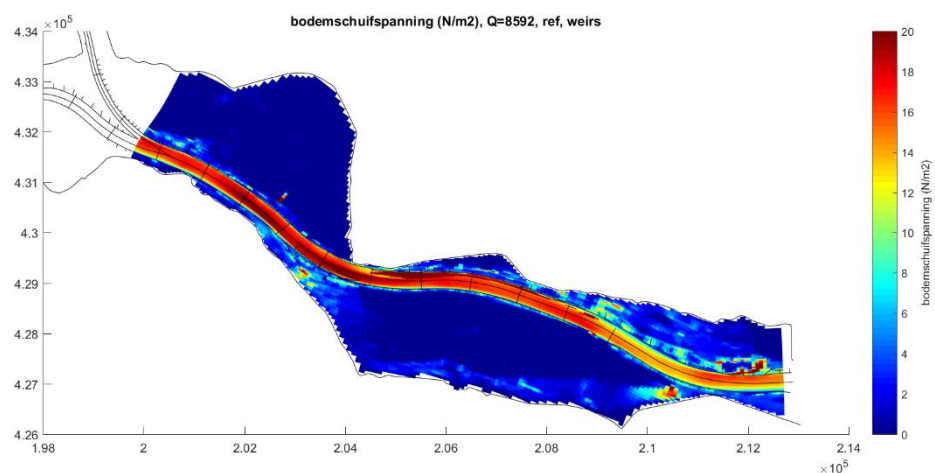
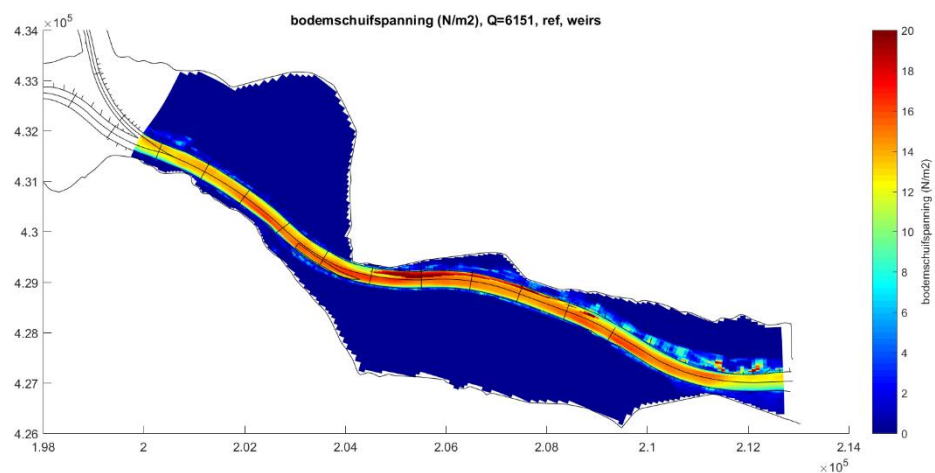
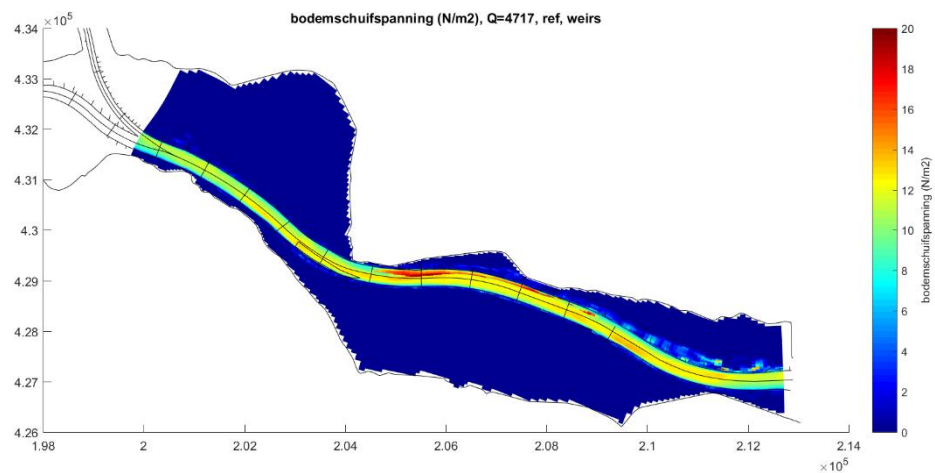
De snelheidsverschillen in de situatie met suppletie 2016 zijn heel erg vergelijkbaar met de verschillen in de referentiesituatie.

D.4.7 Bodemschuifspanningen

Onderstaande figuren geven de bodemschuifspanning in de referentiesituatie met overlagen weer voor de 9 afvoerniveaus. Bij de lage afvoeren liggen de schuifspanningen tussen 2 en 8 N/m², bij de hoogste afvoer tussen 14 en 25 N/m². De volgende paragraaf laat zien hoe sterk deze schuifspanning verschillen van de (foute) berekening zonder overlagen.



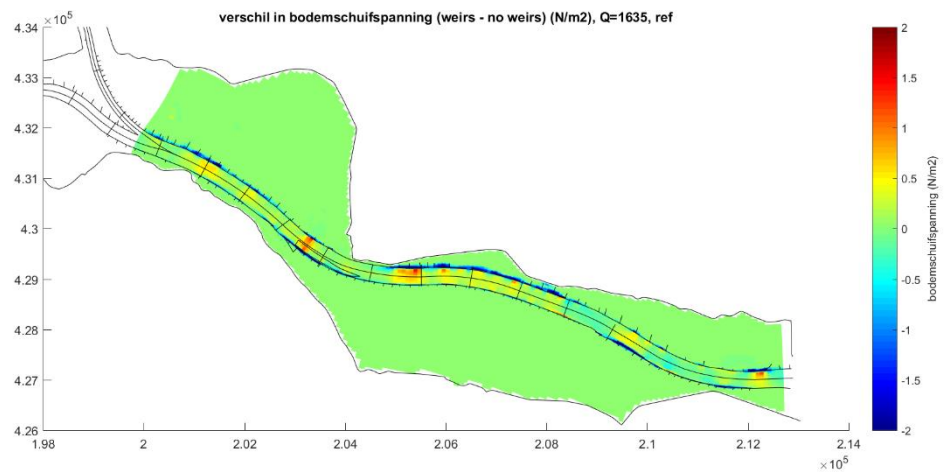
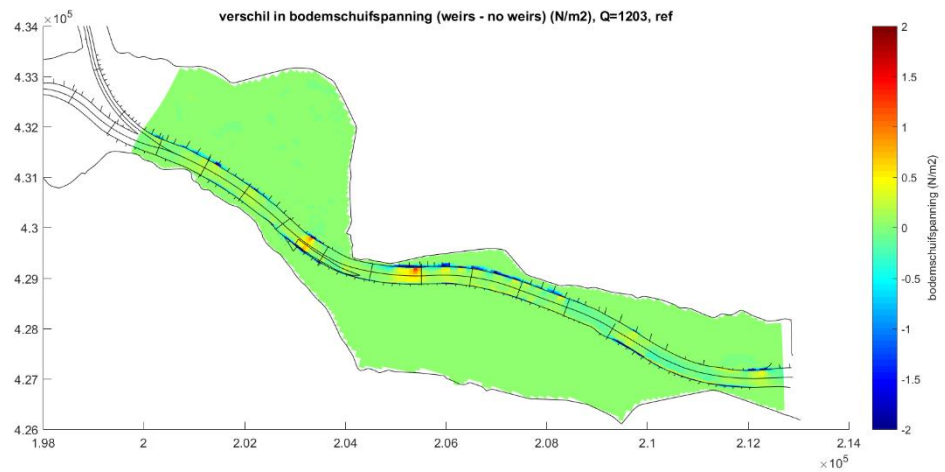
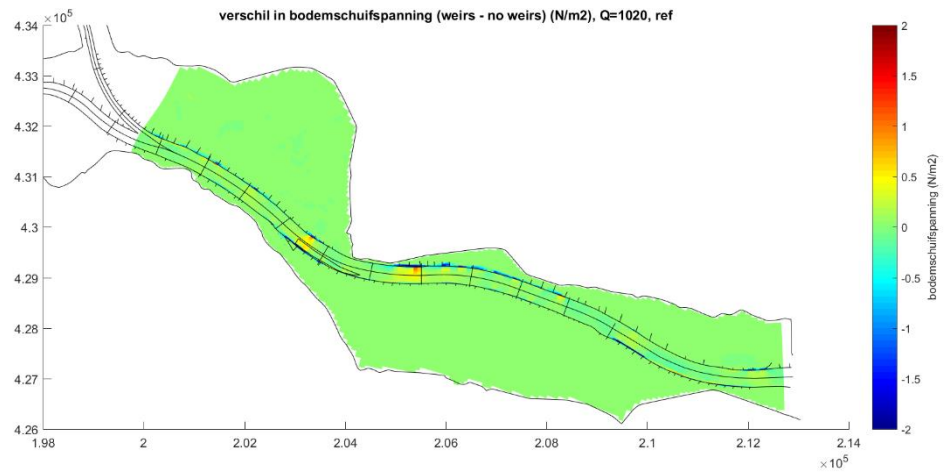


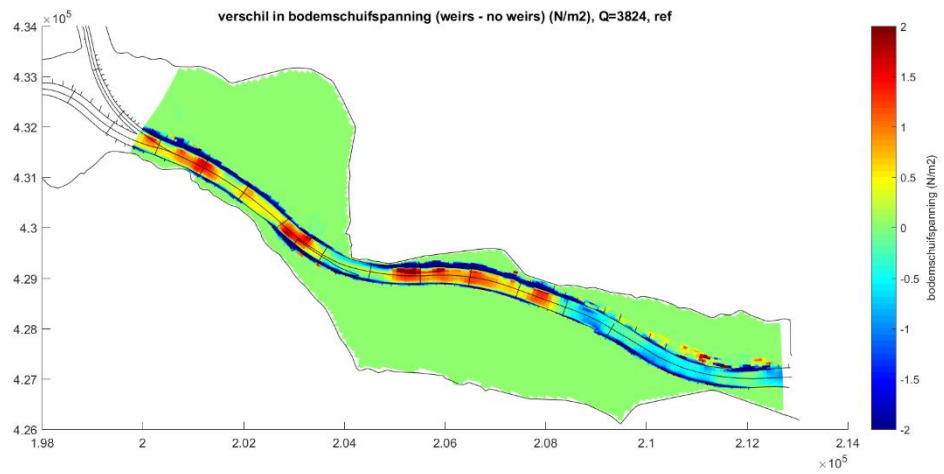
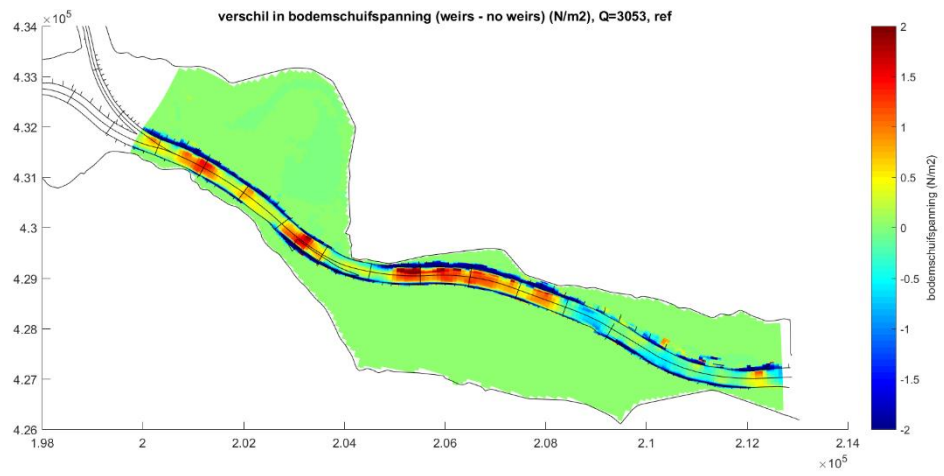
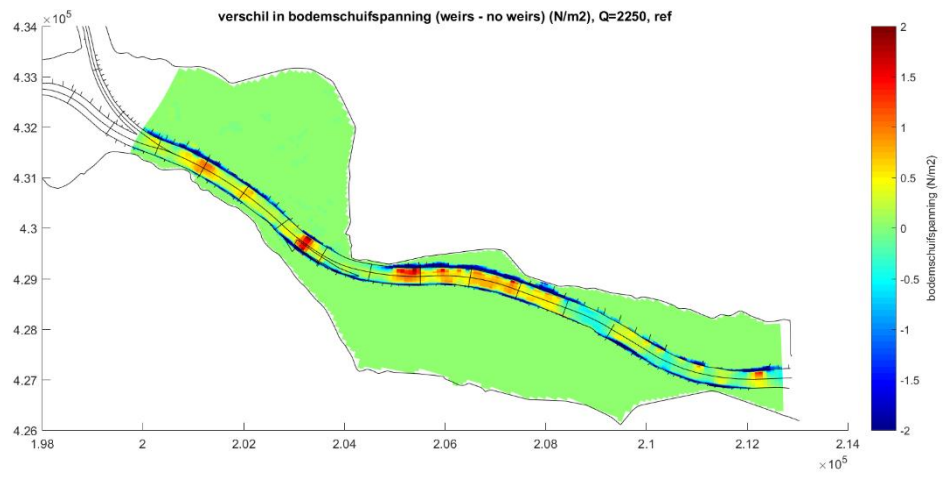


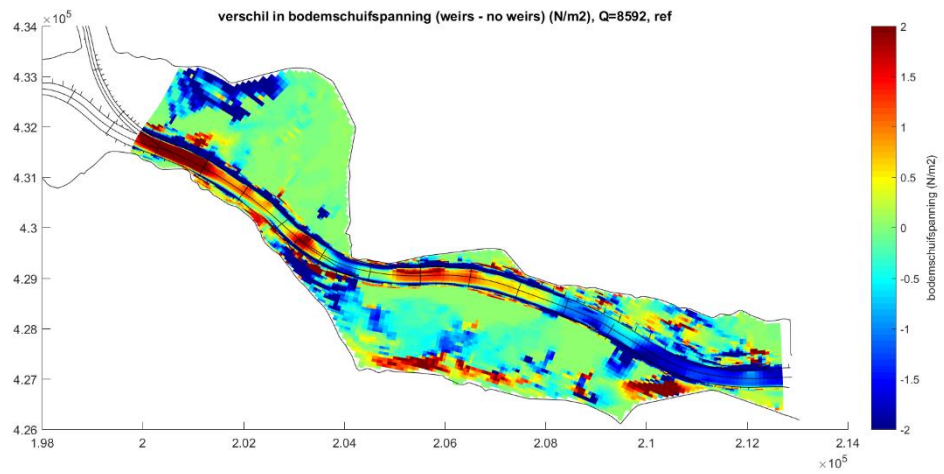
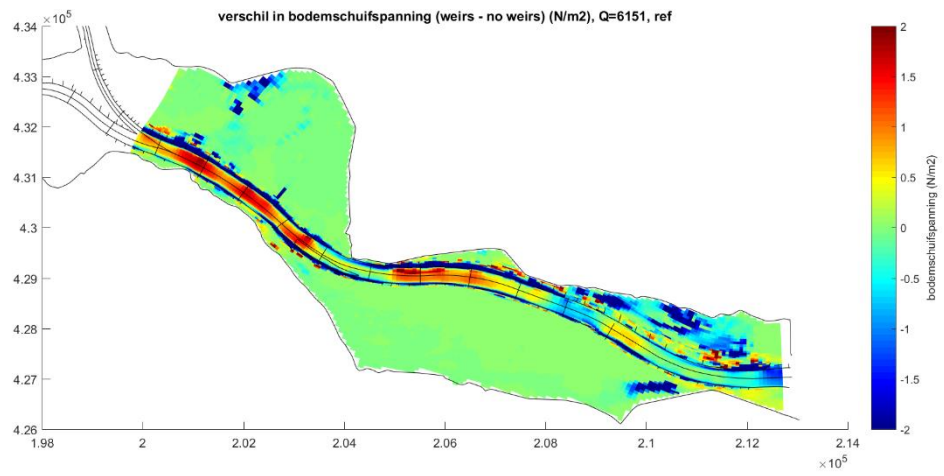
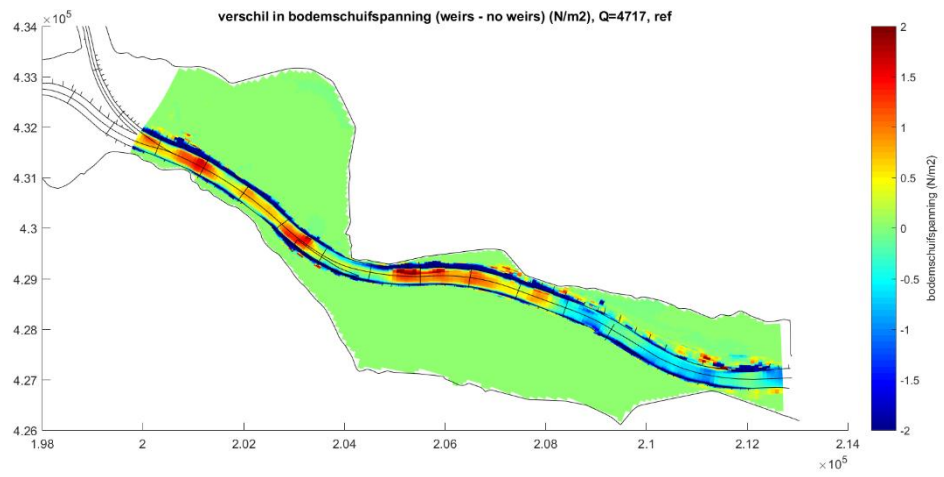
D.4.8 Verschillen in bodemschuifspanningen (met en zonder overlagen)

Met toenemende afvoer verschillen de schuifspanningen in de berekeningen met en zonder overlagen steeds meer. De verschillen in het zomerbed van de Boven-Rijn variëren sterk en kunnen positief of negatief zijn, afhankelijk van de verschillen tussen de stroomsnelheden.

Dat betekent dat de bodemligging in het model met overlaten lokaal anders gaat ontwikkelen dan in het model zonder overlaten. Hoe groot het verschil in de bodemligging is wordt in paragraaf D.5 geanalyseerd.

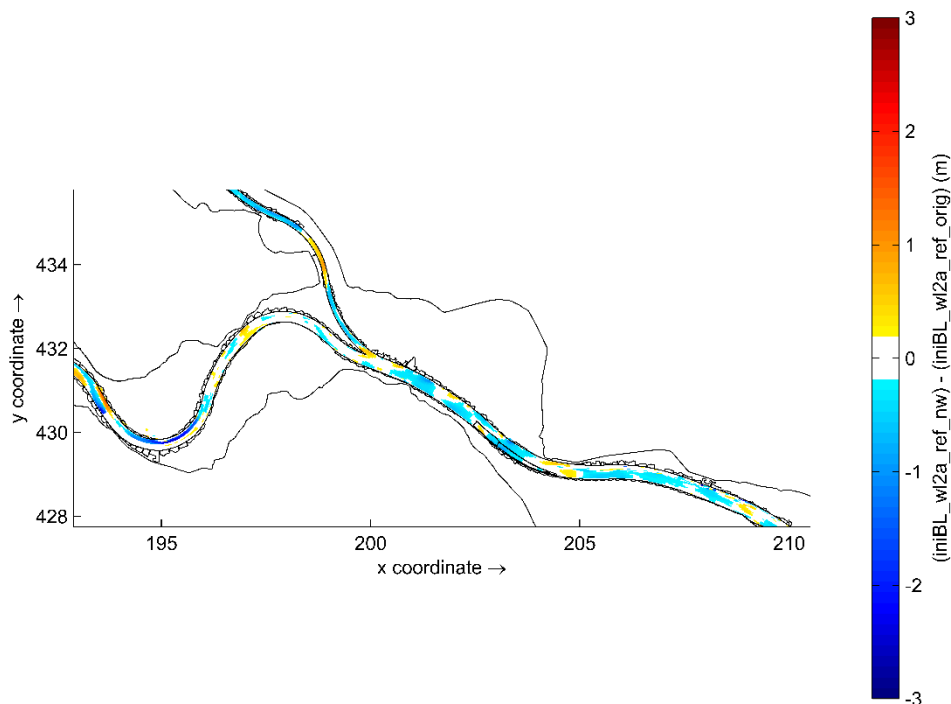






D.5 Invloed van de overlaten: morfologische berekeningen met bewegende bodem

De initiële (ingespeelde) bodemligging verschilt tussen de situaties met en zonder overlaten ongeveer +/-0,5 m, lokaal op enkele plekken meer, zie figuur.



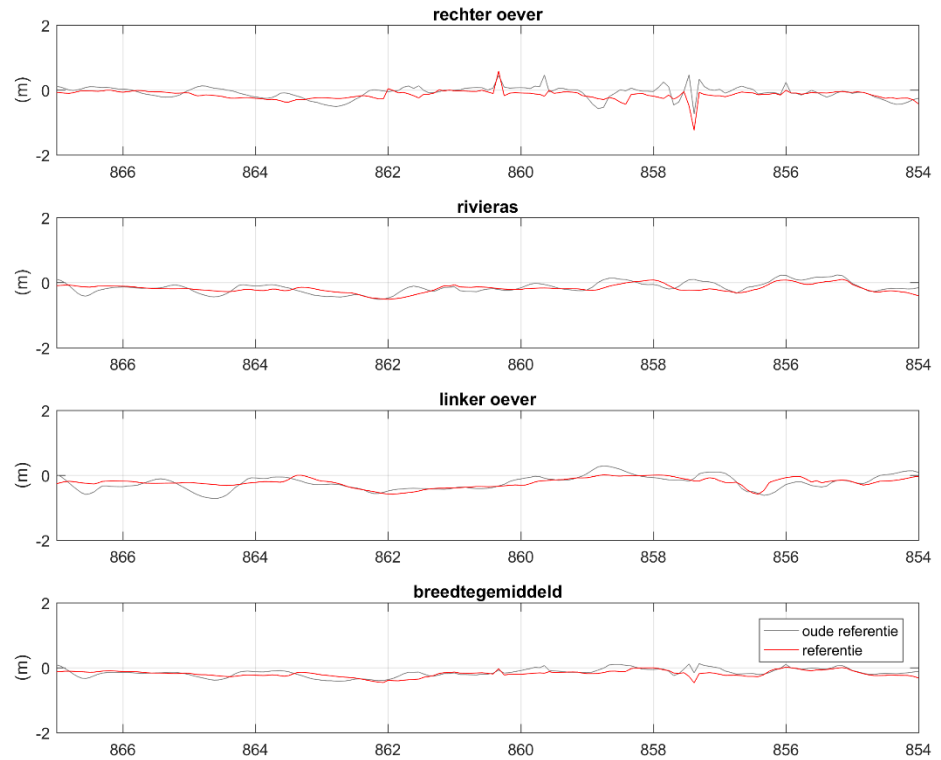
Figuur 29 Verschil in ingespeelde bodemligging (met – zonder overlaten).

De volgende paragrafen laten zien hoe de bodemontwikkeling verschilt.

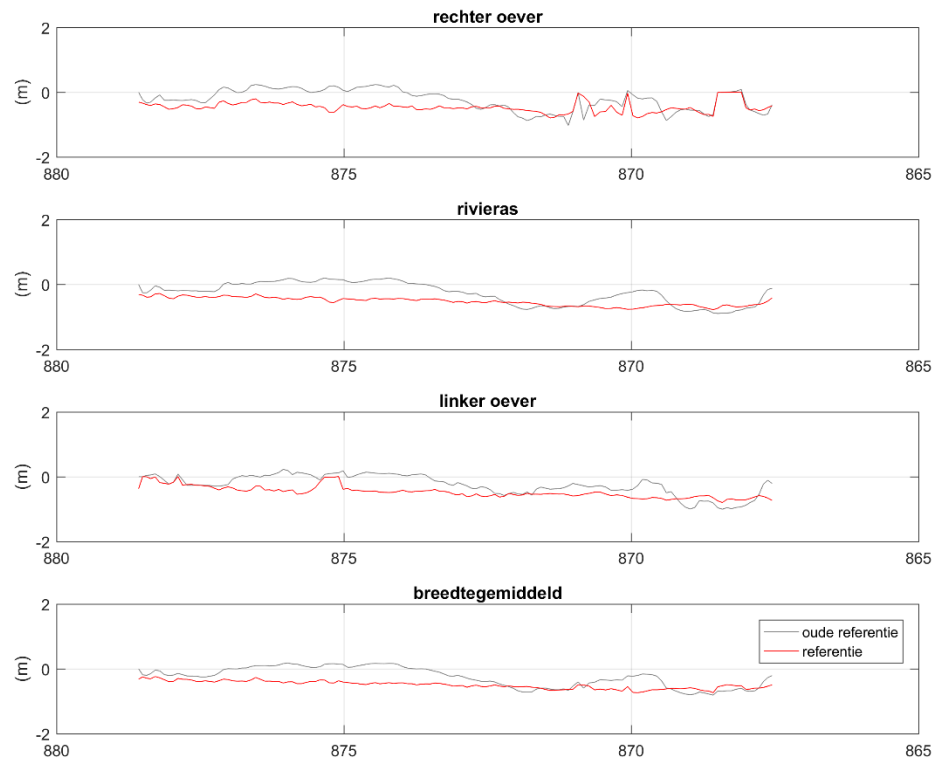
D.5.1 Bodemontwikkeling (met/zonder overlaten)

De figuren hieronder laten de bodemontwikkeling in de referentieberekeningen (dus zonder suppleties) zonder (“oude referentie”) en met overlaten (“referentie”) zien. Op de Boven-Rijn verschilt de bodemontwikkeling lokaal, maar in grote lijnen is de ontwikkeling in beide modelversies vergelijkbaar. Op het Pannerdensch Kanaal erodeert de bodem met name in de benedenstroomse helft sterker nadat de overlaten aan het model zijn toegevoegd. Bovenstrooms bij de Pannerdensch Kop is de ontwikkeling echter vergelijkbaar in beide modellen. De bovenstroomse helft van de Boven-Waal erodeert met overlaten licht terwijl dit traject zonder overlaten redelijk stabiel blijft. Zonder overlaten ontstaan achter de vaste laag bij Nijmegen en de bodemkribben bij Erlecom diepe erosiekuilen, met overlaten is dat minder. De sterke erosietrend in de binnenbocht (rechts) naast de bodemkribben bij Erlecom blijft ook met overlaten bestaan.

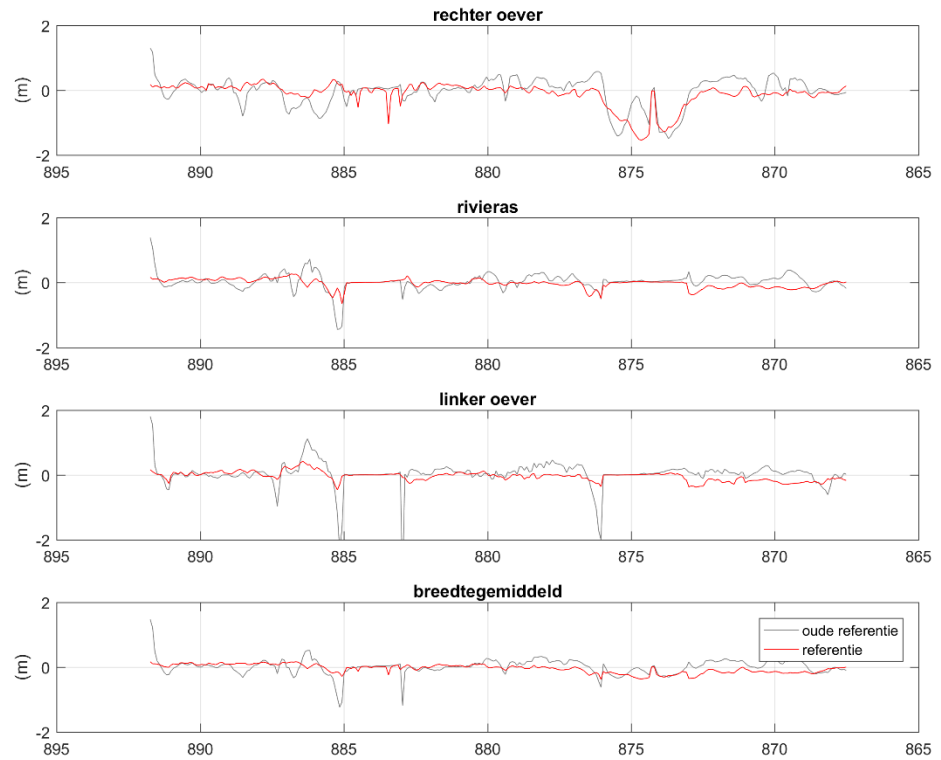
Bovenrijn bodemontwikkeling na 5 jaar



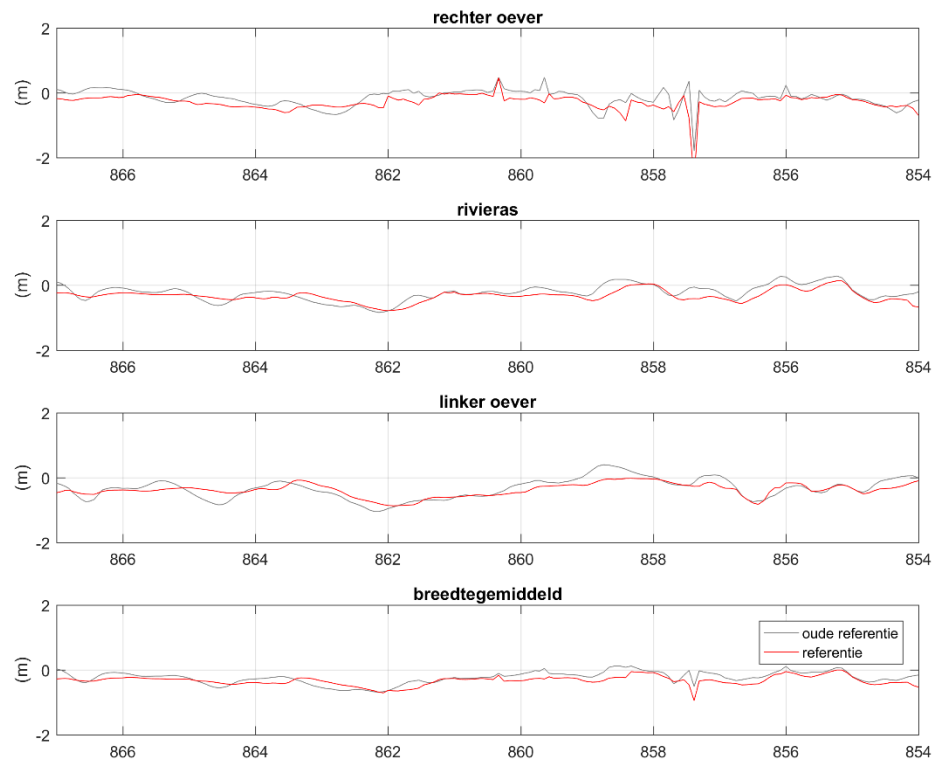
Pannerdensch Kanaal bodemontwikkeling na 5 jaar



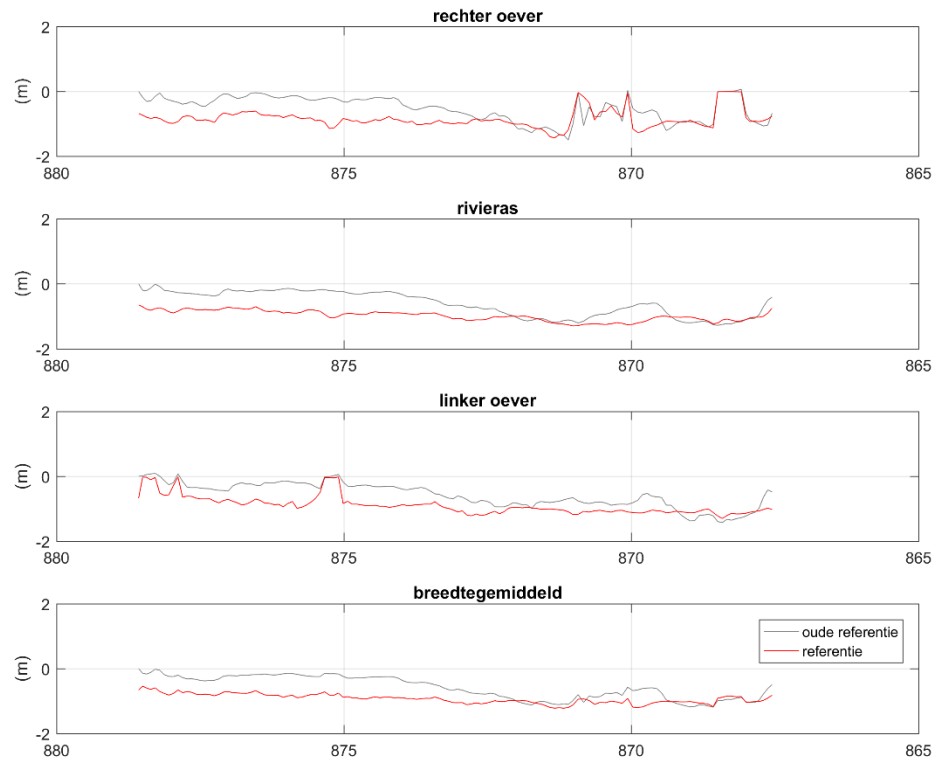
Boven Waal bodemontwikkeling na 5 jaar



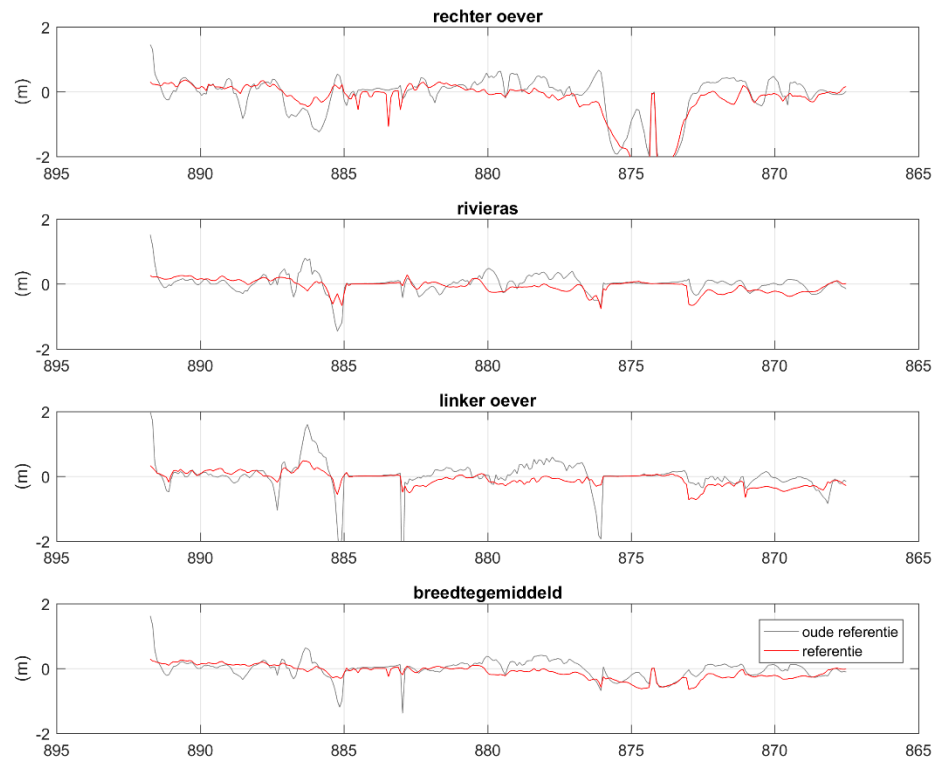
Bovenrijn bodemontwikkeling na 10 jaar



Pannerdensch Kanaal bodemontwikkeling na 10 jaar



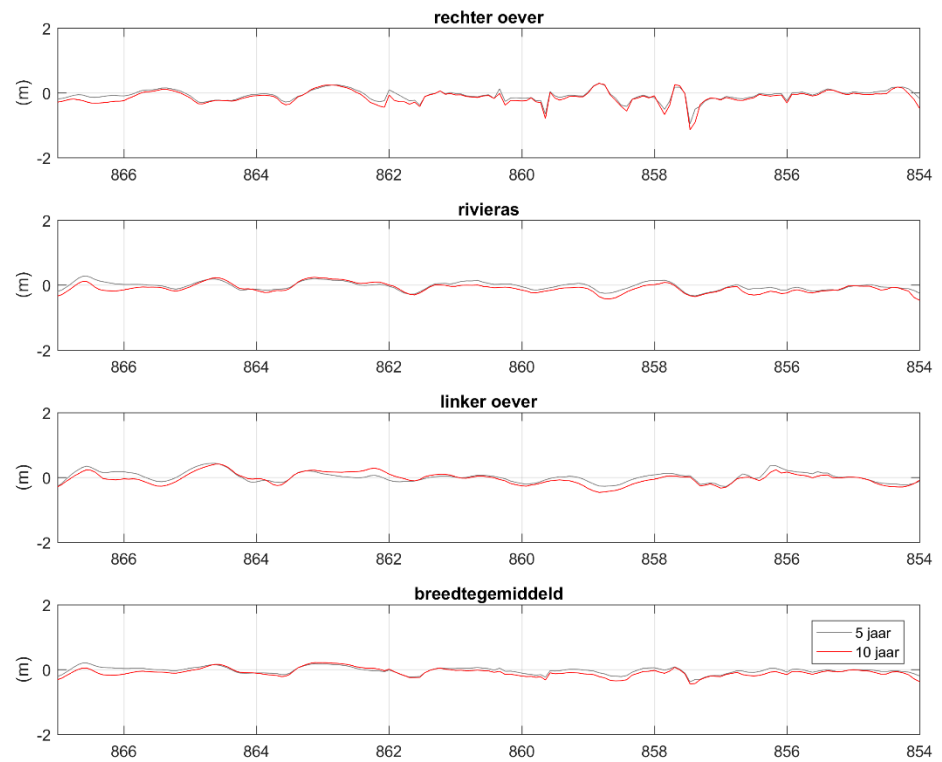
Boven Waal bodemontwikkeling na 10 jaar



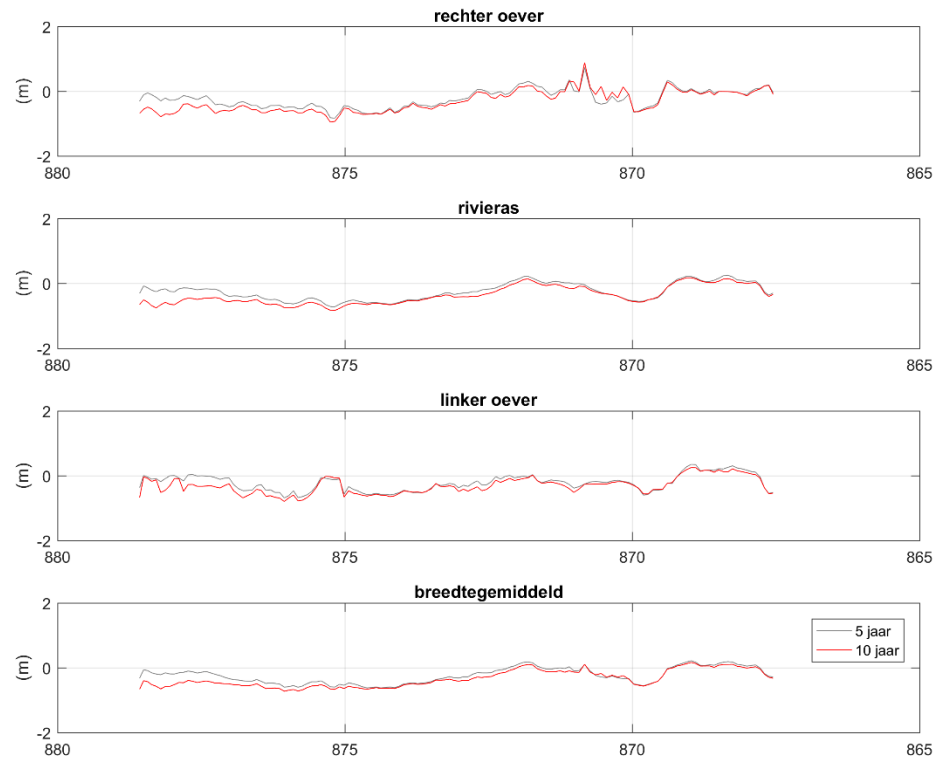
D.5.2 Vershil in bodemontwikkeling (met-zonder overlaten)

Onderstaande figuren tonen het verschil in bodemontwikkeling tussen de modelversies met en zonder overlaten.

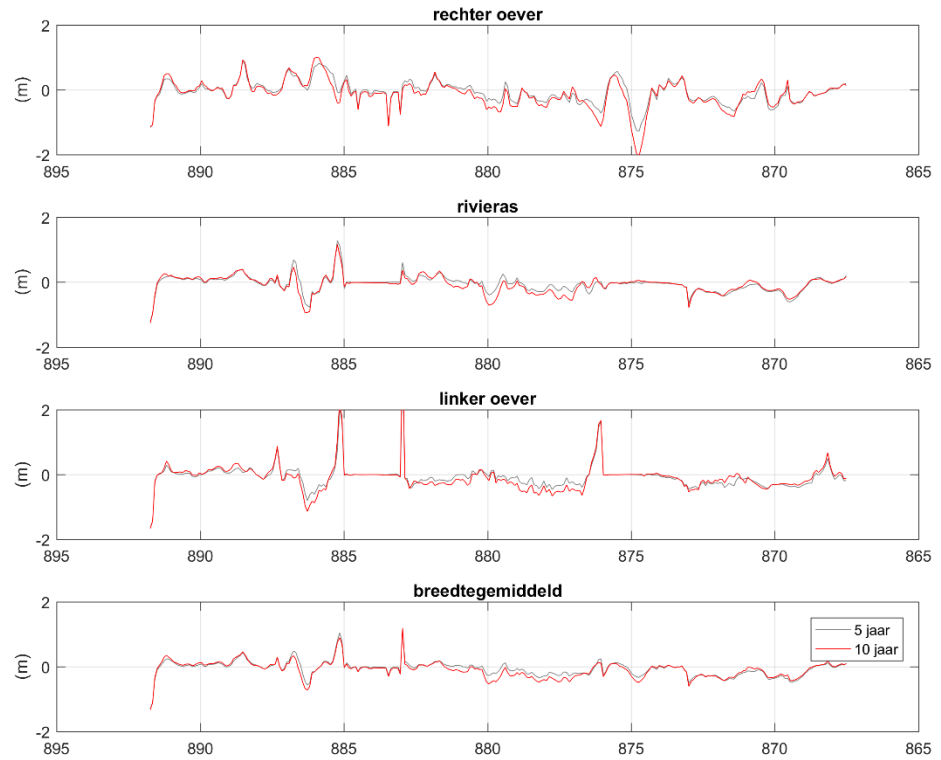
Vershil in Bovenrijn bodemontwikkeling
tussen referentie en oude referentie



Vershil in Pannerdensch Kanaal bodemontwikkeling
tussen referentie en oude referentie



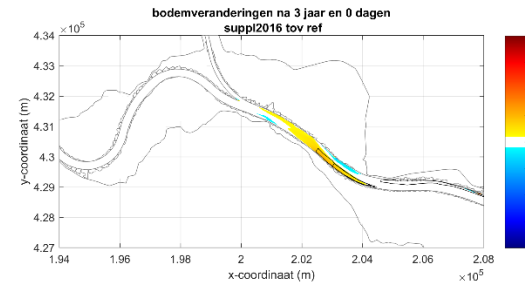
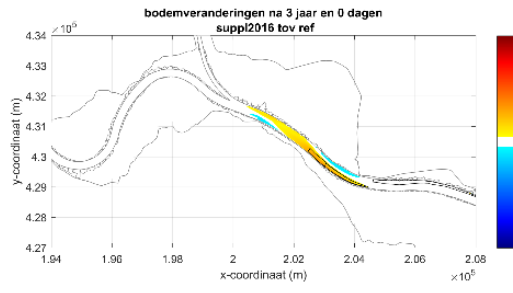
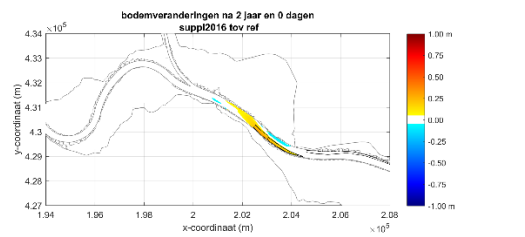
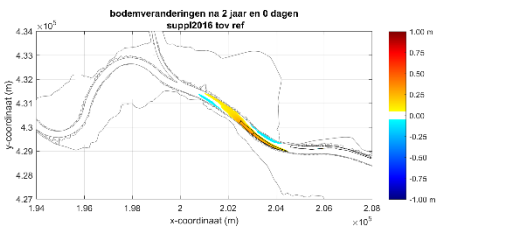
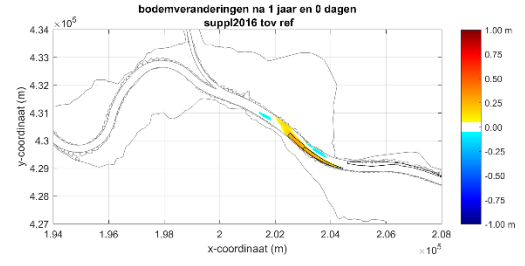
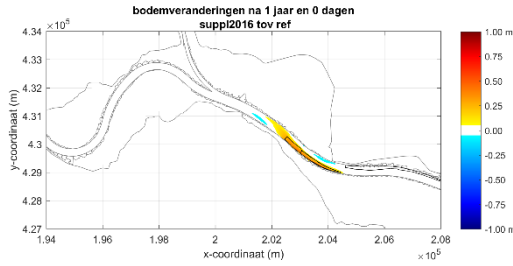
Vershil in Boven Waal bodemontwikkeling
tussen referentie en oude referentie



D.5.3

Invloed van de suppletie 2016 op de bodemligging (met en zonder overlaten)

De invloed van de suppletie 2016 op de bodemligging in de eerste drie jaar is hieronder vergeleken tussen de modellen met en zonder overlaten. Het patroon is niet exact hetzelfde maar zeer vergelijkbaar. Hetzelfde geldt voor de tijdschaal.

Met overlaten**Zonder overlaten**

D.6 Conclusie: Consequenties voor de uitkomsten van de twee projecten over de Boven-Rijn suppleties

D.6.1 Eindevaluatie (2022/23)

Effect op de bodemligging

De bodemveranderingen op de Boven-Rijn verschillen in de twee modellen lokaal, maar de algemene trend is vergelijkbaar. Ook is de invloed van de suppletie 2016 op de bodemligging qua patroon en tijdschaal erg vergelijkbaar. Daarom wordt geconcludeerd dat de conclusies over de invloed van de suppleties op de bodemligging overeind blijven.

Effect op de samenstelling

De invloed van de suppleties op de bodemsamenstelling is in de eindevaluatie volledig op basis van metingen (bodemmonsters) bepaald. De fout in de overlaten heeft daarom geen consequenties voor de conclusies over de invloed op de samenstelling.

Effect op waterstanden

Het waterstandsverhang verandert op de Boven-Rijn nauwelijks en is dus nog steeds goed. De invloed van de suppleties op de waterstanden direct na aanleg blijft nagenoeg gelijk na aanzetten van de overlaten in het model (paragraaf D.4.3). De tijdschaal van uitdempen van dit effect zou kunnen veranderen. Echter hebben de peilingen laten zien dat de suppleties in werkelijkheid nauwelijks bewegen of eroderen, daarom wordt na nader inzicht verwacht dat het waterstandseffect ook nauwelijks uitdempt.

Invloed op hoogwaterveiligheid

De invloed van de suppleties op de hoogwaterstanden langs de as van de rivier verandert nauwelijks door het toevoegen van de overlaten.

Wel verandert de invloed op de waterstanden langs de primaire kering lokaal vanwege veranderde stromingspatronen door de uiterwaarden. De orde grootte van het waterstandseffect langs de primaire kering (orde 1 cm) blijft echter gelijk.

De conclusies over de invloed van de suppleties op de hoogwaterveiligheid blijven dus geldig.

Invloed op het gebruik van de vaarweg

- De invloed van de suppletie op de **waterdiepte** (en daarmee het gebruik van de vaarweg) blijft vergelijkbaar, omdat de invloed op de bodemligging vergelijkbaar blijft. De conclusies hoeven dus niet worden aangepast.
- De invloed van de suppletie op het **gebruik van de vaarweg over de breedte en op de reistijden** is volledig gebaseerd op de analyse van gegevens (CoVadem-data). Daarom hoeven er geen conclusies worden aangepast.
- De invloed van de suppletie op **MGDs en vaargeulonderhoud** is volledig gebaseerd op de analyse van gegevens. Daarom hoeven er geen conclusies worden aangepast.
- In de **dwaarsstroomsnelheden** verandert het patroon door een veranderde interactie met de uiterwaarden en kribzone. De dwaarsstroomsnelheden worden nog iets grilliger. De absolute waarden blijven echter tussen de +/-0,10 m/s. Ook de invloed van de suppleties op de dwaarsstroomsnelheden verandert lokaal iets van patroon, maar de verschillen blijven tussen de +/-0,05 m/s. De conclusies met betrekking tot de dwaarsstroomsnelheden (grotendeels niet kritiek op de bakenlijn en maar beperkt beïnvloed door de suppleties) blijven dus overeind.
- De invloed van de suppletie op de **stroomsnelheid in langsrichting** neemt met name bij de lagere afvoeren licht toe maar blijft beperkt (tussen +/-0,05 m/s). De conclusie dat dit (bij absolute stroomsnelheden tussen de 1,0 en 2,0 m/s) procentueel een beperkte toename is blijft overeind.

Invloed op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen:

De invloed van de suppleties op de bodemschuifspanningen wordt iets groter met overlaten in het model, maar blijft vrij klein, (ruim) onder de 10% (0,3 – 0,5 N/m² hogere schuifspanningen met suppletie, bij absolute waarden van 5-15 N/m², afhankelijk van de afvoer). De zone waarin de schuifspanning (initieel, direct na aanleg van de suppleties) is verhoogd blijft nagenoeg gelijk. En doordat de invloed van de suppleties op de bodemontwikkeling vergelijkbaar blijft, verandert de schuifspanning ook op een vergelijkbare manier in de tijd. De conclusie over de stabiliteit van de kribben blijft dus overeind.

D.6.2 Tussenevaluatie (2017)

In de tussenevaluatie van de eerste suppletie in 2017 (Niesten et al., 2017, en Becker, 2017) is vooral gekeken naar de invloed van de suppletie op de bodemontwikkeling. Omdat deze met overlaten vergelijkbaar is als zonder, hoeven de conclusies niet worden aangepast.

Wel veranderen de conclusies over de validatie van het numerieke model iets:

- De berekende stroomsnelheden waren in de berekeningen uit 2017 (zonder overlaten) over het algemeen iets kleiner dan de gemeten snelheden. Nu (met overlaten) zijn de berekende snelheden iets groter. De conclusie dat de overeenstemming in de hoofdgeul vrij goed is blijft staan. Ook de conclusie dat het rooster te grof is voor een goede weergave van stroomsnelheden in de kribzone blijft staan.
- Niesten et al. (2017) constateren dat de in 2017 berekende waterstanden op de Boven-Rijn te hoog waren. Na correctie van de overlaten worden deze nog hoger. Het foutieve verhang op het Pannerdensch Kanaal blijft.

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