

Eindevaluatie suppletie Boven-Rijn

Deelrapport 1: Data en effecten



Eindevaluatie suppletie Boven-Rijn

Deelrapport 1: Data en effecten

Auteur(s)

Anke Becker
Sanjay Giri
Andries Paarlberg
Kees Sloff
Pepijn van Denderen
Migena Zagonjoli

Eindevaluatie suppletie Boven-Rijn

Deelrapport 1: Data en effecten

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

Documentgegevens

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Versie | 1.0 |
| Datum | 14-02-2023 |
| Projectnummer | 11208437-000 |
| Document ID | 11208437-000-ZWS-0023 |
| Pagina's | 146 |
| Classificatie | |
| Status | definitief |

Auteur(s)

| | | |
|--|-------------------|---------------------|
| | Anke Becker | Kees Sloff |
| | Sanjay Giri | Pepijn van Denderen |
| | Andries Paarlberg | Migena Zagonjoli |

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.

Dit deelrapport 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 worden de conclusies gebaseerd op beschikbare gegevens. Waar nodig wordt de analyse ondersteund door resultaten van numerieke modelberekeningen. De berekeningen helpen tevens om een voorspelling van de invloed van de suppleties in de toekomst te maken (vraag c).

Dit rapport wordt gevolgd door een tweede deelrapport (Becker, 2023), waarin 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 wordt onderzocht (vraag d). Ten slotte volgt een hoofdrapport met een samenvatting van de resultaten uit de deelrapporten, de afwegingen en leerpunten over de uitvoering (vraag b), een samenvattende beschrijving van de dynamiek van de suppleties en de “lessons learned” voor toekomstige suppleties (vraag e).

Hieronder worden de belangrijkste conclusies over de invloed van de suppleties op de bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden op de Boven-Rijn samengevat. Daarbij worden ook al enkele aanbevelingen voor toekomstige suppleties gedaan (vraag e). Deze zullen in het hoofdrapport nog verder worden uitgebreid.

Bodemligging (zie hoofdstuk 4):

In de bodemligging veroorzaken de suppleties een reactie in de vorm van een 2D-patroon vergelijkbaar met alternerende banken: direct naast en benedenstrooms van de suppleties ontstaat erosie, benedenstrooms aan de overkant ontstaat sedimentatie. Dit gebeurt omdat beide suppleties alleen aan één kant van de rivier aangebracht zijn en er daarom een herverdeling van de stroming plaatsvindt. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de keuze van een geschikte locatie voor een toekomstige suppletie om sedimentatie of erosie op ongunstige locaties zoals ondieptes of niet-baggerlocaties (ongunstig voor sedimentatie) en kruisingen van kabels en leidingen of locaties met een verhoogd risico op erosiekuilen (ongunstig voor erosie) te voorkomen of in elk geval te voorspellen.

Ook moet bij de keuze van een locatie rekening worden gehouden met de lokale dynamiek en grootschalige trends in de bodemligging, die de invloed van de suppletie kan versterken of veranderen. Bijvoorbeeld op de Boven-Rijn zijn al vóór de suppletieproef “autonome” trends in bodemligging veroorzaakt door de aanleg van de vaste laag bij Spijk. Hierdoor loopt een sedimentatiegolf het suppletiegebied in. Dat betekent dat de suppletie een reeds aanwezige trend in de bodem realiseert en dus niet meer volledig ageert als een verstoring van de bodemligging. Waarschijnlijk wordt de suppletie daardoor gedeeltelijk of geheel immobiel. Met zekerheid kan dat pas over een aantal jaren (5-10) worden gezegd.

Ook wekt de aanleg van de vaste laag, net als de suppletie zelf, in het gebied naast de suppletie erosie op. Hier versterken de effecten van beide ingrepen elkaar dus. Bovendien tonen de bodempeilingen een grote natuurlijke dynamiek van de diepe kuil bij de instroom van de Griethauser Altrhein. Deze wordt door hoogwaters uitgescheurd en vult in laagwaterperiodes weer langzaam aan. Het benedenstroomse einde van de eerste suppletie lag in deze kuil en is bij het eerste grotere hoogwater in 2018 volledig geërodeerd. De langzame verplaatsing van de suppletiebult naar benedenstrooms wordt daardoor verstoord.

De bodempeilingen tonen dat op de Boven-Rijn hoogwaters de meeste dynamiek in de bodemligging veroorzaken. Ook het suppletiemateriaal komt bij hoogwater in beweging, er migreren dan golven van gesuppleerd sediment naar benedenstrooms. Ook op die manier wordt de bodemdynamiek dus beïnvloed door de suppleties.

In de afgelopen jaren zijn op het suppletietraject diepe erosiekuilen ontstaan door het aansnijden van sterk erodeerbare lagen onder een grove bovenlaag. Dit is niet direct veroorzaakt door de suppleties, maar de suppleties hebben dit proces waarschijnlijk versneld.

Het front van de gesuppleerde laag op de Boven-Rijn beweegt maar heel langzaam stroomafwaarts. Het hierboven beschreven effect van de suppleties op de bodemligging (2D-patroon, sedimentgolven die in beweging komen tijdens hoogwater) kan daarom nog vele jaren zichtbaar blijven. De radiometrische metingen hebben laten zien dat het tracer-sediment sneller stroomafwaarts beweegt dan het front in de bodemligging en daarbij bovendien aan de linkerkant van de rivier blijft (dus de kant van de suppletie).

Bodemsamenstelling (zie hoofdstuk 5):

De bodemsamenstelling in de bemonsterde laag op de Boven-Rijn varieert sterk in tijd en ruimte. Het gesuppleerde materiaal valt qua zeefkromme binnen de geëiste bandbreedte maar is gemiddeld grover dan de ontvangende bodem. Ondanks dat hebben de suppleties niet geleid tot een waarneembare voortschrijdende vergroving benedenstrooms en dit wordt voor de toekomst ook niet verwacht.

Waterstand (zie hoofdstuk 6):

De suppleties verhogen de waterstand bij Lobith, dus aan het bovenstroomse einde van de suppleties, met ongeveer 1 cm per suppletie. Het waterstandseffect lijkt met name bepaald te worden door het volume (lengte, breedte en dikte) van de suppletie.

Ook ter plekke van het waterstandsmmeetpunt Lobith kunnen effecten optreden die de meting beïnvloeden (opstuwung van de waterstand, verandering van de bodemligging). Er wordt daarom aanbevolen om de Qf-relatie van het meetpunt regelmatig bij te werken.

Gebruik van het numerieke model voor het voorspellen van de invloed van de suppleties (zie hoofdstuk 7):

Er is geanalyseerd in hoeverre het model de invloed van de suppleties op de bodemligging en waterdieptes op de Boven-Rijn kan voorspellen. Omdat veel morfodynamiek nog niet is opgetreden, is een volledige verificatie nu nog niet mogelijk. Als de morfodynamiek van de suppletie in komende jaren groter wordt, is nog beter te verifiëren hoe goed ontwikkelingen voorspeld kunnen worden. Modelberekeningen kunnen bij toekomstige suppleties helpen om de effecten, met name op de bodemligging, van tevoren in te schatten, en dan met name de grootschalige effecten (bijv. het boven genoemde 2D-patroon). Hierbij moet vooral worden gekeken naar de relatieve effecten t.o.v. de referentie. Het model kan worden gebruikt om te experimenteren met de locatie, geometrie en samenstelling van toekomstige suppleties. Bij een dergelijke planning van toekomstige suppleties wordt aanbevolen om een gevoeligheidsstudie uit te voeren om de bandbreedte van effecten te kunnen bepalen.

Ook voor het inschatten van andere effecten van de suppleties, bijvoorbeeld op de bodemschuifspanning, die weer relevant is voor de stabiliteit van constructies en kabels en leidingen, kan het model gebruikt worden. Validatie was echter alleen indirect via de stroomsnelheden mogelijk omdat deze grootheden niet standaard worden gemeten, en is alleen voor de Boven-Rijn uitgevoerd.

Toepassen van de lessen van de suppleties op de Boven-Rijn voor toekomstige suppleties (zie hoofdstuk 8):

Als er in de toekomst suppleties op de meer benedenstroomse Rijntakken gepland worden, zoals de Waal, wordt aanbevolen om deze weer uitgebreid te monitoren. 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 sedimentgolven) kan bij fijner sediment afwijken.

Inhoud

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting | 4 |
| 1 | Inleiding | 10 |
| 1.1 | Aanleiding | 10 |
| 1.2 | Achtergrond van de suppletieproef | 10 |
| 1.3 | Korte beschrijving van de suppletie | 11 |
| 1.4 | Doelstellingen van de eindevaluatie | 12 |
| 1.5 | Leeswijzer | 12 |
| 2 | Afwegingen voor ontwerp en monitoring van de suppleties | 14 |
| 2.1 | Ontwerp | 14 |
| 2.1.1 | Locatie | 14 |
| 2.1.2 | Geometrie en volume | 14 |
| 2.1.3 | Samenstelling | 18 |
| 2.1.4 | Samenvatting klanteisenspecificatie | 19 |
| 2.2 | Monitoring | 20 |
| 2.2.1 | Bodempelingen | 20 |
| 2.2.2 | Bodemmonsters | 20 |
| 2.2.3 | Monitoring van het tracer materiaal | 22 |
| 2.2.4 | Waterstanden, afvoermetingen en verhanglijnen | 23 |
| 2.2.5 | Stroomsnelheden en afvoeren | 24 |
| 2.2.6 | Bagger- en stortactiviteiten en gebruik van de vaarweg | 24 |
| 3 | Achterliggende studies | 25 |
| 4 | Effect op de bodemligging | 26 |
| 4.1 | Onderzoeksvragen | 26 |
| 4.2 | Aanpak | 26 |
| 4.3 | Gebruikte gegevens | 27 |
| 4.4 | Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-Rijn: grootschalige trends | 28 |
| 4.4.1 | Voorafgaand aan de suppleties en de aanleg van de vaste laag bij Spijk | 28 |
| 4.4.2 | Na aanleg van de vaste laag bij Spijk en voor de eerste suppletie | 29 |
| 4.4.3 | Tijdens de eerste suppletie | 31 |
| 4.4.4 | Tussen de aanleg van de eerste en tweede suppletie | 32 |
| 4.4.5 | Tijdens en na aanleg van de tweede suppletie | 37 |
| 4.5 | Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-Rijn: kleinschaligere dynamiek | 42 |
| 4.6 | Invloed van locatie-specifieke condities | 44 |
| 4.6.1 | Lokale stromingscondities bij hoogwater | 44 |
| 4.6.2 | Lokale oeverbelijning | 45 |
| 4.6.3 | Vaargeulonderhoud | 48 |
| 4.6.4 | Scheepvaart | 48 |
| 4.6.5 | Afpleisteringen | 50 |
| 4.6.6 | Erosiegevoelige lagen in de ondergrond | 52 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.7 | Conclusie: netto invloed van de suppleties | 52 |
| 4.8 | Prognose toekomstige invloed van de suppleties | 53 |
| 5 | Effect op de bodemsamenstelling | 54 |
| 5.1 | Onderzoeksvragen | 54 |
| 5.2 | Ontwikkelingen van de bodemsamenstelling op de Boven-Rijn | 54 |
| 5.2.1 | Invloed van morfodynamiek op bodemsamenstelling | 54 |
| 5.2.2 | Ontwikkeling bodemsamenstelling in tijd en plaats | 61 |
| 5.2.3 | Samenstelling van het gesuppleerde materiaal en invloed van storten | 68 |
| 5.3 | Conclusies | 70 |
| 6 | Effect op waterstanden | 73 |
| 6.1 | Onderzoeksvragen | 73 |
| 6.2 | Ontwikkelingen in de gemeten waterstanden | 73 |
| 6.3 | Invloed van de suppleties op waterstanden volgens modelberekeningen | 79 |
| 6.4 | Conclusies | 80 |
| 7 | Numerieke modellering | 81 |
| 7.1 | Doel | 81 |
| 7.2 | Modelopzet in Delft3D-4 | 82 |
| 7.2.1 | Basismodel | 82 |
| 7.2.2 | Hydrograaf hindcast en prognose | 84 |
| 7.2.3 | Implementatie 2016- en 2019-suppletie | 85 |
| 7.2.3.1 | 2016-suppletie | 85 |
| 7.2.3.2 | 2019-suppletie | 86 |
| 7.2.3.3 | Initiële menging suppletie | 89 |
| 7.2.4 | Baggeren en storten | 90 |
| 7.2.5 | Uitgevoerde berekeningen | 91 |
| 7.3 | Vaste laag Spijk | 92 |
| 7.4 | Modelprestatie op basis van hindcast | 95 |
| 7.4.1 | Reeds in eerdere studies uitgevoerde validaties | 95 |
| 7.4.2 | Bekende tekortkomingen in toegepast Delft3D-model | 95 |
| 7.4.3 | Tijdsontwikkeling effect suppletie in model | 98 |
| 7.4.4 | Vergelijking met bodempeilingen | 101 |
| 7.4.5 | Vergelijking met gegevens Medusa | 108 |
| 7.4.6 | Baggervolumes | 110 |
| 7.4.7 | Conclusie modelprestatie o.b.v. hindcast | 111 |
| 7.5 | Prognose: gegevens t.b.v. effect suppleties op rivierfuncties | 113 |
| 7.5.1 | Bodemligging en verplaatsing suppletiemateriaal lange termijn | 113 |
| 7.5.2 | Baggervolumes | 116 |
| 7.5.3 | Waterdiepte (in relatie tot de norm) | 117 |
| 7.5.4 | Stroombeeld | 119 |
| 7.5.5 | Verval Lobith/Pann. Kop | 121 |
| 8 | Conclusies en aanbevelingen | 122 |
| 8.1 | Geobserveerde dynamiek van de suppleties | 122 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 8.2 | Geobserveerde invloed op bodemligging, -samenstelling en waterstanden | 122 |
| 8.3 | Prognose toekomstige invloed van de suppleties | 123 |
| 8.4 | Prestatie van het numerieke model | 124 |
| 8.5 | Aanbevelingen voor toekomstige suppleties op de Boven-Rijn en andere riviertakken | 125 |
| 8.6 | Aanbevelingen voor verdere kennisontwikkeling over suppleties, ook op andere riviertakken | 126 |
| 9 | Literatuurverwijzingen | 127 |
| A | Monitoringsplan | 130 |
| B | Beschikbare gegevens | 131 |
| B.1 | Bodempelingen | 131 |
| C | Analyse radiometrische metingen (Koolstra, 2020b) | 132 |
| D | Bodemsamenstelling | 137 |
| D.1 | Figuren samenstelling van de suppleties (bakmonsters) | 137 |
| D.1.1 | 1 ^e suppletie 2016 | 137 |
| D.1.2 | 2 ^e suppletie 2019 | 138 |
| D.2 | Figuren bodemsamenstelling | 138 |
| D.3 | Figuur locaties van bemonstering | 145 |

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.

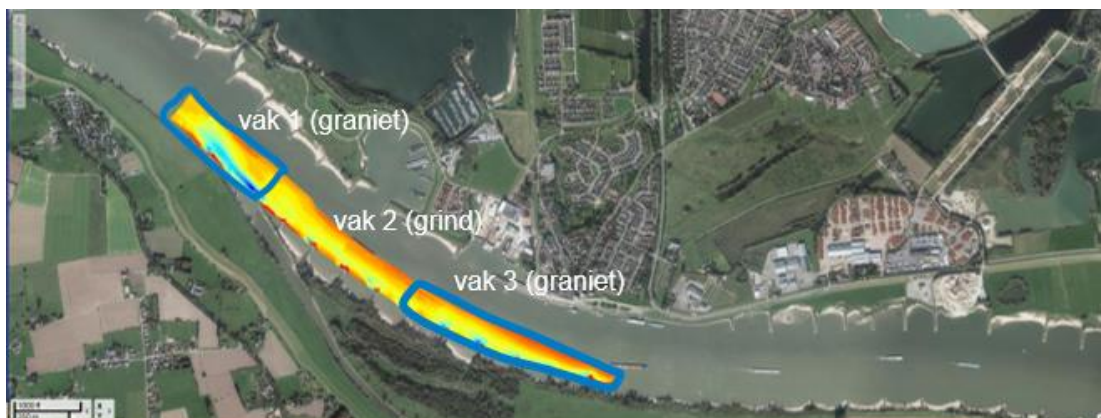
1.3 Korte beschrijving van de suppletie

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).

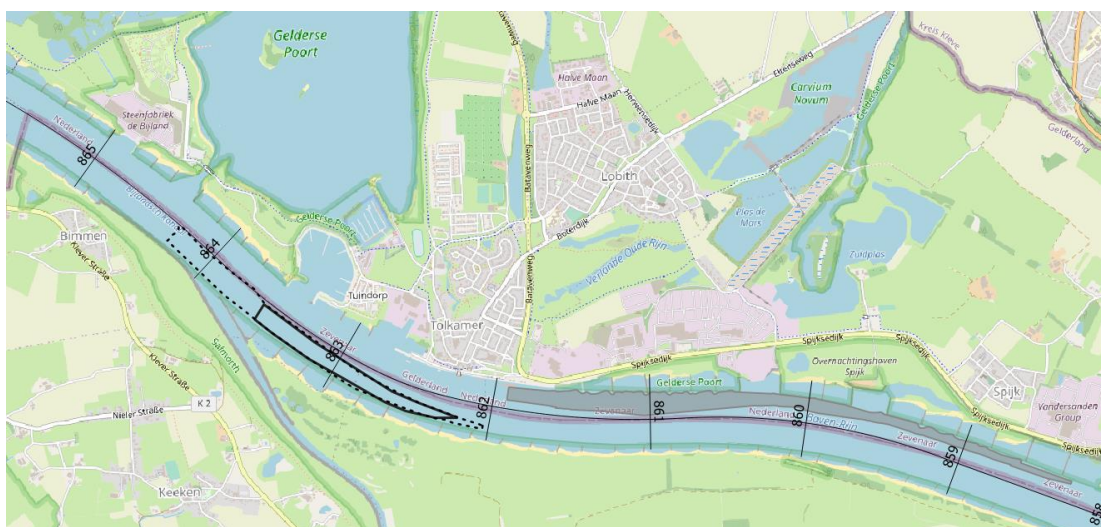
Het eerste deel van de suppletie is in 2016 uitgevoerd als een aaneengesloten, relatief dunne constante stortlaag van 0,3 m dikte op de rivierbodem onder OLR-4,0 m. Deze vorm is gekozen om te onderzoeken of hierdoor versterking van ondiepten stroomafwaarts van de suppletie kan worden voorkomen. Om de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



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

1.4 Doelstellingen van de eindevaluatie

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

Daarbij moeten de volgende vragen worden beantwoord:

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

1.5 Leeswijzer

De afwegingen voor het ontwerp en monitoring van de suppleties (vraag a) worden beschreven in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de beschikbare monitoringsgegevens en reeds uitgevoerde studies.

Hoofdstukken 4 tot en met 7 beantwoorden de vraag welke effecten door de suppleties zijn ontwikkeld en wat nog kan worden verwacht (vraag c). Daarbij worden eerst de invloeden op de bodemligging (hoofdstuk 4), de bodemsamenstelling (hoofdstuk 5) en de waterstanden (hoofdstuk 6) die sinds de aanleg van de suppleties zijn waargenomen beschreven op basis van een analyse van beschikbare monitoringsgegevens. Daarnaast wordt een prognose gegeven van de verwachte toekomstige ontwikkelingen en invloeden. Deze is gebaseerd op numerieke modelberekeningen. Hoofdstuk 7 presenteert het numeriek model en de resultaten. De onderzoeksvragen b, d en e worden in volgende rapporten beantwoord.

Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 8.

2 Afwegingen voor ontwerp en monitoring van de suppleties

Dit hoofdstuk beschrijft hoe en met welke afwegingen de suppleties zijn ontworpen (zie paragraaf 2.1) en gemonitord (zie paragraaf 0).

2.1 Ontwerp

2.1.1 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.

2.1.2 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 2.

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.

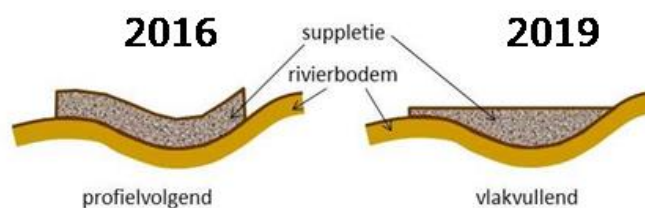
Een analyse van de beschikbare ruimte door Oost-Nederland District Zuid heeft uitgewezen dat er met onder meer deze criteria in de buitenbocht bij Lobith ongeveer 90.000 m³ materiaal gestort kon worden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS-ON, 2013).

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 4) 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 profielvullend aan te leggen door de buitenbocht op te vullen tot een vaste hoogte, namelijk OLR-3,7 m¹, 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 1 staan. In deze tabel staan ook de uiteindelijke conclusies over de aannemelijkheid. Conclusie was dat de mechanismen het verschil in volume niet volledig

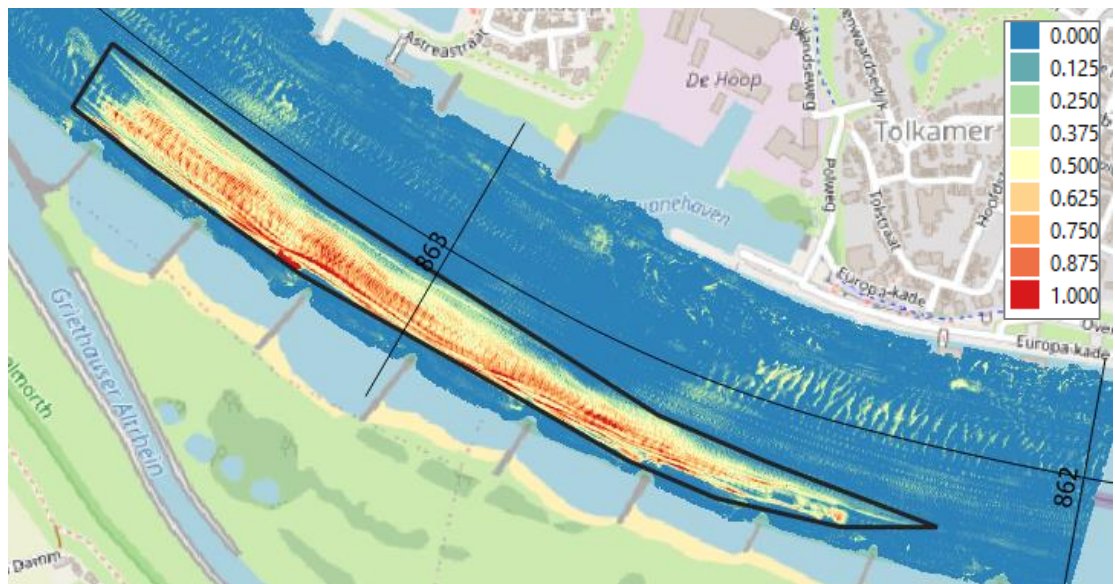
¹ Met enige marge, om de aannemer voldoende vrijheid in de uitvoering te laten. Een vergelijking van bodempeilingen voor en na het plaatsen van de suppletie laten zien dat er opgevuld is tot een hoogte tussen OLR-4,0 m en OLR-4,30 m. De aangebrachte laagdikte ligt op de meeste plekken tussen 50 en 70 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.

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 1 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 D.1). |
| erosie van de oorspronkelijke bodem door het storten | Dat materiaal zou dan vlakbij zichtbaar moeten zijn geworden. |
| verdichting van de oorspronkelijke rivierbodembodem door het gewicht van de suppletie | Niet aannemelijk, het gewicht van het aangebrachte zand-grind-mengsel is naar verachting niet groot genoeg hiervoor. |
| klink van het aangebrachte materiaal door gewicht van er bovenop aangebrachte lagen | Aannemelijk, maar kan hooguit een volumereductie van orde 7% verklaren. |
| Zetting van de oorspronkelijke rivierbodembodem | Beetje aannemelijk. Maar zou hooguit voor een volumereductie van orde 1% zorgen, uitgaande van losgepakt zand in de oorspronkelijke bodem. |

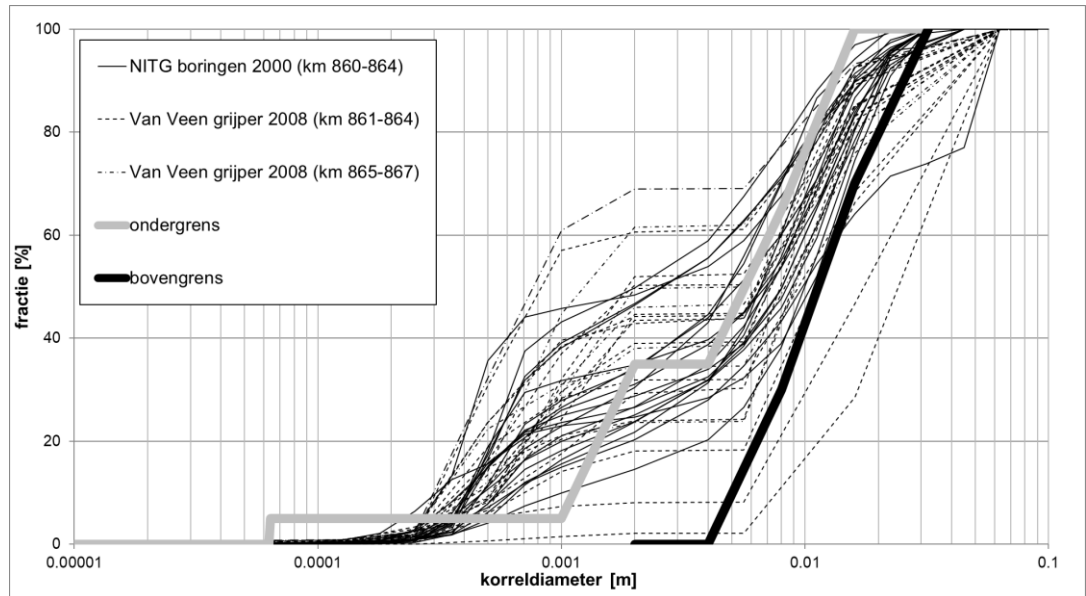
N.B.: Het verschil tussen verdichting/klink/zetting is niet heel eenduidig. Meestal wordt de term klink gebruikt voor de zakking van aangebracht materiaal onder het eigen gewicht, de term verdichting voor het kunstmatig (of door aardbevingen) verkleinen van het porie volume in het zand, en de term zetting 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. Deze dikte is ook gebruikt in de modelberekeningen (zie hoofdstuk 7).

2.1.3 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 rivierbodembodem. 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 tracer materiaal (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 (zie ook paragraaf 0). Voor de tweede suppletie is uitgezeefd materiaal gebruikt dat vrijkwam bij de winning van bruinkool.

2.1.4 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 2 wijst op verschillen tussen de eerste en tweede suppletie.

Tabel 2 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 | max. 70,000 m³ | min. 70,000 m³ |
| | 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. | |

2.2 Monitoring

Om te kunnen leren hoe effectief suppletie is voor het ondersteunen van de rivierbodemplugging 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 (bodemplugging 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.

2.2.1 Bodempeilingen

De suppleties beïnvloeden direct de bodemplugging. 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, 2020).

De momenten van de gebruikte peilingen zijn weergegeven in Figuur 9 (rode stippen) en Annex B.1 (als weeknummers en jaar).

2.2.2 Bodemmonsters

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

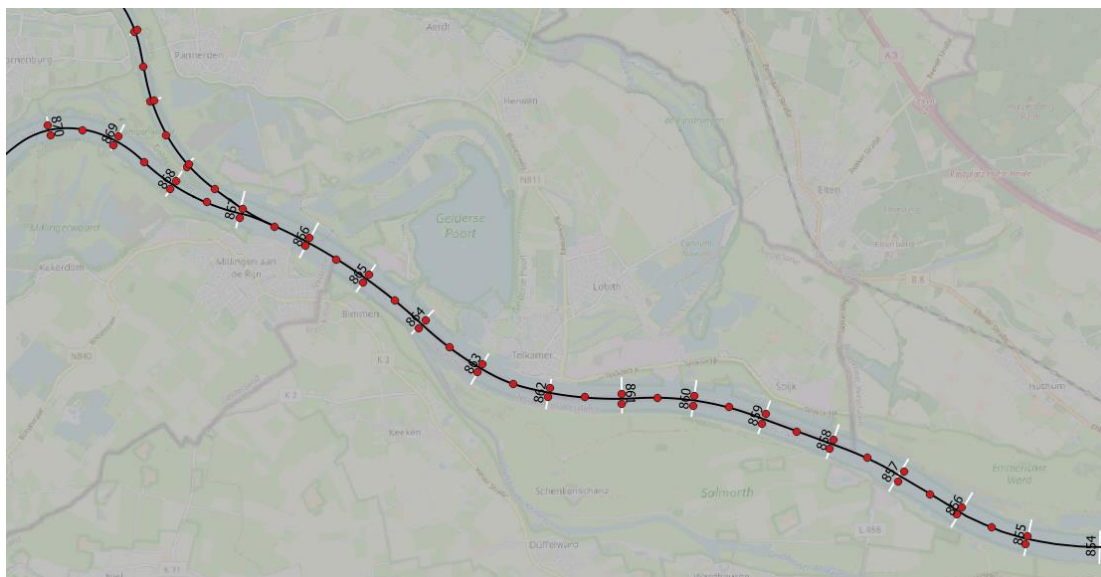
In het kader van de suppletieproef zijn daarom voor aanleg van de eerste suppletie, in maart 2016, en na aanleg van de suppletie jaarlijks monsters uit de bovenste 10 cm van de bodem genomen. De monsters zijn genomen tussen rkm 855 en 870 op drie langsgaaien, namelijk op de rivieras en op 70 m afstand rechts en links van de as. Figuur 6 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 6 Locatie van de bodemonsters die in het kader van het suppletieproject zijn genomen.

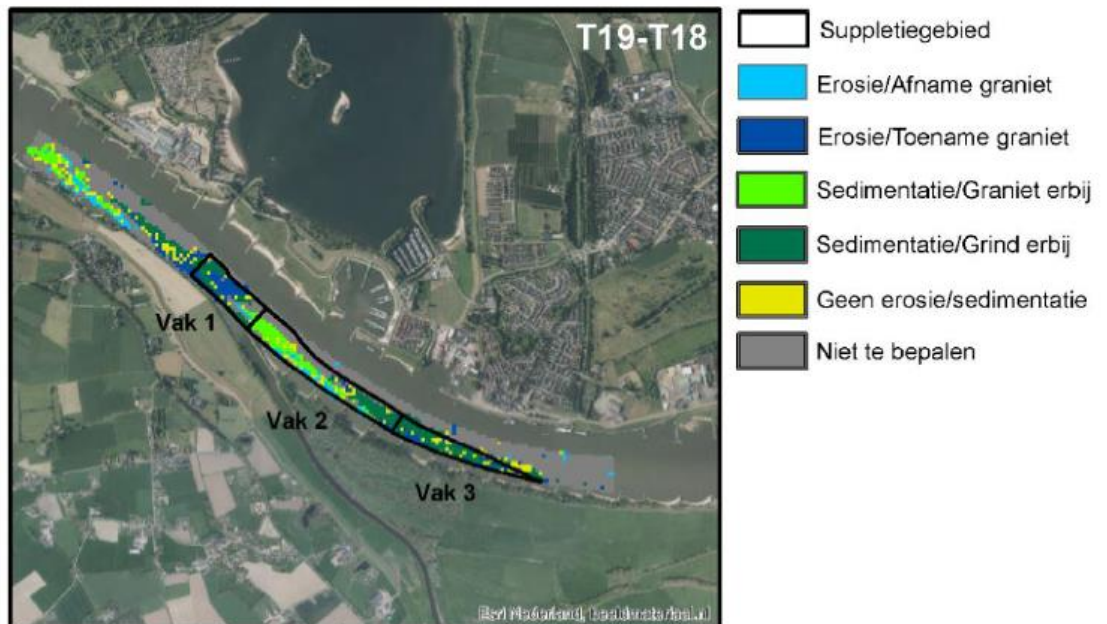
2.2.3 Monitoring van het tracermateriaal

Het graniet dat als tracermateriaal is gebruikt heeft een hogere natuurlijke radioactiviteit dan het natuurlijke sediment in de Boven-Rijn. Om de beweging van het tracermateriaal 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 rivierbodembodem (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 7.



Figuur 7 Voorbeeld van een kaart die de verplaatsing van het tracer materiaal 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).

2.2.4 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 3 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 3 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 |

2.2.5 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.

2.2.6 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 CoVadem² 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.

² www.covadem.com

3 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 4 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 4 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. |
| Niessen 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 Niessen et al. (2017) en op aanvullende berekeningen met het model van Niessen 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. |

4 Effect op de bodemligging

4.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk 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 (§ 4.4.1 en § 4.4.2), tijdens en na de uitvoering van elk suppletiedeel (zowel 2016 als 2019: § 4.4.3 t/m § 4.4.5)?
- 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: §4.4.2)?
- 3 Welk deel van deze ontwikkelingen kan worden toegeschreven aan de volgende locatie-specifieke condities:
 - a Lokale stromingscondities bij hoogwater (§ 4.6.1),
 - b de lokale oeverbelijning (lokale aansluiting bodem bij de teen van oevers en kribben) in het suppletietraject (§ 4.6.2),
 - c vaargeulonderhoud (§ 4.6.3) of, indien relevant, de invloed van schepen (§ 4.6.4),
 - d eventuele afpleistering van de toplaag of juist de afwezigheid daarvan (§ 4.6.5),
 - e de aanwezigheid van erosiegevoelig sediment in de ondergrond? (§ 0)
- 4 Welk deel van deze ontwikkelingen is door de suppleties zelf veroorzaakt? (§ 4.7)
- 5 Hoe ontwikkelen de effecten van de suppleties op de bodemligging zich naar verwachting in de toekomstige jaren? (§ 4.8)

4.2 Aanpak

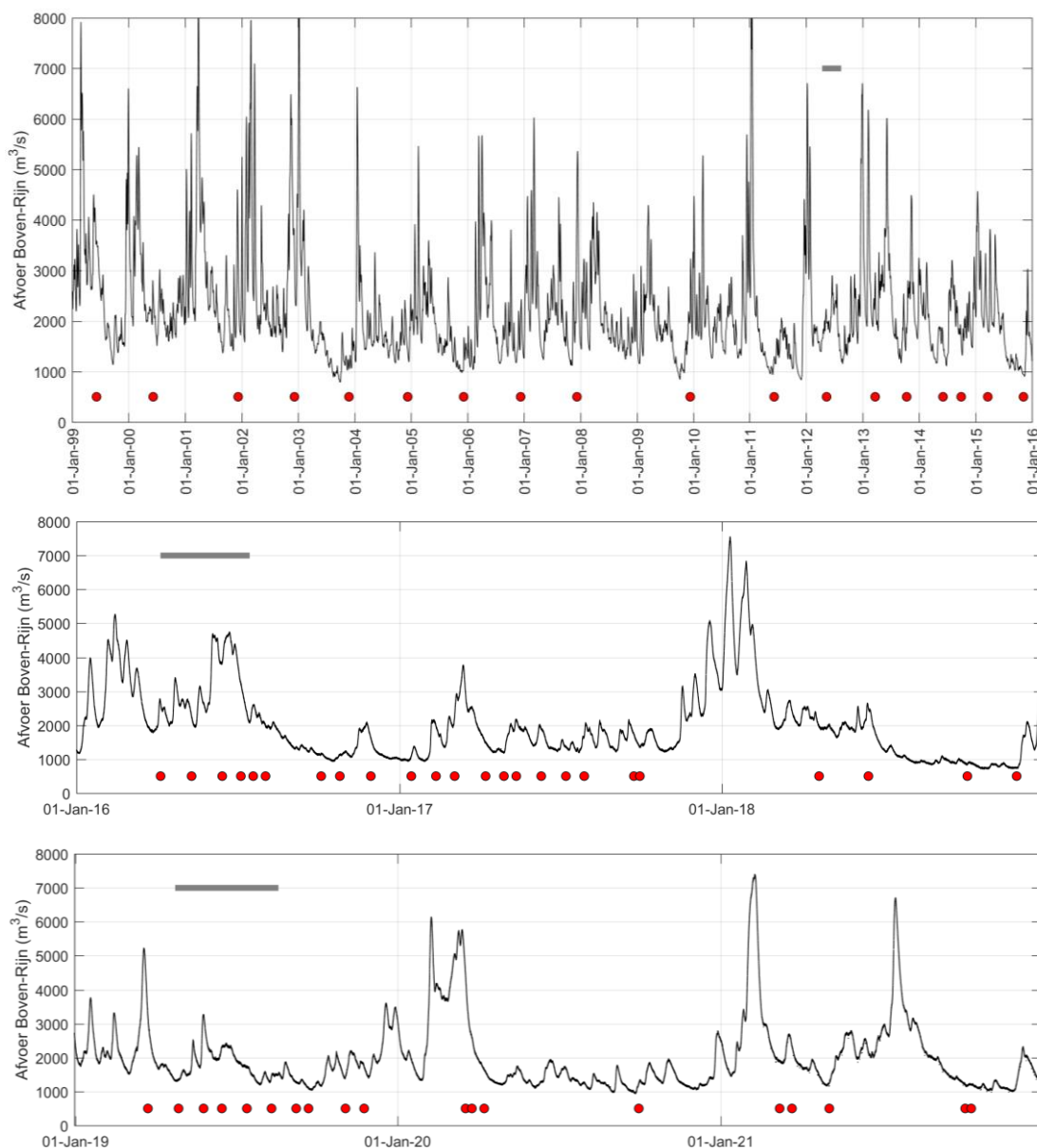
De beschikbare bodempeilingen (§ 2.2.1) zijn door RWS verwerkt tot tif-bestanden van absolute bodemligging en het verschil in bodemligging t.o.v. voor en na de suppleties. Vervolgens zijn de bodemhoogtes door RWS binnen de cellen van een curvilineair rooster met cellen van ongeveer 20 m bij 20 m gemiddeld met behulp van PMAP (Figuur 8). 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 tot 120 m rechts van de as, en opgesplitst in de rechter- en linkerhelft van dat bereik), en zijn deze verder verwerkt tot kilometer-gemiddelde waarden. De kaarten en langsraaien zijn vervolgens geanalyseerd om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Daarbij is het traject tussen rkm 858 en rkm 870 bekeken.



Figuur 8 Curvilineair rooster (wit) en rivieras en rivierkilometers (zwarte) op de Boven-Rijn. Rechts boven: detail.

4.3 Gebruikte gegevens

Voor deze evaluatie zijn de peilingen zoals beschreven in paragraaf 2.2.1 gebruikt, behalve de beheerpeilingen, omdat deze alleen de vaargeul omvatten. Figuur 9 toont de momenten van de gebruikte bodempeilingen samen met de geobserveerde afvoer.



Figuur 9 Afvoerhydrograaf (Lobith) en momenten van de gebruikte bodempeilingen (rode stipfels). 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.

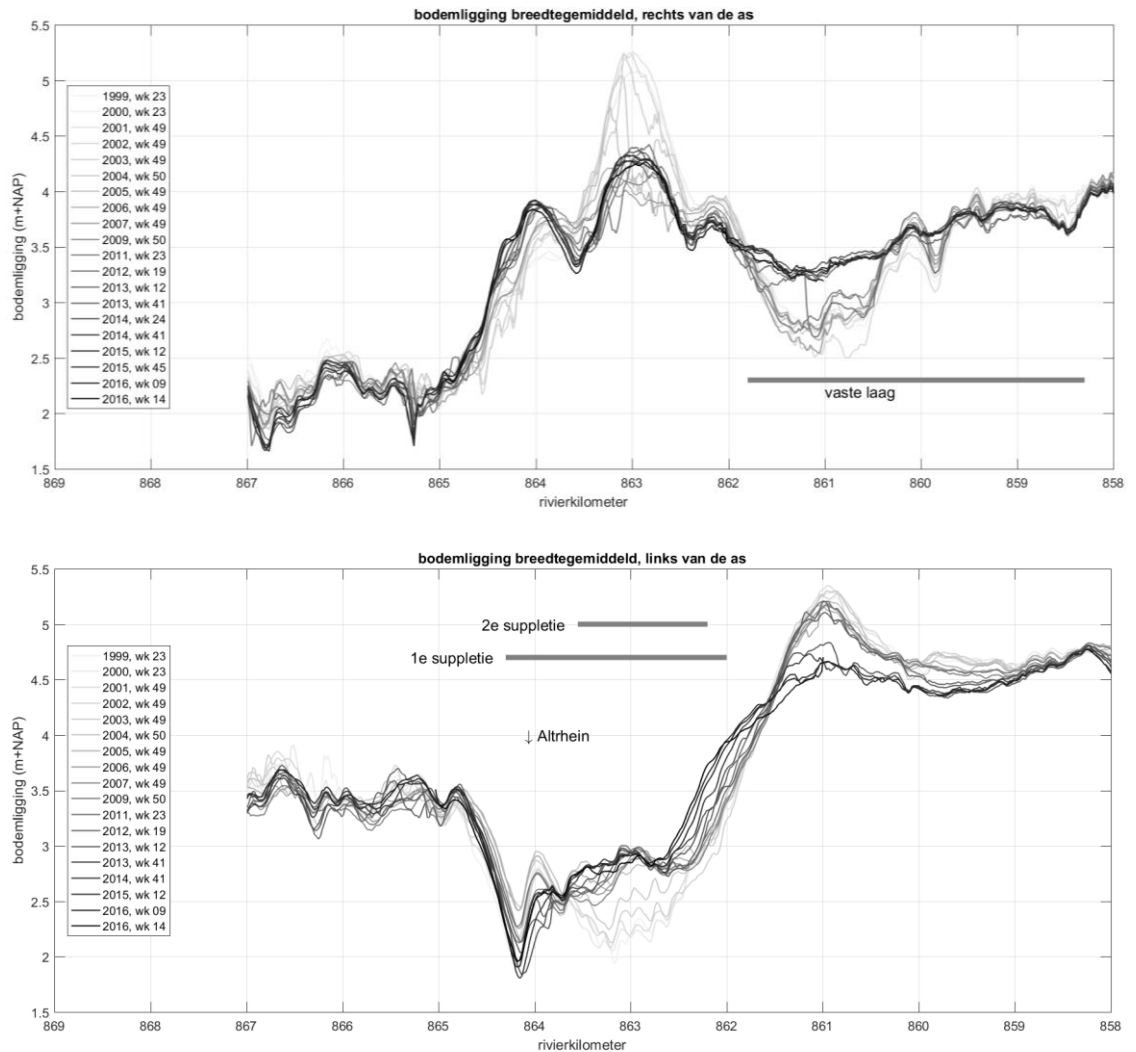
4.4 Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-Rijn: grootschalige trends

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

Figuur 10 laat de bodemontwikkeling op de Boven-Rijn vóór aanleg van de suppleties zien (1999 t/m 2016). Voor aanleg van de vaste laag in 2012 is er een diepe buitenbocht te zien aan de rechterkant van de rivier tussen rkm 860,3 en 861,8. De bodem in de binnenbocht ligt gemiddeld orde 2,5 m hoger. Bij ongeveer rkm 862 vindt de overgang naar een volgende bocht plaats, bij rkm 863 ligt de bodem aan de rechterkant ruim 2,5 m hoger dan aan de linkerkant. Bij rkm 864 volgt nog een bochtovergang, het bodemhoogteverschil tussen rechts en links is tot aan de Pannerdensche Kop echter kleiner (orde 1 m).

Wel bevindt zich hier aan de linkerkant van de rivier bij Millingen nog een locatie die door de scheepvaart als ondiep wordt ervaren (rkm 865,5).

Benedenstrooms van rkm 865 is in Figuur 10 geen trend in de bodemligging te herkennen. 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, mogelijk is hier ook regelmatig gebaggerd. De diepe buitenbocht ernaast, waar later de suppleties zijn geplaatst, is in die tijd geleidelijk deels opgevuld, mogelijk is hier gebaggerd sediment gestort. Bovenstrooms van rkm 859 is de bodemligging in deze periode relatief stabiel.



Figuur 10 Bodemligging 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).

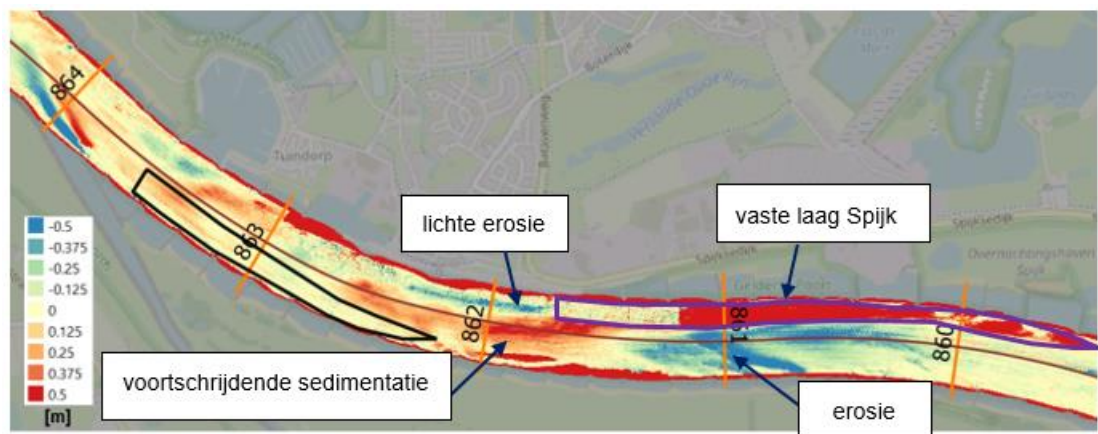
4.4.2 Na aanleg van de vaste laag bij Spijk en voor de eerste suppletie

De vaste laag bij Spijk is in 2012 aangelegd tussen rkm 858,5 en 862,7 aan de rechterkant van de rivier (paarse polygoon in Figuur 11). Bij de peiling van week 19 in 2012 is te zien dat de vaste laag op dat moment deels aangelegd was (Figuur 10 boven), dit is de donkergrijze lijn (rechts van de as) met een grote sprong in bodemhoogte bij rkm 861,2.

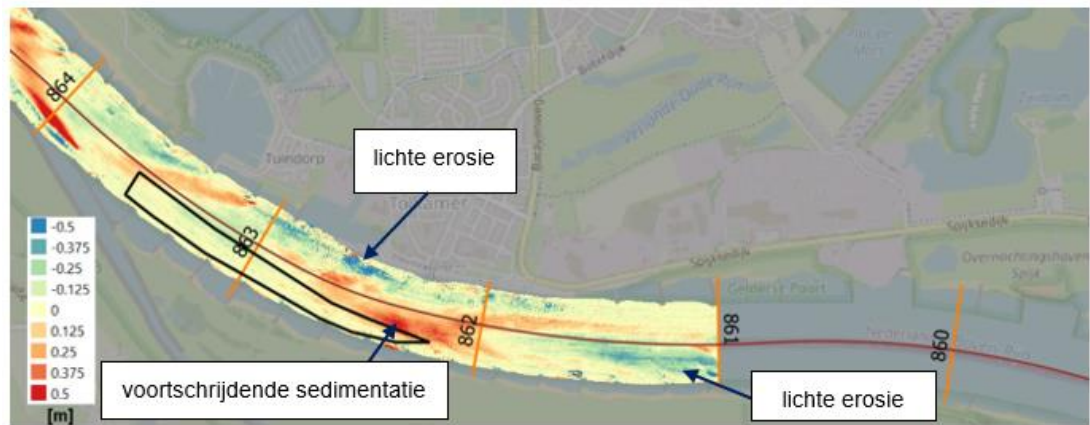
Bovenstrooms van die locatie is de buitenbocht al opgevuld naar de nieuwe hoogte, benedenstrooms nog niet. Voorafgaand aan de aanleg van de vaste laag is er in de diepe buitenbocht geen duidelijke trend in de ontwikkeling van de bodemligging te herkennen. Hetzelfde geldt voor de bodem naast de vaste laag, links van de rivieras. Door de aanleg wordt de diepe buitenbocht opgevuld met grof materiaal dat niet weer kan eroderen. Daardoor blijft de bodemligging aan de rechterkant van de rivier na aanleg stabiel. Als reactie op de vaste laag schuurt de bodem in de ondiepe binnenbocht (linkerkant) in de jaren na aanleg uit. Dit is te zien in de breedtegemiddelde langsprofielen in Figuur 10 en in de kaarten in Figuur 11 en Figuur 12. Deze figuren laten ook zien dat het grootste deel van de aanpassing aan de nieuwe situatie direct in het eerste jaar na aanleg plaatsvindt. Tussen 2013 (week 41) en 2016 (week 9) is de verandering in de bodemligging duidelijk kleiner (Figuur 12), en tussen 2015 en 2016 verandert de bodemligging nauwelijks (Figuur 10).

Benedenstrooms van de vaste laag is aan de rechterkant erosie te zien en loopt aan de linkerkant van de rivieras een sedimentatiegolf naar benedenstrooms. De sedimentatiegolf loopt met een snelheid van ongeveer 70 m per jaar (in jaren van relatief lage afvoer) het suppletiegebied in, dit gaat door na aanleg van de eerste suppletie (Figuur 14 en Figuur 10). 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 aanleg van de suppleties realiseert dus een reeds in het gebied aanwezige trend tot sedimentatie gedeeltelijk of in zijn geheel. Dat betekent dat de suppleties (gedeeltelijk of geheel) niet stroomafwaarts gaan verplaatsen, omdat ze niet als verstoring van de bodemligging acteren. Het numerieke model voorspelt een evenwichtseffect van de vaste laag van maximaal 1 m sedimentatie op de suppletielocatie (zie paragraaf 7.3). In werkelijkheid zal dit effect niet exact met de modelberekening overeenkomen, maar wel qua orde grootte. Er kan dus verwacht worden dat een belangrijk deel van de suppleties blijft liggen op de locatie van aanleg.

De erosie naast en benedenstrooms van de vaste laag wordt langzamer na het eerste jaar na aanleg, maar de passage van een hoogwater lijkt deze effecten weer te versterken. Dit is in Figuur 14 te zien voor het hoogwater van januari 2018.



Figuur 11 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.

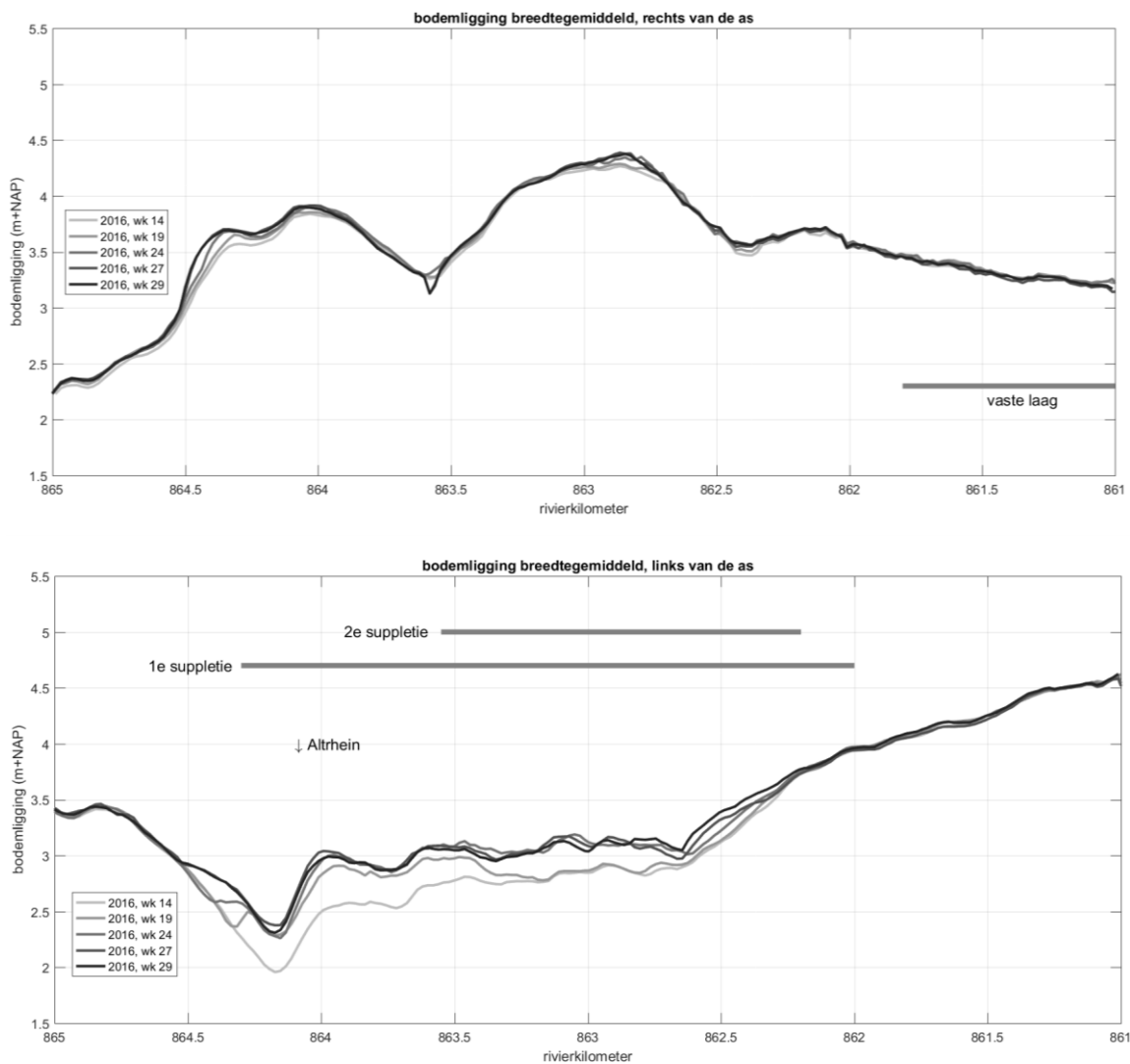


Figuur 12 Bodemhoogteverschil voorafgaand aan de suppletie, tussen 2016 (week 9) en 2013 (week 41) bij de vaste laag bij Spijk.

4.4.3 Tijdens de eerste suppletie

Figuur 13 laat de bodemontwikkeling, gemiddeld over de breedte rechts en links van de rivieras, tijdens de aanleg van de eerste suppletie zien (2016 week 14 t/m week 29, met een onderbreking van 5 weken vanwege een klein hoogwater). Week 19 is van half mei, voor de onderbreking in de aanleg vanwege een klein hoogwater met piekafvoer van ongeveer $4.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Week 24 en 27 zijn tijdens die hoogwaterpiek. Aan de rechterkant van de rivier ontstaat naast de suppletie een kleine erosiekuil bij rkm 863,6. Aan de linkerkant is te herkennen dat de suppletie in week 19 nog niet volledig is aangebracht, en dat het kleine hoogwater een verandering van de bodemligging bij de front van de suppletie veroorzaakt. 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 van het ontstaan van het 2D-patroon als reactie op de suppletie. 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.

De 2D reactie in de bodem wordt nader beschreven in paragraaf 4.4.4. De resultaten van de analyse van Koolstra (2020b) worden (in kort) gepresenteerd in Bijlage C.



Figuur 13 Bodemligging tijdens de aanleg van de eerste 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.

4.4.4 Tussen de aanleg van de eerste en tweede suppletie

In het eerste jaar na de suppletie 2016 blijft de afvoer op de Boven-Rijn grotendeels onder de 2.000 m³/s. Niesten et al. (2017) geven aan dat er in het eerste jaar “na aanbrengen van de suppletie [...] weinig dynamiek zichtbaar [is], onder meer door het ontbreken van hoge afvoeren. [...] Direct benedenstrooms van de suppletie ontstaat aan de overkant van de rivier een verhoging van de bodem van orde 30-40 cm.”

Tevens noemen Niesten et al. (2017) een voortplantingssnelheid van de suppletiefront. Bij nader inzien lijkt die “verplaatsing” van de front echter het ontstaan van de bult benedenstrooms aan de overkant van de rivier te zijn, deze twee fenomenen zijn niet makkelijk uit elkaar te houden (zie ook paragraaf 4.4.3). De afvoer is ook in die periode grotendeels onder de 2.000 m³/s gebleven.

In de laagwaterperiode na aanleg van de eerste suppletie vult de diepe kuil bij de monding van de Griethauser Altrhein weer deels op (Figuur 14, onder, bij rkm 864,1), en door het hoogwater van januari 2018, met een piekafvoer van meer dan 7.500 m³/s, schuurt deze weer uit.

Figuur 15 toont dit als kaart van de bodemveranderingen tussen het moment voor aanleg van de eerste suppletie en de laatste peiling voor het hoogwater 2018. Er ontstaat een tweedimensionale morfologische reactie, die zich het best laat vergelijken met een geforceerd alternerend bankenpatroon. 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).

Als de bodemhoogte aan het einde van de laagwaterperiode wordt vergeleken met de bodemhoogte na aanleg van de suppletie worden daarnaast

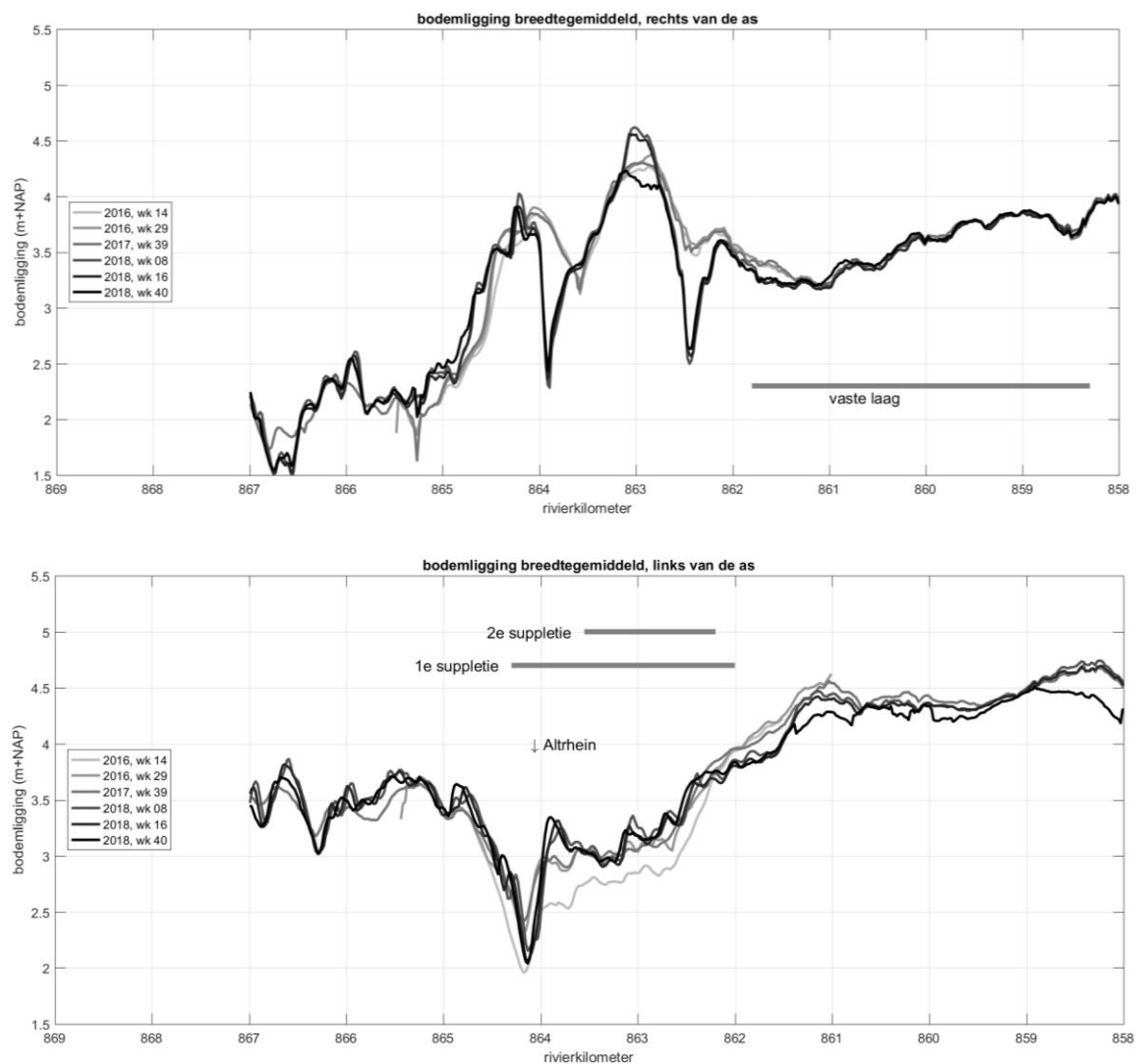
- migrerende sedimentgolven (kleiner dan de geforceerde alternerende banken) en
- het weer opvullen van de kuil bij rkm 864 met suppletiemateriaal van bovenstrooms duidelijk (Figuur 16). Ook is in Figuur 16 opnieuw de erosie naast de suppletie en benedenstrooms van de vaste laag te zien, net als de sedimentatiegolf die door de vaste laag wordt veroorzaakt.

Het hoogwater in januari 2018 laat de suppletielaag in de erosiekuil bij de monding van de Griethauser Altrhein (rkm 864) volledig eroderen (Figuur 14). Dat is ook te zien aan de afname van het radiometrische signaal dat Koolstra (2020b) constateert. Ook laat het hoogwater sedimentgolven ontstaan met een lengte van ongeveer 200 m en een amplitude van 20-30 cm vlakbij de as en 10 cm op 90 m afstand van de as (Figuur 14). Deze golven lopen na het hoogwater langzaam naar benedenstrooms. 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. In Koolstra (2020b) wordt uit de veranderingen in tracerconcentratie geconcludeerd dat tracermateriaal uit vak 1 bijna volledig stroomafwaarts verplaatst. Het tracermateriaal uit vak 3 verplaatst volgens de analyse in Koolstra (2020b) naar vakken 2 en 1, en de resterende tracer in vak 3 wordt vermengd met of afgedekt door natuurlijk bodemmateriaal. N.B.: het tracermateriaal verplaatst zich sneller (ongeveer 7 m/dag tijdens het hoogwater van 2018 volgens Koolstra, 2020b) dan de verstoring in de bodemligging. Die laatste is voor de eerste suppletie ook na de hoogwaterperiode niet goed te herkennen in de peilingen, omdat het hoogwater de hele suppletiefront in een keer erodeert (zie begin van deze alinea). En naar verwachting verplaatst de bodemverandering maar langzaam of helemaal niet vanwege de interactie met het langetermijneffect van de vaste laag bij Spijk (zie paragraaf 4.4.2).

De sedimentgolven op de suppletie zijn ook al voor het hoogwater te zien (Figuur 16).

Rechts van de rivieras ontstaan er door het hoogwater van januari 2018 twee diepe erosiekuilen bij rkm 862,4 en 863,9 (Figuur 14, boven, en Figuur 17). Dit komt doordat er lagen met grover materiaal zijn doorgebroken en onderlagen met fijner materiaal (jonge, makkelijker te eroderen, rivierafzettingen, zie ook paragrafen 4.6.5 en 0) zijn aangesneden. De eerste van deze kuilen ontstaat in het gebied benedenstrooms van de vaste laag bij Spijk, waar de vaste laag erosie veroorzaakt die door het hoogwater weer versterkt is (paragraaf 4.4.2). Voor aanleg van de vaste laag was hier ook deels erosie te zien, de vaste laag heeft het ontstaan van de kuil waarschijnlijk alleen iets versneld.

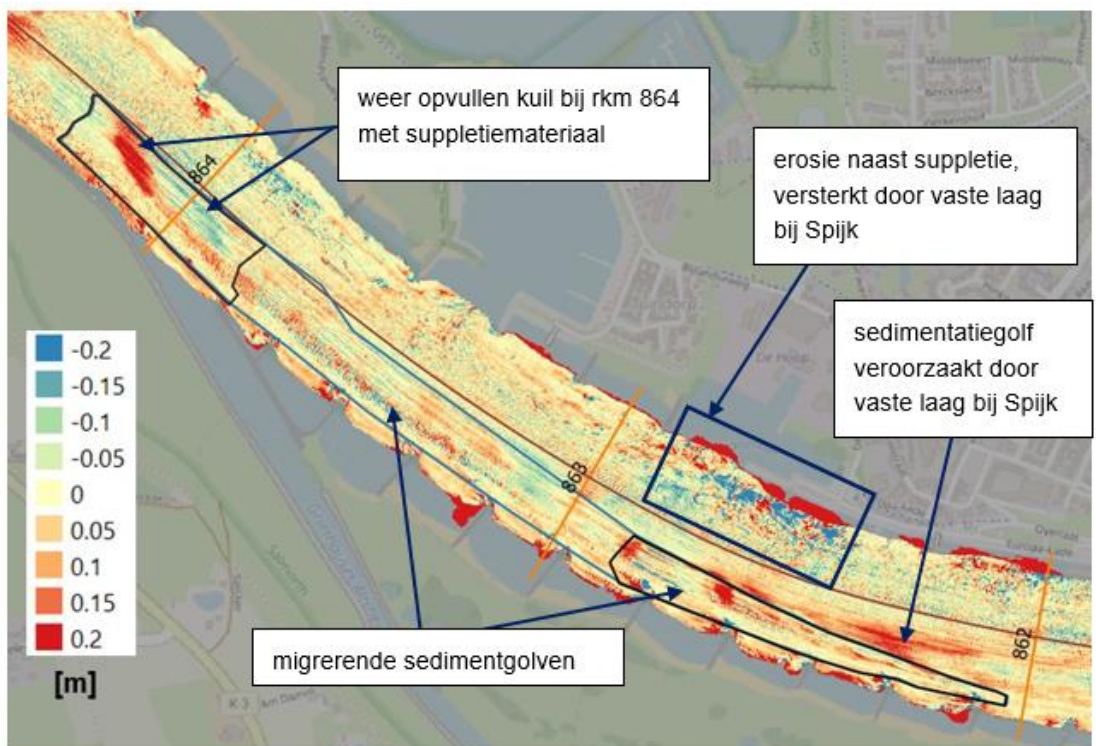
Het sediment uit de meer bovenstroomse kuil is waarschijnlijk naar rkm 863 gemigreerd en daar vervolgens verwijderd door baggeren (paragraaf 4.6.3). Het sediment uit de kuil bij rkm 863,9 migreert naar beneden in een golf met een amplitude van orde 20 cm. Net als aan de linkerkant is aan de rechterkant van de rivier na het hoogwater een grotere dynamiek in de bodem te zien dan ervoor.



Figuur 14 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 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.

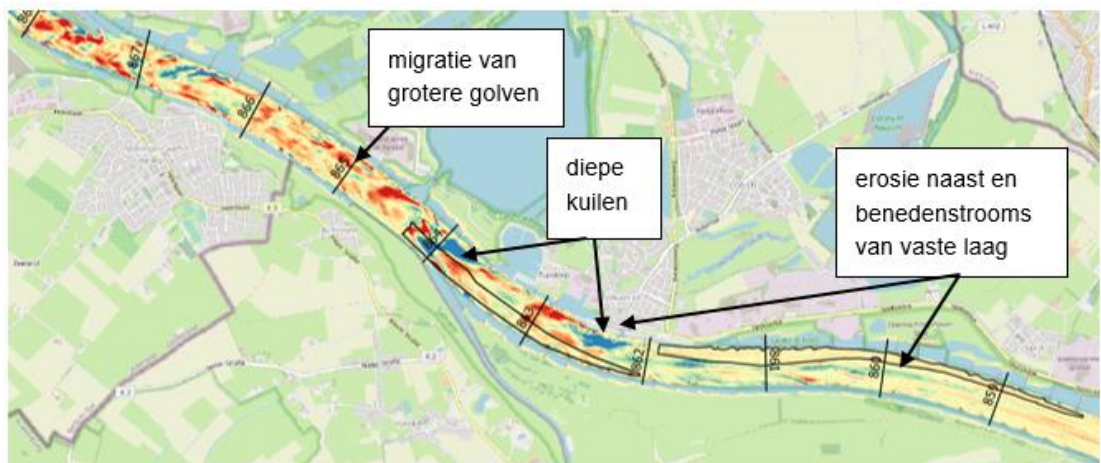


Figuur 15 Bodemhoogteverschil tussen 2017 (week 39) en 2016 (week 14), dus tussen vóór het hoogwater 2018 en voor aanleg van de eerste suppletie. De rode vlakken in de kribvakken zijn geen echte bodemveranderingen, deze ontstaan door de manier van verwerking van de bodempellingen naar een verschil, op plekken waar niet beide invoerpeilingen data bevatten.

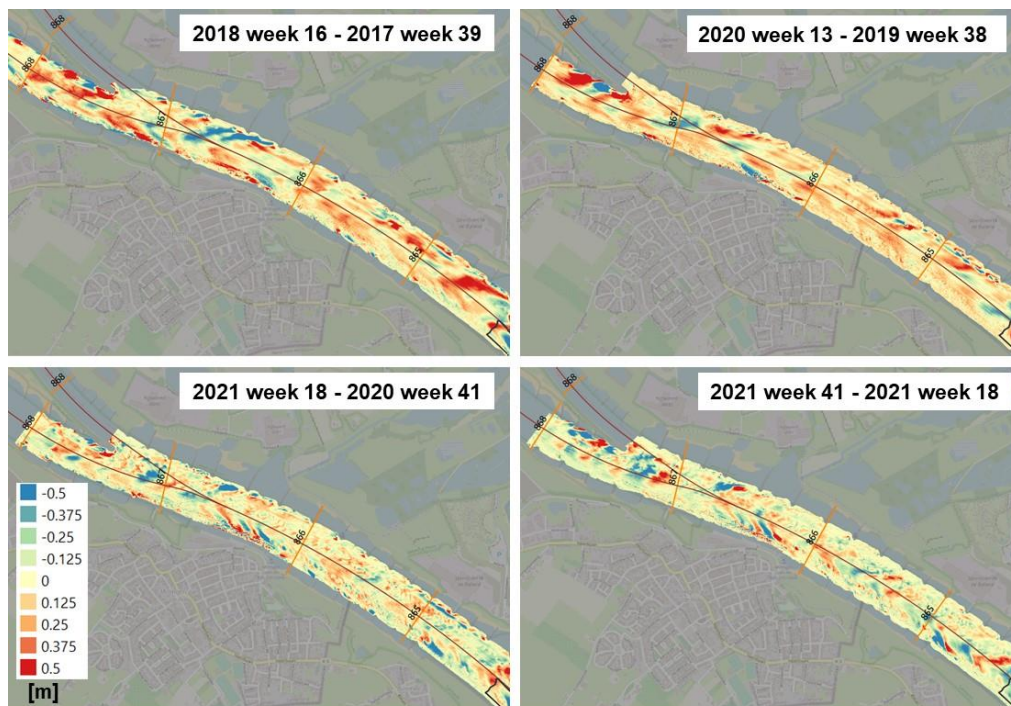


Figuur 16 Bodemhoogteverschil tussen 2017 (week 6) en 2016 (week 29). Dit was een periode van lage afvoer na aanleg van de eerste suppletie.

De kaart in Figuur 17 laat zien dat het hoogwater van 2018 benedenstrooms van rkm 862 veel meer dynamiek opwekt dan bovenstrooms. Dit komt vermoedelijk door een grotere mobiliteit van het sediment benedenstrooms. De korreldiameters 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 (zie paragrafen 5.2.1 en 5.2.2). Voor aanleg van de suppleties zijn er alleen vóór 2003 en in 2011 hoogwaters van vergelijkbare grootte opgetreden. In die tijd is er maar één peiling per jaar beschikbaar, waaruit de invloed van een enkel hoogwater niet kan worden afgeleid. Het is daarom niet mogelijk om te beoordelen in hoeverre de door hoogwater opgewekte dynamiek verschilt voor en na aanleg van de suppleties. Echter is het aannemelijk dat de grotere dynamiek benedenstrooms van rkm 862 door het hoogwater is veroorzaakt en maar beperkt, namelijk direct in de buurt van de suppleties, is beïnvloed door de suppletie zelf (bv. door golven van geërodeerd suppletiemateriaal net benedenstrooms van de suppletie). Figuur 18 toont de grote dynamiek op het traject benedenstrooms van de suppleties voor de vier hoogwaters die na aanleg van de suppleties zijn opgetreden.



Figuur 17 Bodemhoogteverschil tussen 2018 (week 8) en 2017 (week 39), dus tussen na en voor het hoogwater van 2018.



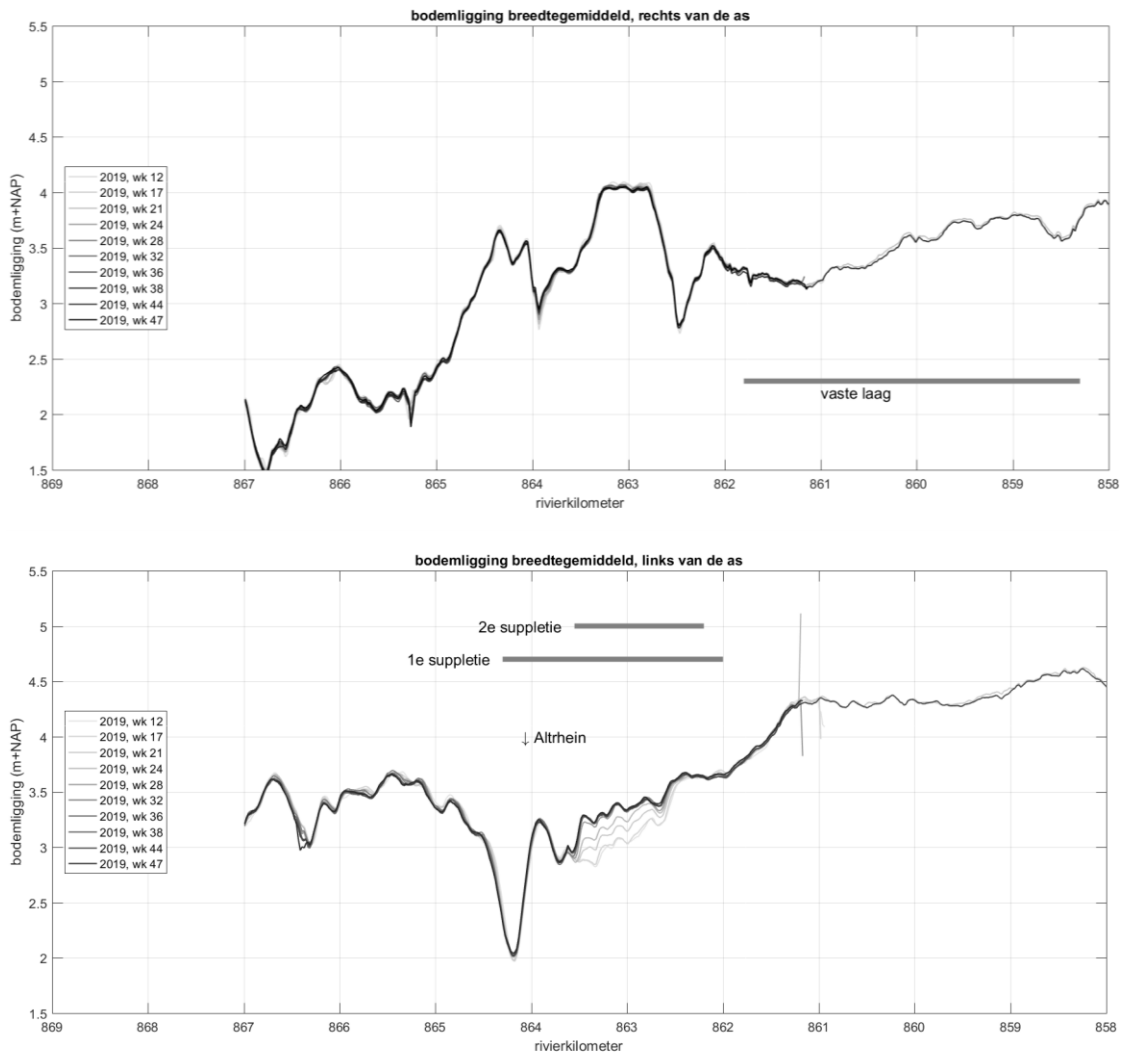
Figuur 18 Bodemhoogteverschil tussen vóór en na vier hoogwaters ter illustratie van de door hoogwater opgewekte dynamiek benedenstrooms van rkm 862.

4.4.5 Tijdens en na aanleg van de tweede suppletie

Tijdens de aanleg van de tweede suppletie (peilingen van week 17 t/m week 32 in 2019) en daarna (vanaf peiling week 38, 2019) is de bodemligging tot aan december 2019 weinig veranderd. In Figuur 19 is alleen vanwege de aanleg van deze suppletie een bodemhoogteverschil aan de linkerkant van de rivier tussen rkm 862,5 en 863,8 te zien.

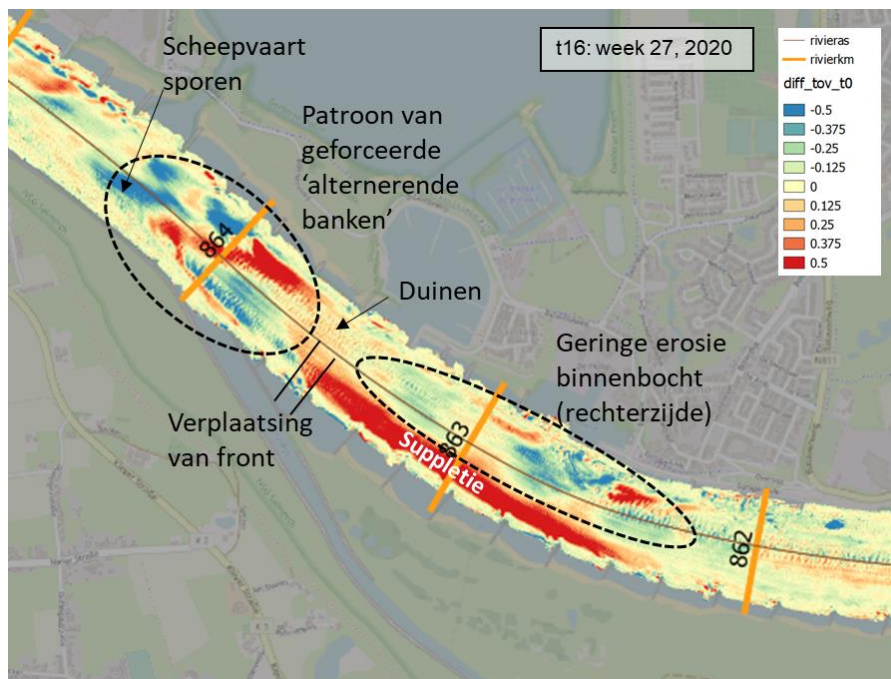
De tweede suppletie is korter dan de eerste en eindigt bovenstrooms van de diepe kuil bij rkm 864. In tegenstelling tot de eerste suppletie heeft de tweede daarom wel een duidelijk gedefinieerd front. In de periode na aanleg vindt er nagenoeg geen voortplanting van het front in de bodemligging plaats. Dit is ook al geconstateerd door Becker (2022), en dit bevestigt de eerder gemaakte constatering dat een suppletie op deze locatie pas bij afvoeren van meer dan 2.000 m³/s beweegt (Niessen et al., 2017).

Aan de linkerkant van de rivier zijn in Figuur 19 bij rkm 861 enkele uitschieters in de gemiddelde bodemligging te zien. Deze treden op bij de rand van het meetgebied en ontstaan bij het middelen over de breedte. Ze zijn dus een artefact van de verwerkingsmethode en moeten genegeerd worden.



Figuur 19 Bodemligging na aanleg van de 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 12, 2019, is van net voor aanleg van de tweede suppletie en is meegenomen als referentie. Week 38, 2019, is de eerste peiling na volledige aanleg.

Figuur 20 laat de bodemverandering na aanleg van de tweede suppletie en afloop van het hoogwater van februari/maart 2020 als kaart zien (bron: Becker, 2022). Er wordt een vergelijkbaar 2D-patroon zichtbaar als beschreven bij de eerste suppletie (paragraaf 4.4.4).



Figuur 20 Duiding van de waargenomen morfologische veranderingen tussen maart 2019 (voor de suppletie) en juli 2020 (na suppletie en hoogwaterperiode). Bron: Becker (2022).

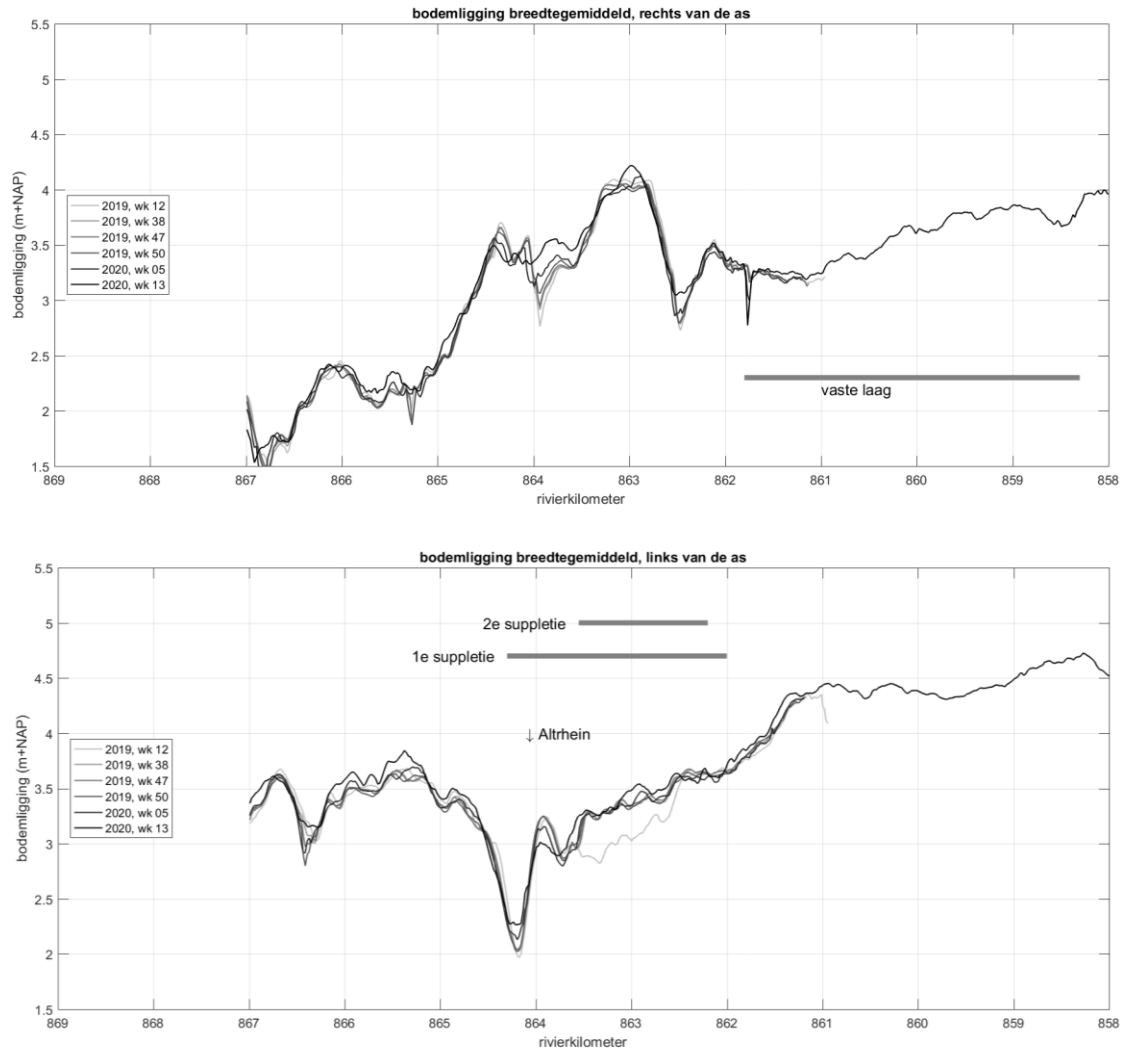
Het 2D-patroon is ook uit de langsprofielen in Figuur 21 en Figuur 22 af te leiden. In de langsprofielen en de kaarten is daarnaast gekeken hoe snel de suppletiefront naar benedenstrooms verplaatst. Becker (2022) geeft aan dat “door de eerste kleinere afvoerpiek in december 2019 de suppletie wel duidelijk beweegt, met name op de raaien vlakbij de rivieras, waar de stroomsnelheid het grootst is. 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. Op 50 m afstand links van de rivieras is de verplaatsingssnelheid ongeveer 2 m/dag over ongeveer 35 dagen door het hoogwater. Tegelijkertijd verplaatst de dynamiek aan de rechterkant van de rivieras zich maar heel weinig (0 tot 0,3 m/dag). De dikte van het front blijft ongeveer gelijk aan de dikte van de stortlaag” (Becker, 2022).

“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” (Becker, 2022). Na afloop van deze hoogwaters is ongeveer 200 m van het bovenstroomse einde van de suppletie bijna volledig geërodeerd.

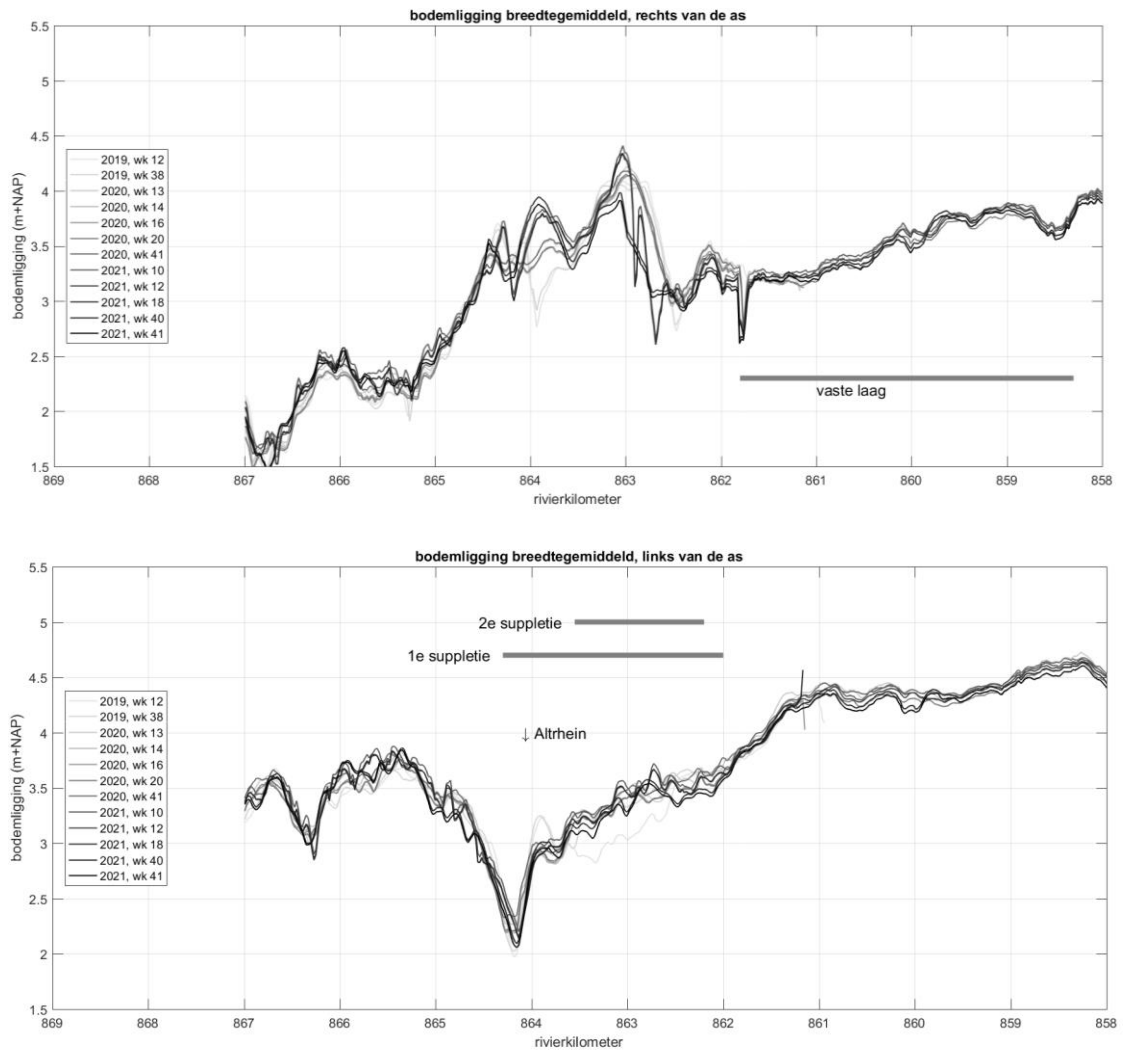
Direct benedenstrooms van de vaste laag bij Spijk, aan de rechteroever, lijkt zich, geïnitieerd door het hoogwater van 2020, een snel verdiepende erosiekuil te vormen bij rkm 861,8, op een afstand van ongeveer +110 m van de rivieras (zie kaart in Figuur 20 en langsprofielen in Figuur 21). In juli 2020 had de kuil op haar diepste punt (ongeveer 110 m rechts van de as) al een erosiediepte van meer dan 3 m bereikt (zie langsprofielen in Becker, 2022. De breedtegemiddelde diepte in Figuur 21 is uiteraard minder groot.). 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. In 2021 is deze kuil niet verder in diepte gegroeid maar wel in stroomafwaartse richting (Figuur 22).

Becker (2022) laat zien dat de twee diepe erosiekuilen aan de rechterzijde bij rkm 862,4 en rkm 863,9 die tijdens het hoogwater 2018 zijn ontstaan (zie paragraaf 4.4.4 en Sieben, 2018), zich in 2019 en 2020 weer lijken op te vullen of zelfs te verplaatsen (met name de kuil bij rkm 863,9) onder invloed van de opgewekte dynamiek (Figuur 21). In 2021 worden beide kuilen weer dieper en hebben zich ten opzichte van de ligging bij aanleg van de suppletie in 2019 orde 200 m (na het hoogwater van februari 2021) tot 300 m (na het hoogwater van juli 2021) stroomafwaarts verplaatst” (Becker, 2022, en Figuur 22). Figuur 23 toont de ligging van de kuilen op een kaart.

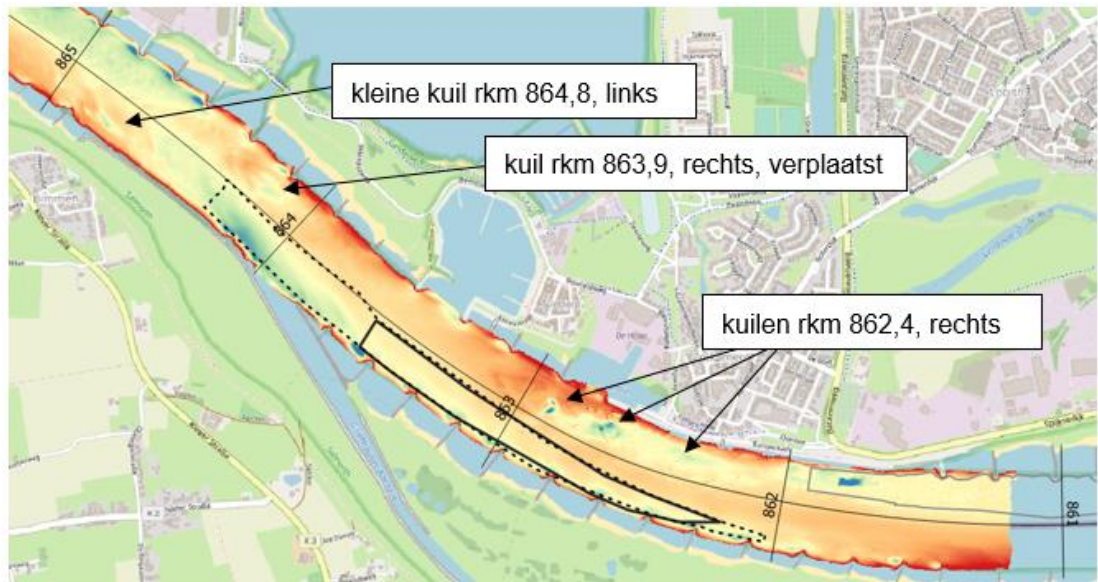
“In 2021 ontstaat er ook aan de linkerkant van de rivier een kleine kuil, ongeveer 90-130 m van de rivieras bij rkm 864,8, dat is bij het einde van de gestrekte oever” (Becker, 2022). Deze is in de breedtegemiddelde langspromen van Figuur 22 niet goed te herkennen.



Figuur 21 Bodempligging na het hoogwater van januari 2020, 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 12, 2019, is van net voor aanleg van de tweede suppletie en is meegenomen als referentie. Week 38, 2019, is de eerste peiling na volledige aanleg.



Figuur 22 Bodempligging na het hoogwater van februari 2021, 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 12, 2019, is van net voor aanleg van de tweede suppletie en is meegenomen als referentie. Week 38, 2019, is de eerste peiling na volledige aanleg.



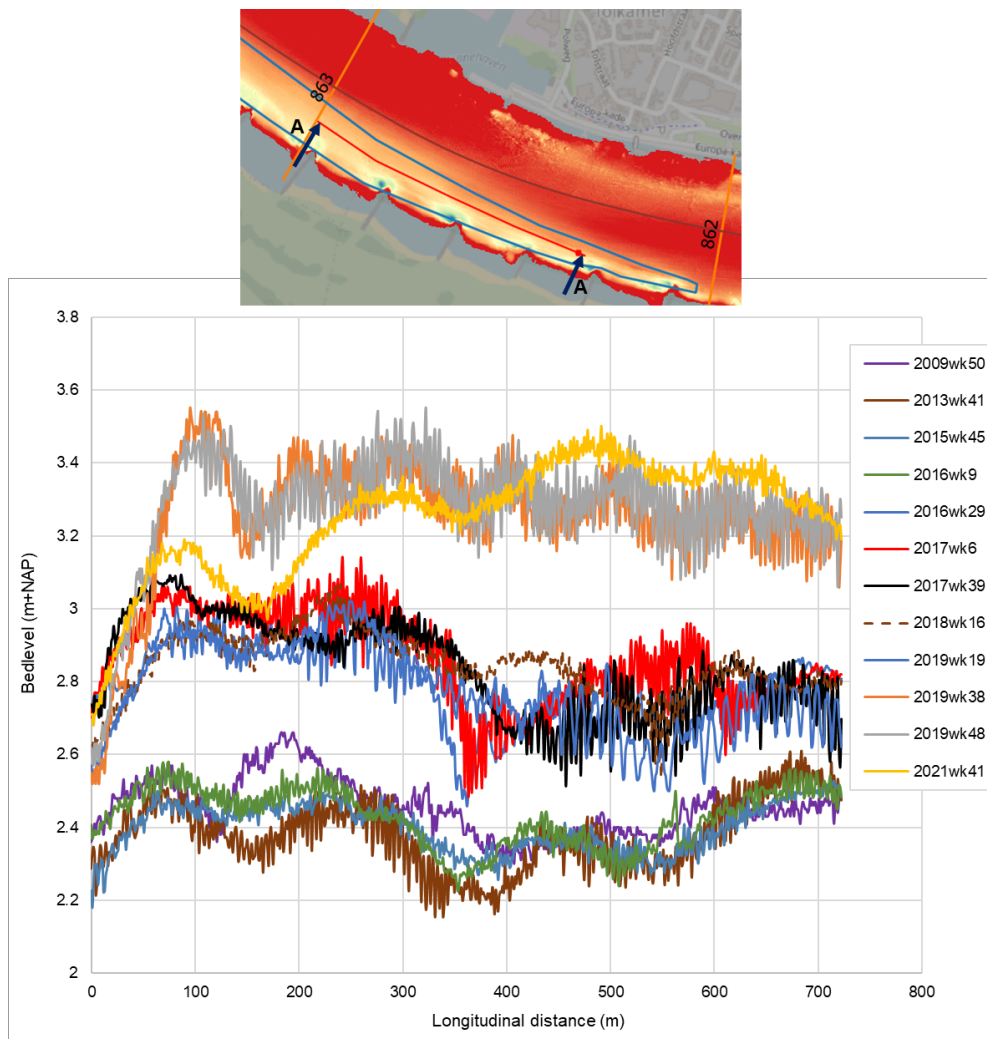
Figuur 23 Ruimtelijke weergave van de bodemligging rond de suppletielocaties in week 18, 2021.

4.5 Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-Rijn: kleinschaligere dynamiek

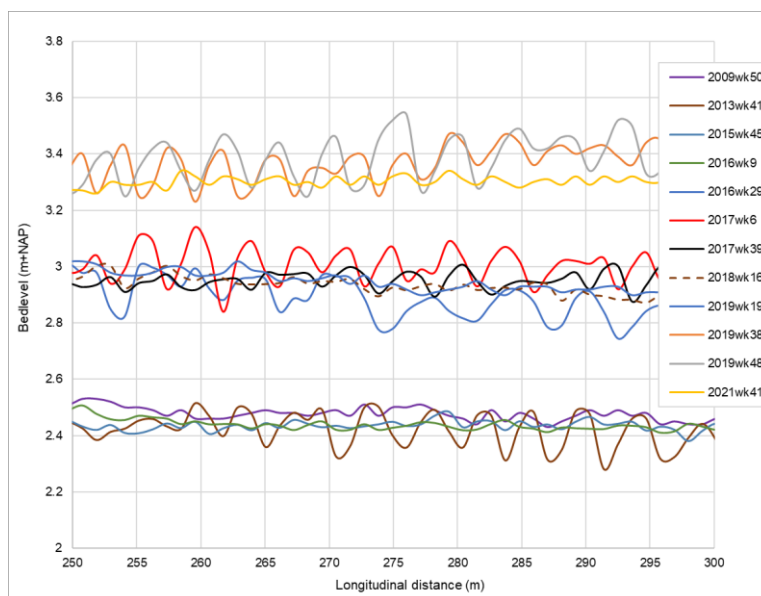
Vanuit de hoge-resolutie bodempeilingen (1 m x 1 m) zijn in Figuur 24 en Figuur 25 langsprofielen voor verschillende momenten afgeleid om de beddingvormen op microschaal te analyseren. Deze volgen een lijn van ca. 720 m lang op de suppletielocatie. Er zijn momenten uit verschillende periodes gekozen: vóór aanleg van de suppleties, tussen de aanleg van de eerste en tweede suppletie en na aanleg van de tweede suppletie. In de bodemhoogte is duidelijk te herkennen welke lijn bij welke periode hoort, omdat de verhoging van de bodem door de suppleties zichtbaar is.

De langsprofielen (Figuur 24 en Figuur 25) tonen micro-schaal bodemvormen (ribbels) die lijken te ontwikkelen na korte periodes van lage of middelgrote afvoeren en die stroomafwaarts migreren. In de profielen van vóór en na aanleg van de suppleties (2017 week 6 en 2019 week 48) hebben deze een vergelijkbare lengte (over het algemeen minder dan 5 m). De amplitude varieert zowel vóór als na aanleg van de suppleties van enkele centimeters tot 25 cm. De variatie in de tijd wordt veroorzaakt door de afvoerhistorie voorafgaand aan de peilingen. De samenstelling van de suppleties (aan de grove kant van de marge waarin het natuurlijke bodemmateriaal beweegt) kan de dimensies van de ribbels ook beïnvloeden. Dit is echter in de peilingen niet aantoonbaar.

De micro-schaal bodemvormen zijn gesuperponeerd op golven van iets grotere schaal (Figuur 24), 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.



Figuur 24 Langsprofielen langs de lijn A-A (op de suppleties) van de bodemligging voor verschillende momenten. De onderste 4 lijnen zijn van de periode voor aanleg van de suppleties, de middelste drie van de periode na aanleg van de eerste suppletie in 2016 maar voor aanleg van de tweede suppletie in 2019, en de bovenste drie van na aanleg van de tweede suppletie.



Figuur 25 Uitsnede van Figuur 24, waarin de (variatie in de) dimensies van de ribbels duidelijker te zien zijn.

4.6 Invloed van locatie-specifieke condities

4.6.1 Lokale stromingscondities bij hoogwater

In de buurt van de suppletielocatie en benedenstrooms ervan loopt de stroming bij hoogwaterafvoeren tot aan 8.000 m³/s bij Lobith parallel aan de hoofdgeul, behalve bij de monding van de Griethauser Altrhein (Figuur 26) en bij de instroom naar plas De Bijland. Bij de monding van de Griethauser Altrhein stroomt 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. Instroming vindt dus plaats langs een traject tussen rkm 863,8 en 864,5.

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.

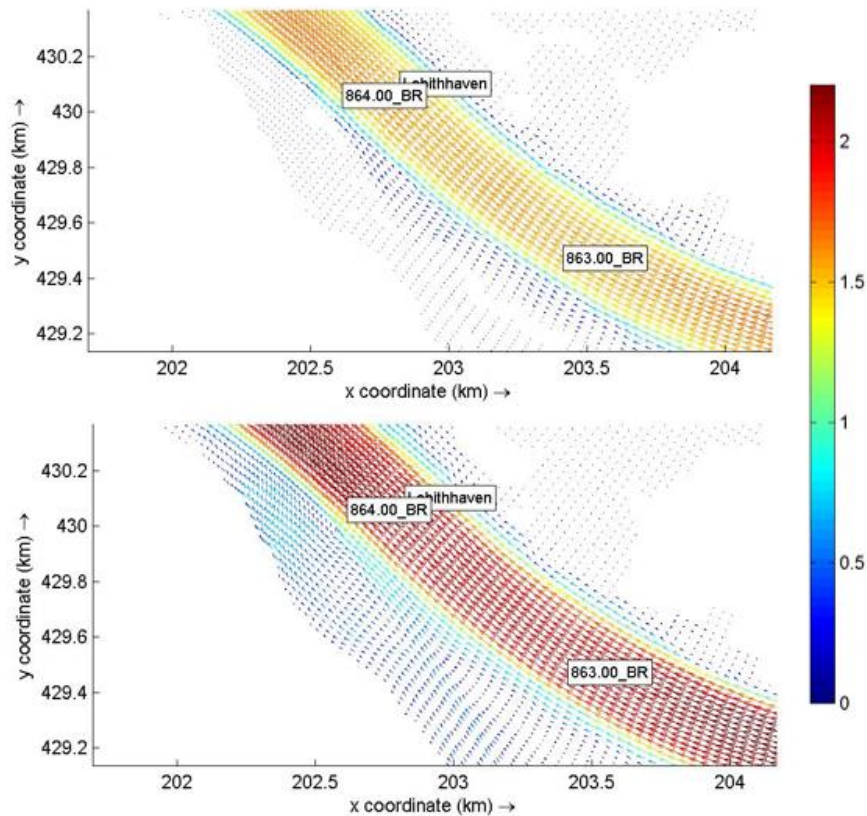
De eerste suppletie van 2016 was vrij dun (30 cm) en is over de kuil heen gestort. Na het hoogwater van 2018 is te zien dat de suppletie daar volledig geërodeerd is en dat er sedimentgolven vrijgekomen zijn die naar benedenstrooms migreren (paragraaf 4.4.4). Suppleren in dit soort van nature hoogdynamische gebieden bergt dus een aanvullend risico op sedimentgolven die de scheepvaart zouden kunnen belemmeren. De erosiekuil is tijdens het hoogwater niet verplaatst. Het hoogwater brengt de bodemligging terug op het niveau van voor de suppletie.

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 (rkm 863,6, Figuur 27).

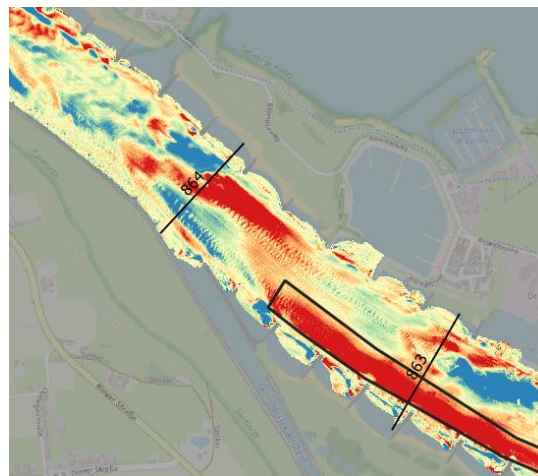
De resultaten van de numerieke berekeningen bevestigen de invloed van de suppletie op dit patroon. Na afloop van het hoogwater 2018, met de eerste suppletie aanwezig, blijft de erosiekuil in de berekening met suppletie op dezelfde locatie als in de berekening zonder suppletie, de kuil wordt alleen iets dieper. Dit gebeurt zowel in de referentieberekening als in de suppletieberekening en wordt dus niet veroorzaakt door de suppletie. Na afloop van het hoogwater in 2020, met de tweede suppletie aanwezig en de eerste reeds uit de kuil geërodeerd, verplaatst de kuil in de berekening met suppletie naar bovenstrooms, tot aan de benedenstroomse rand van de tweede suppletie. In de berekening zonder suppletie verplaatst de kuil niet. De verplaatsing wordt in het model dus wel door de tweede suppletie veroorzaakt.

De beschikbare peilingen van na 2018 zijn uitgevoerd op momenten waar de geconcentreerde hoogwaterstroming vanuit de Altrhein en de uiterwaard nog maar weinig of nog niet optreedt. Ze laten zien dat er op die momenten nog geen invloed van de nevengeul op de morfodynamiek in de hoofdgeul is, want er zijn bodemvormen te herkennen die de stroomrichting in de hoofdgeul volgen. De bodemvormen zijn in en boven de kuil te zien. Er is dus bij deze afvoeren geen blokkade van sedimentaanvoer richting de kuil. (Becker, 2022)

Bij de instroom naar plas de Bijland zijn geen opvallende patronen te zien in de bodemontwikkeling.



Figuur 26 Interactie tussen uiterwaard en hoofdgeul in de buurt van de suppletielocatie bij hoogwater. Boven: $Q_{Lobith} = 4.450 \text{ m}^3/\text{s}$, onder: $Q_{Lobith} = 8.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Bron: Standaardberekening D8000 WAQUA-rijn-j18_5-v1.



Figuur 27 Verschil in bodemligging tussen week 18 in 2021 (na het hoogwater van februari 2021) en week 12 in 2019 (voor aanleg van de tweede suppletie).

4.6.2 Lokale oeverbelijning

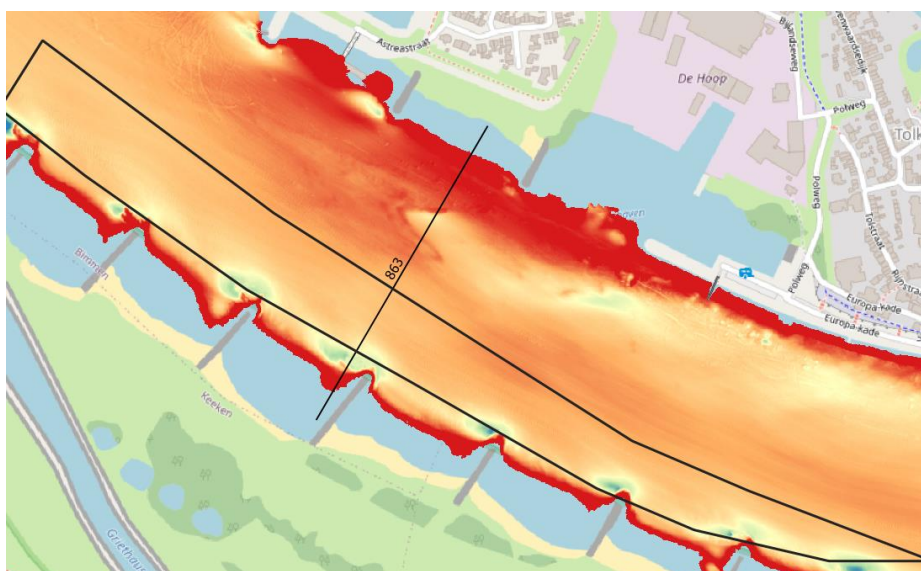
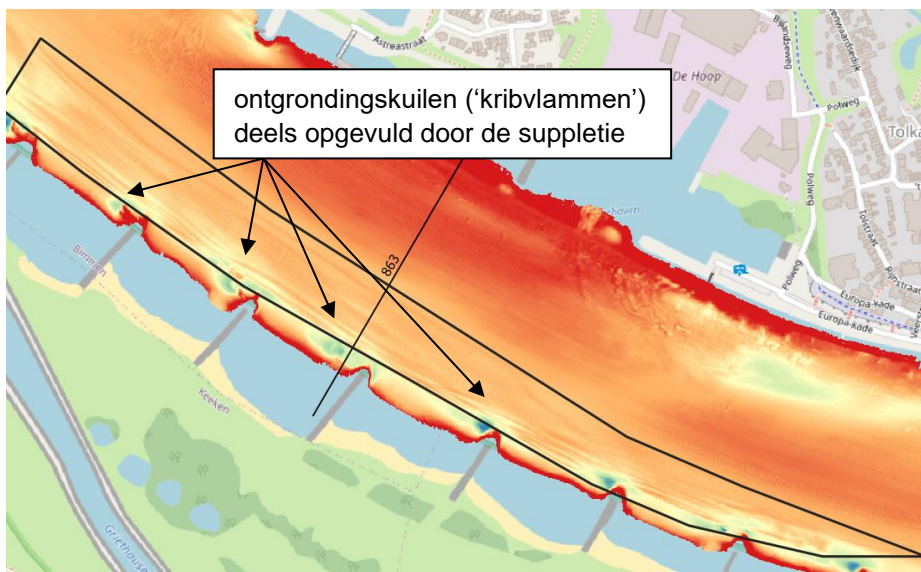
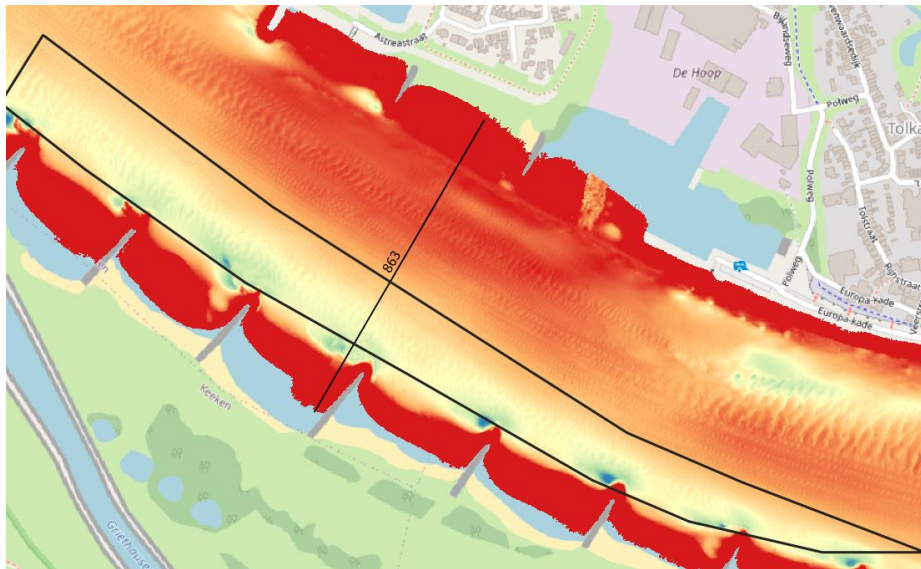
De lokale oeverbelijning, bestaande uit gestrekte oevers bij Tolkamer aan de rechterkant en benedenstrooms van de monding van de Griethauser Altrhein aan de linkerkant en kribben op de rest van het traject, heeft duidelijke invloed op de bodemligging in het gebied (Figuur 28). De kribkoppen wekken stabiele lokale ontgrondingskuilen op, die het diepst en breedst zijn vlak bij de kribkoppen.

Het aantal vormen stemt exact overeen met het aantal en de ligging van de kribvakken. De suppleties zijn op 25 m afstand van de normaallijnen aangebracht en dus deels over deze beddingvormen gestort.



Figuur 28 Bodemligging in 2019, week 12, net voor aanleg van de tweede suppletie.

Figuur 29 toont dit in meer detail voor de locatie van de tweede suppletie. In het middelste figuur is te zien dat de suppletie rond de kribkoppen heen is uitgevoerd (dat wil zeggen dat er in de kribvakken dichter richting de oever gesuppleerd is dan bij de kribkoppen), en dat de ontgrondingskuilen maar deels zijn opgevuld. Een jaar later zijn de ontgrondingskuilen weer ontwikkeld (figuur onder, de diepere (dus blauwe) gebieden bij de kribkoppen zijn weer groter geworden). 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.

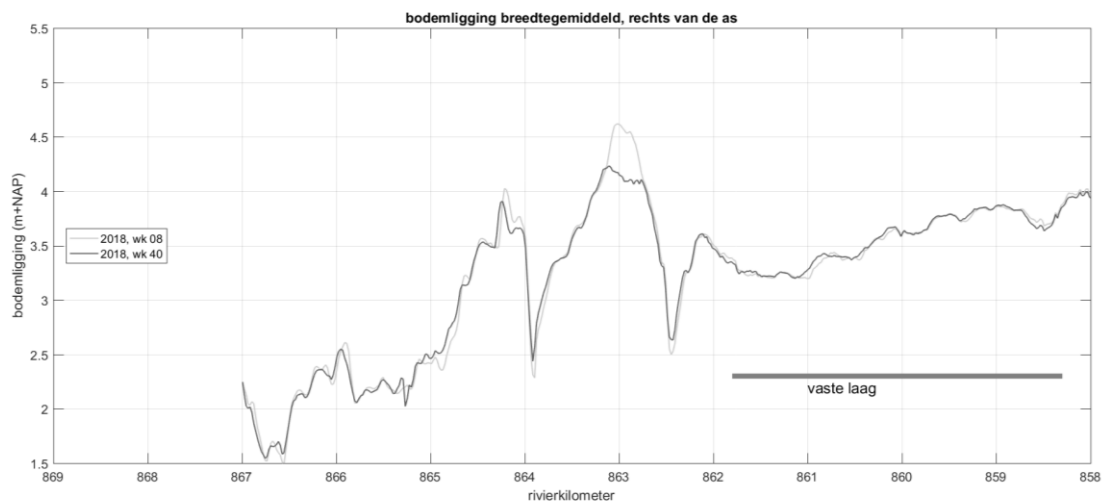


Figuur 29 Bodemligging. Boven: 2019, week 12, net voor aanleg van de tweede suppletie. Midden: week 38, net na aanleg. Onder: 2020, week 40, 1 jaar na aanleg.

4.6.3 Vaargeulonderhoud

Tussen de eerste en de tweede suppletie is er in de langspiegelen aan de rechterkant van de rivier een locatie te zien waar mogelijk gebaggerd is. Het gaat om de 'bult' rond rkm 863, die tijdens het hoogwater is ontstaan (zie meting van week 8, 2018, in Figuur 30), 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. In de aangeleverde data over vaargeulonderhoud (zie Becker et al., 2023) blijkt dat er in 2018 daadwerkelijk gebaggerd is tussen rkm 862,55 en 864,55. Volgens de data is er op hetzelfde traject ook in 2014 en 2015 gebaggerd. Dat is echter niet duidelijk terug te zien in de langspiegelen van de bodemligging.

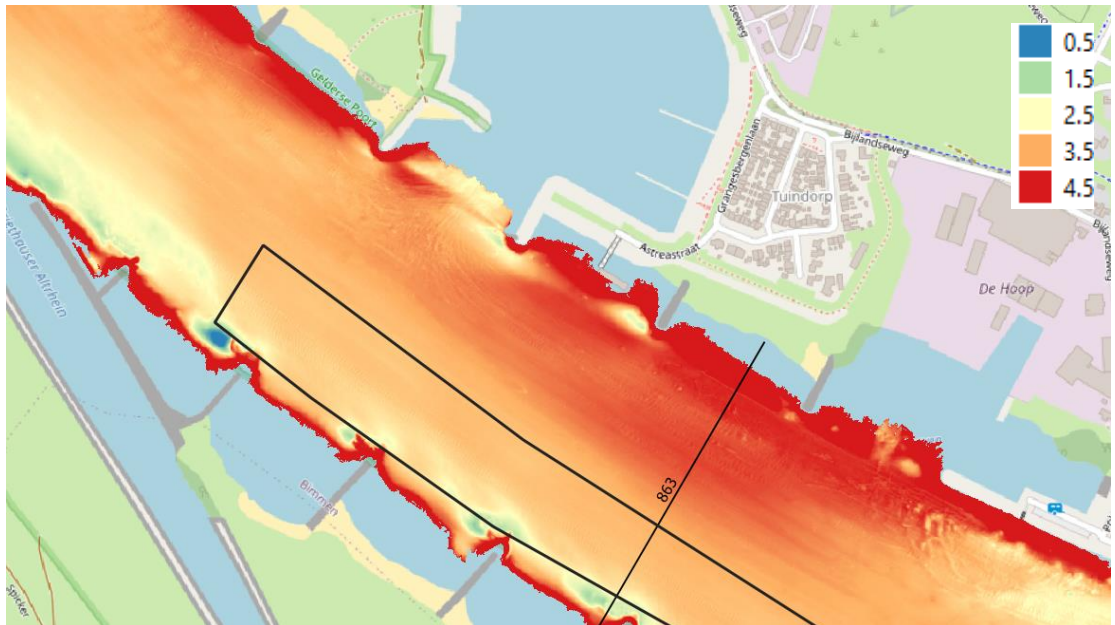
Na de aanleg van de tweede suppletie tot aan de laatste beschikbare peiling van eind 2021 is er in de langspiegelen geen locatie meer te zien die op vaargeulonderhoud wijst. Dit ondersteunt de conclusie van Becker et al. (2023) dat er door deze suppleties tot nu toe geen toename van het vaargeulonderhoud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



Figuur 30 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.

4.6.4 Scheepvaart

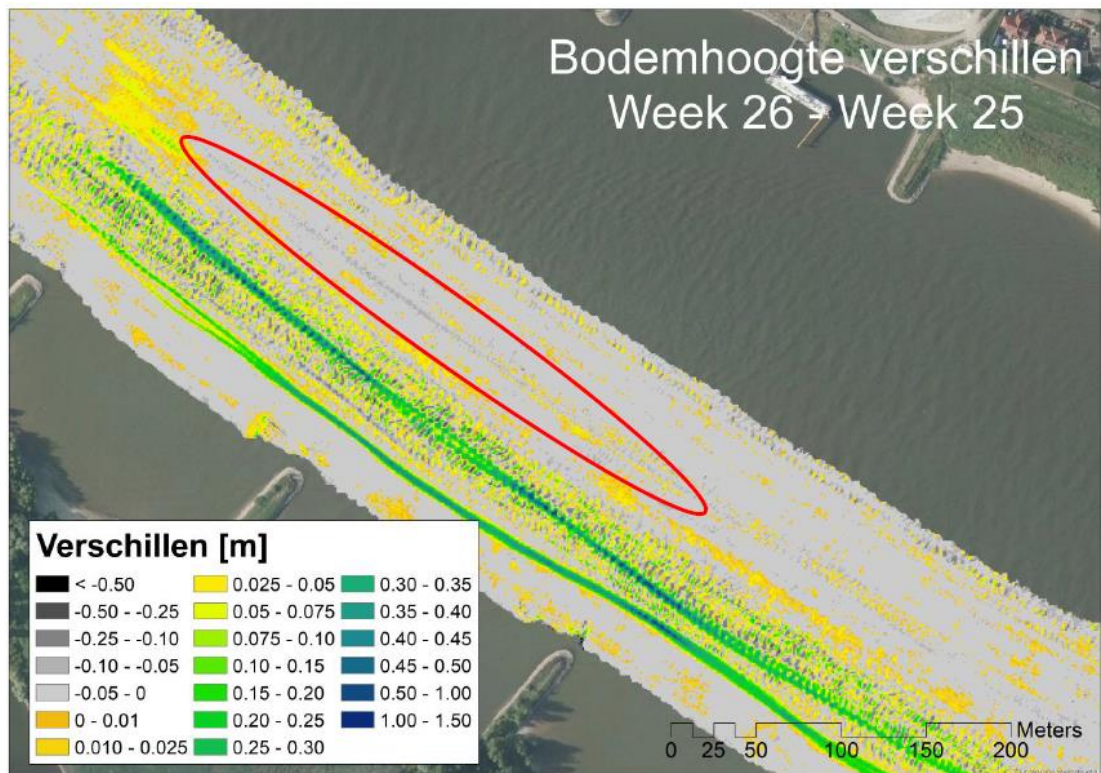
Becker (2022) duidt met de multibeam-opnames en de verschilkaarten op een groot aantal lijnvormige 'sporen' en vermoedt dat dit is ontstaan door scheepvaart. Het lijkt er op dat de passerende schepen door de invloed van retourstroom en schroefstraal een waarneembare invloed uitoefenen op de bodemligging en de menging van sedimentfracties afkomstig uit de suppletie. Figuur 31 geeft een voorbeeld van de waargenomen vaarsporen.



Figuur 31 Langgerekte parallelle vaarsporen op de Boven-Rijn afgeleid uit de multibeampeiling van November 2020, rond rkm 863, met afbuigende sporen naar de Vluchthaven Lobith. Het zwarte polygoon geeft de ligging van de tweede suppletie weer, de kleuren de bodemligging (m+NAP).

Lokin en Barneveld (2019) hebben de bodemhoogteverschillen geanalyseerd van voor en na de passage van een duwschip, de “Veerhaven”, over de suppletie op 25 juni 2019. Helaas was het niet mogelijk om het effect van deze enkele passage te isoleren uit de gemeten bodemhoogteverschillen, er was namelijk geen duidelijk vaarspoor te herkennen in de peilingen. Echter signaleren ook zij de ontwikkeling van vaarsporen in de bodempeilingen. Zonder de daadwerkelijke vaartrack van het veroorzakende schip te kennen lijkt in de figuur van de bodemhoogteverschillen tussen week 26 en 25 in 2019 alleen een zijwaartse verplaatsing van sediment zichtbaar (Figuur 32).

De sporen lijken echter meer in de ondiepe binnenbocht naast de suppleties aanwezig te zijn dan op de nog wat dieper liggende suppleties zelf, tot een diepte van ongeveer OLR-3,8 m (Figuur 31 en Figuur 32). Daaronder zijn veel minder sporen zichtbaar. Omdat de veroorzakende vaartracks onbekend zijn, 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.



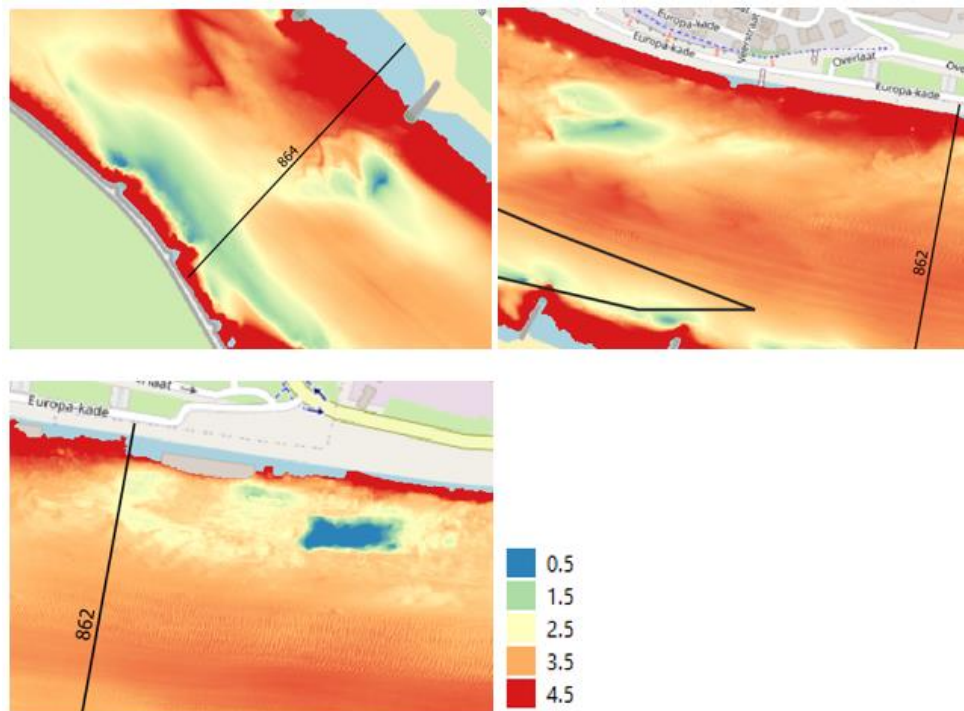
Figuur 32 Bodemhoogteverschillen week 26-week 25 2019, bij het meest benedenstroomse gedeelte van het suppletievlak. Bron: Lokin en Barneveld (2019). Rood omcirkeld waarschijnlijk een vaarspoor. De groen-gele sporen aan de linkerkant van de rivier ontstaan door het aanbrengen van de suppletie.

4.6.5 Afpleisteringen

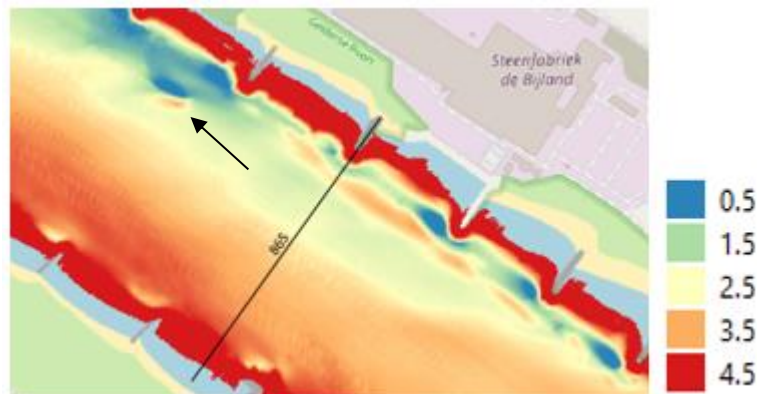
De analyse van de bodemmonsters in hoofdstuk 5 laat zien dat de monsters in het traject open benedenstrooms van de suppleties geen indicatie kunnen geven dat er sprake is van een volledige afpleistering. Afpleistering ontstaat wanneer aan de oppervlakte van de bedding het fijnere sediment wegspoelt en een matrix van grof immobiel sediment resulteert. Deze laag is minimaal enkele korrels dik. De gebruikte Hamon happer en de grijper bemonsteren echter een diepte van enkele decimeters, en bevatten daardoor ook een deel van het fijnere sediment onder de afpleisterlaag. De bodemmonsters hebben een percentage van meer dan 15% zand (op twee van de tientallen monsters na, waarvan één op de suppletie). Omdat de monsters een dikkere laag bevatten dan een eventuele afpleisterlaag, kan niet met zekerheid worden geconcludeerd dat er in specifieke situaties (bijvoorbeeld bij lagere afvoeren wanneer grove fracties immobiel worden) een afpleisterlaag aanwezig kan zijn. Gezien de hoge percentages zand en de dynamiek van bodem (beddingvormen en vaarsporen) is het ook goed mogelijk dat er eerder sprake is van grove en minder grove lagen. Grove lagen zijn stabiel bij lagere afvoeren en vormen dan een 'mobiele afpleisterlaag' ('pavement' of 'mobile armour'). Ook de uitzeying van grover sediment naar diepere lagen kan er voor zorgen dat deze als semi-vaste lagen functioneren. Het fijnere materiaal loopt er dan overheen en kan zo ook leiden tot een hoger zandgehalte in monsters op die locaties.

De erosiekuilen die zijn ontstaan door de hoogwaters hebben vrij scherpe randen (Figuur 33), die na ontstaan van de kuilen scherp blijven. De kuilen laten vermoeden dat er een relatie bestaat met een grove bovenlaag en daaronder een relatief fijn substratum dat op die plaatsen is aangesneden (zie ook Becker, 2021). Paragraaf 0 onderzoekt dit nader.

Bij rkm 865,2 is er een 'bult' in de bodemligging te zien die over de jaren heen stabiel blijft liggen, ook tijdens de passage van hoogwaters (Figuur 34). Bovenstrooms van rkm 865 is in Figuur 34 langs de oever een lijnvormige verhoging in de bodem zichtbaar. Deze verdwijnt in 2021 weer. Eerder zijn op deze locatie ook al bulten ontwikkeld en weer verdwenen, dat laatste waarschijnlijk door hoogwaters. Mogelijk wordt er hier sediment uit vaargeulonderhoud gestort. In elk geval lijkt dit geen vaste, slecht erodeerbare structuur.



Figuur 33 Bodemligging (m+NAP). Boven: week 8, 2018 (na afloop van het hoogwater) met erosiekulen bij rkm 864 en bij rkm 862,4. Onder: week 40, 2021, wanneer de kuil benedenstrooms van de vaste laag al is gegroeid.



Figuur 34 Bodemligging (m+NAP) bij rkm 865 in week 12, 2019 (net voor aanleg van de tweede suppletie). De pijl markeert de bult.

4.6.6 Erosiegevoelige lagen in de ondergrond

Paragraaf 5.2.1 laat onder andere de samenstelling van de ondergrond op de Boven-Rijn zien, afgeleid uit boringen door Gruijters et al. (2001). De boringen 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). Dit materiaal is afgedekt door een relatief dunne (orde 0,5 m) grovere top laag (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.

4.7 Conclusie: netto invloed van de suppleties

De suppleties veroorzaken een reactie in de bodemligging in de vorm van een 2D-patroon vergelijkbaar met alternerende banken. Dit gebeurt omdat beide suppleties alleen aan één kant van de rivier aangebracht zijn en er daarom een herverdeling van de stroming plaatsvindt.

De amplitude van de alternerende erosie- en sedimentatiepatronen zijn te relateren aan de dikte van de suppleties, waarbij de sedimentatie aan de overkant benedenstrooms van de suppletie van eenzelfde orde dikte is als de suppletie zelf, en de erosie naast en benedenstrooms van de suppletie minder sterk is.

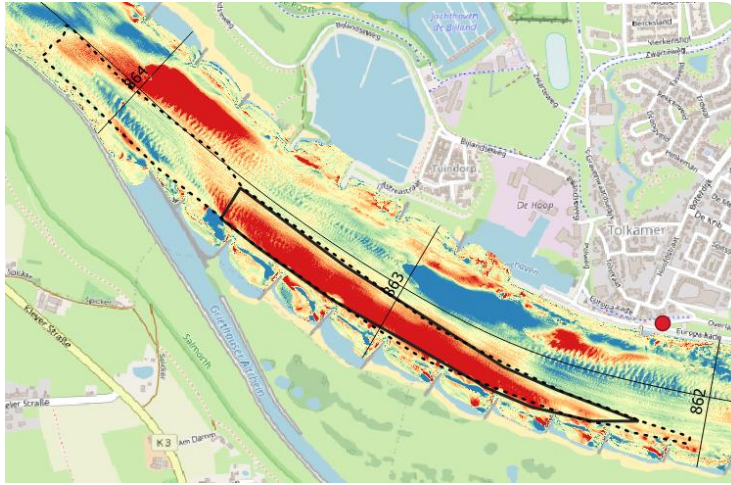
De erosie naast de suppletie kan het optreden van erosiekuilen aan de rechterkant van de oever hebben versneld. Het is echter aannemelijk dat de invloed van de aanleg van de vaste laag bij Spijk daarvoor belangrijker was.

Op de Boven-Rijn veroorzaken hoogwaters een sterke dynamiek in de bodemligging. Deze is deels beïnvloed door de suppleties. Zo erodeert het front van de eerste suppletie tijdens het hoogwater van 2018 volledig en loopt als sedimentgolven naar benedenstrooms. De amplitude daarvan is in de orde grootte van de dikte van de suppletie gebleven. Er is daardoor geen duidelijke verplaatsing van het suppletiefront te herkennen. Het front van de tweede suppletie is wel duidelijk te herkennen. In de tijd na aanleg tot aan eind 2021 is het echter slechts over korte afstand verplaatst (orde 100 m nabij de rivieras).

Mogelijk hebben de suppleties kort na aanleg een invloed op de amplitude en lengte van de micro-schaal bodemvormen (ribbels).

Er zijn in de ontwikkeling van de bodemligging geen aanwijzingen gevonden voor een significante verandering van de pakkingsdichtheid van het bodemmateriaal onder de suppleties.

Tijdens de eindevaluatie kwam de vraag op of de suppletie de waterstandsmetingen bij Lobith kan beïnvloeden. Figuur 35 laat zien dat deze meetpaal naast het bovenstroomse einde van de suppleties ligt. Door de aanleg van de eerste suppletie is het dwarsprofiel aan de linkerkant van de rivier verhoogd. De door de suppletie veroorzaakte erosie aan de rechterkant is hier naar verwachting nog zeer gering. Wel ligt de paal in de zone waarin de aanleg van de vaste laag van Spijk voor erosie zorgt en is op deze locatie een kleine opstuwung van de waterstand door de suppleties te verwachten (zie hoofdstuk 6). Er wordt daarom aanbevolen om de Qf-relatie van de meetpaal regelmatig bij te werken.



Figuur 35 Locatie van het waterstandsmmeetpunt 'Lobith' (rode stip) ten opzichte van de invloed van de bodemveranderingen na aanleg van de suppletie 2019 (2021 week 40 - 2019 week 12).

4.8 Prognose toekomstige invloed van de suppleties

Het patroon van alternerende erosie en sedimentatie ontwikkelt zich stroomafwaarts. Dat wil zeggen dat het een ten opzichte van de suppletie plaatsvast patroon is, maar het wordt in de loop van de tijd steeds verder benedenstrooms zichtbaar. Becker (2022) geeft voor de suppletie van 2019 een snelheid van orde 1 km/jaar aan, die echter met name door het aantal en de grootte van de gepasseerde hoogwaters wordt bepaald.

De invloed van de suppletie zal daardoor dus de komende jaren langzaam verder benedenstrooms zichtbaar worden, hoewel het wel geleidelijk zal uitdempen. Omdat het patroon nog in ontwikkeling is en bepaald wordt door hoogwater, kan de locatie en lengte van de erosie en sedimentatie niet met een eenvoudige vuistregel worden bepaald. Hiervoor zijn 2D morfologische berekeningen met een numeriek model uitgevoerd (zie hoofdstuk 7). Deze geven aan dat de bodemverandering door de suppletie tot ruim 10 jaar na de suppletie doorgaat. Uit de vergelijking van de berekening van de afgelopen 6 jaar met metingen is af te leiden dat het berekende effect van de suppleties qua orde grootte overeenkomt met de metingen (paragraaf 0). Een beoordeling van de duur van het uitdempen van dit effect is echter lastiger vanwege de geringe snelheid ervan in verhouding tot de lengte van de beschikbare datareeks (6 jaar). Maar de verwachting is dat de invloed op de bodemligging nog zeer lang zichtbaar zal zijn.

5 Effect op de bodemsamenstelling

5.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk 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 Ontwikkelingen van de bodemsamenstelling op de Boven-Rijn

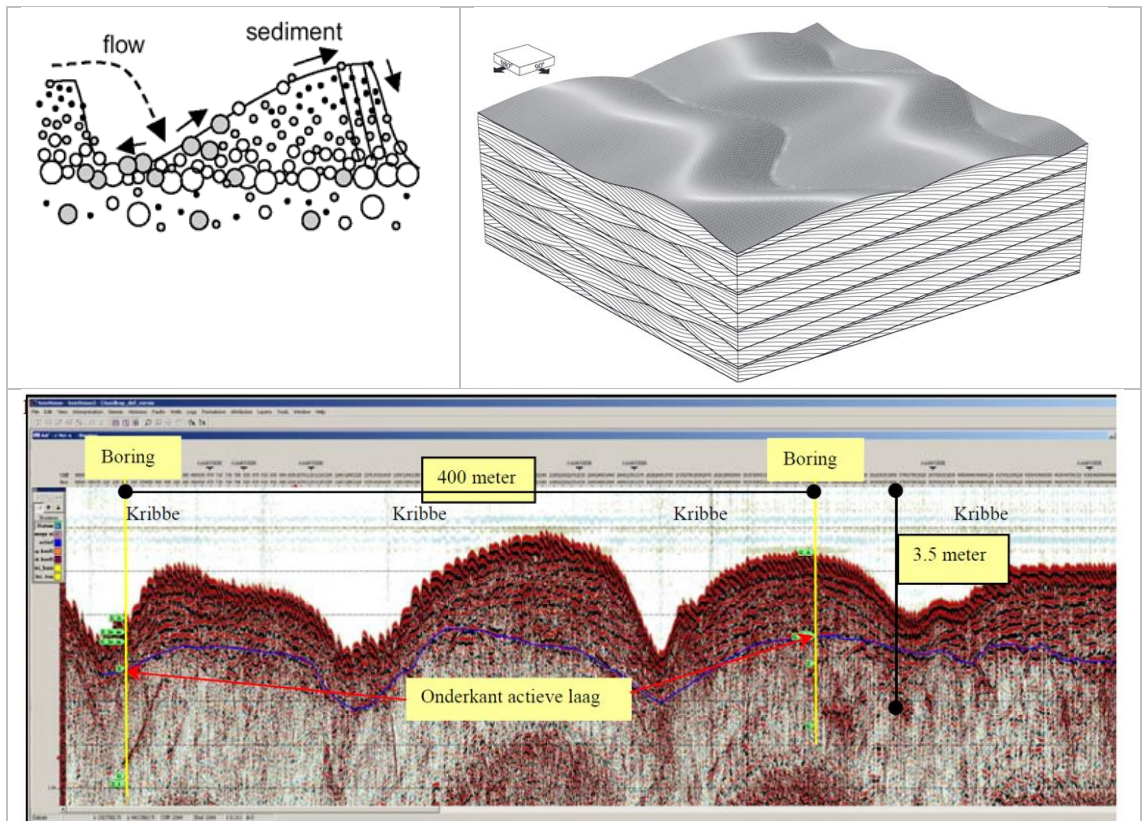
Voor de analyse van bodemsamenstelling is vooral gebruik gemaakt van de jaarlijks herhaalde bemonsteringen door Rijkswaterstaat op hele kilometerraaien op 70 m van de rivieras, zowel links als rechts, en op halve kilometerraaien in de rivieras. Daarnaast zijn aanvullende data van de aannemer (Martens en van Oord) op de suppletielocatie en in de beun beschouwd. Ook data uit andere campagnes en onderzoeken zijn gebruikt (zie paragraaf 2.2.2).

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.

Deze paragraaf beschrijft eerst de belangrijke morfodynamische invloeden op de bodemsamenstelling, en vervolgens de ontwikkeling van de bodemsamenstelling zelf.

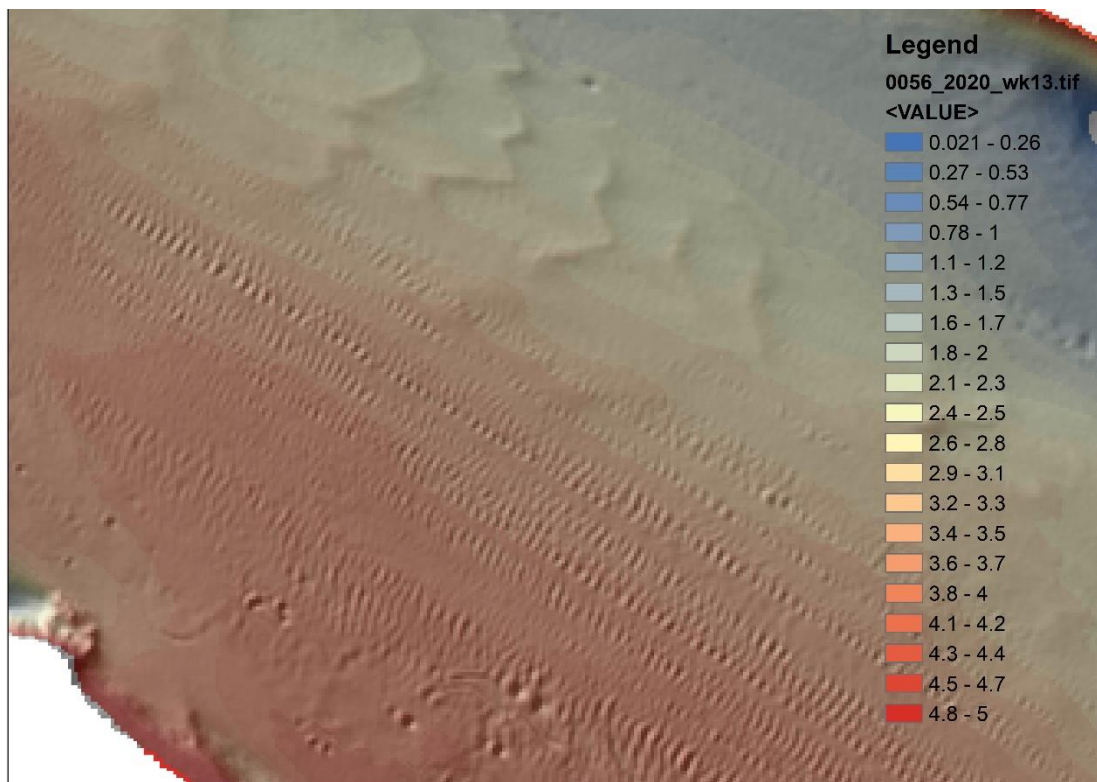
5.2.1 Invloed van morfodynamiek op bodemsamenstelling

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 rivierbodembodem 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. Bijvoorbeeld in duinen en ribbels verplaatsen de grovere fracties zich gemiddeld naar beneden, en de fijnere fracties gemiddeld naar boven. Tegelijkertijd vormen ze door hun variabiliteit in verplaatsingsnelheid en amplitude een complexe gelaagdheid in de ondergrond. Voorbeelden hiervan uit de literatuur zijn weergegeven in Figuur 36.



Figuur 36 Voorbeelden van horizontale en verticale variatie in bodemsamenstelling en gelaagdheid onder invloed van ribbels en duinen (links: Blom, 2003; rechts: Rubin en Carter, 2006, onder Gruijters et al., 2003). Het figuur linksboven toont hoe verticale sortingsprocessen in de duinen leiden tot vorming van een grove laag in de duintroggen. Het figuur rechtsboven toont de verticale doorsneden van gelaagdheid van de bedding die zich ontwikkelt onder een veld van onregelmatige duinkammen met sedimentatie (voorbeeld uit Nederrijn). De grafiek onder toont een voorbeeld van een seismisch profiel waarin de actieve laag op basis van deze seismiek en boringen is vastgesteld.

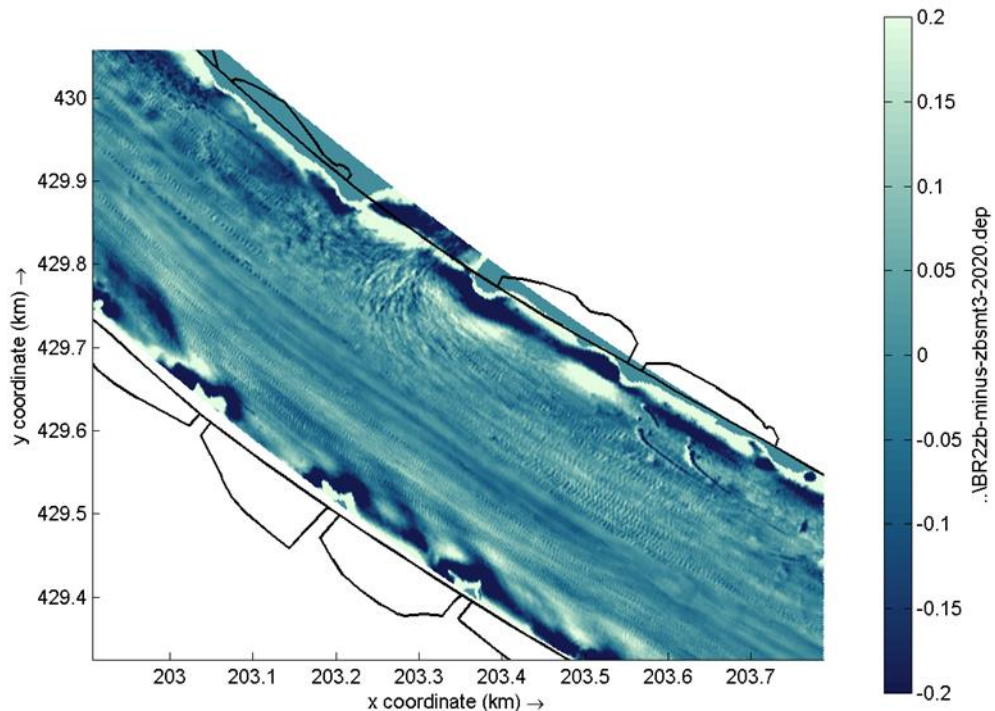
Over het algemeen volgt uit multibeampeilingen dat op de meeste locaties wel sprake is van ribbels met een afstand tussen opeenvolgende ribbels van orde 5 m en een amplitude van enkele decimeters. Figuur 37 toont een voorbeeld van een situatie met enkele grotere duinen (tussen km 865 en 866) met een onderlinge afstand tussen de kammen van circa 30 m. De vorm van deze duinen suggereert dat er sprake is van zandduinen over een grove bedding. Het betreft namelijk geïsoleerde lage ‘duinruggetjes’ met vlakke brede troggen, waarbij de grove bedding als een vaste laag functioneert tijdens de condities van deze peiling. Grote duinen treden hier mogelijk alleen op tijdens hoogwateromstandigheden.



Figuur 37 Multibeampeiling week 13, 2021 met zowel ribbels als duinen.

De invloed van scheepvaart op de bodemsamenstelling hangt samen met 'spoorvorming'. De spoorvorming ontstaat door retourstroom bij de boeg en onder het schip, de volgstroom achter het schip en de schroefstraal. Bij de boeg en naast het schip treedt een zijdelingse stroming op die een deel van het opgewervelde sediment zijwaarts verplaatst. Dat leidt tot de vorming van een langsruggetje aan beide zijden van het schip, wat zich toont als een vaarspoor in bodemhoogte. Voor de invloed op de samenstelling kunnen we veronderstellen dat de volgstroom achter het schip zorgt voor een opwaartse verplaatsing van water en sediment, waar het fijnste sediment hoger kan worden opgewerveld, en langzamer bezinkt, dan het grovere sediment. Dit kan leiden tot een verticale uitzeving, waarbij het fijne materiaal het grovere sediment afdekt. De schroefstraal kan dit effect mogelijk nog versterken. Hoewel dit een hypothese is, kan het ook een verklaring bieden voor een relatief fijne samenstelling van de bodem aan de linkerzijde van de Midden-Waal. De opvarende schepen hebben daardoor een sterkere invloed op de samenstelling dan de afvaart aan de rechterzijde, omdat deze tegen de stroming in varen (en mogelijk vaker een grotere diepgang hebben door belading). 4.6.4 De mate waarin deze vaarsporen ontstaan is afhankelijk van onder andere de bodemsamenstelling, diepgang (belading), vaarsnelheid (zowel ten opzichte van rivierstroming, d.w.z. stroom op- of afwaarts, als ten opzichte van de bodem), type schip (dimensies, boegvorm, aandrijving). Invloeden van scheepvaart op de bodem zijn ook onderzocht in Sloff (2022).

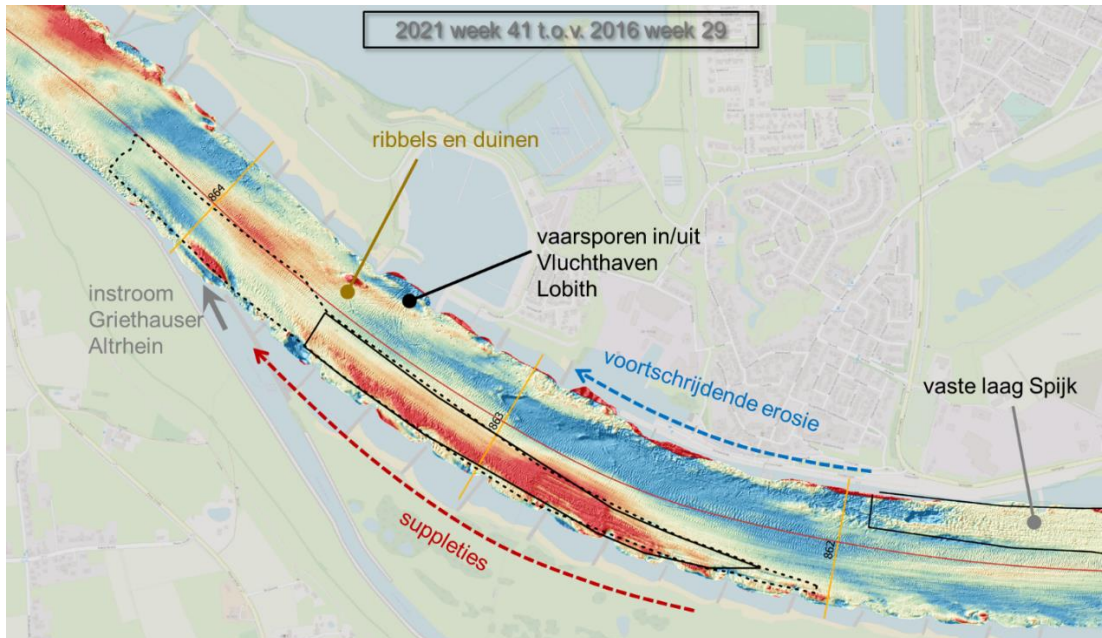
Figuur 38 toont een voorbeeld van de langgerekte sporen die door continue en talrijke passages van schepen zijn ontstaan, en een onderlinge afstand hebben van minder dan 10 m. Bij bodembemonstering uitgevoerd op km 866 (rechts) en km 863 (links) zijn aanzienlijke verschillen in samenstelling gevonden, waarbij de aanwezigheid van deze sporen een rol kan hebben gespeeld.



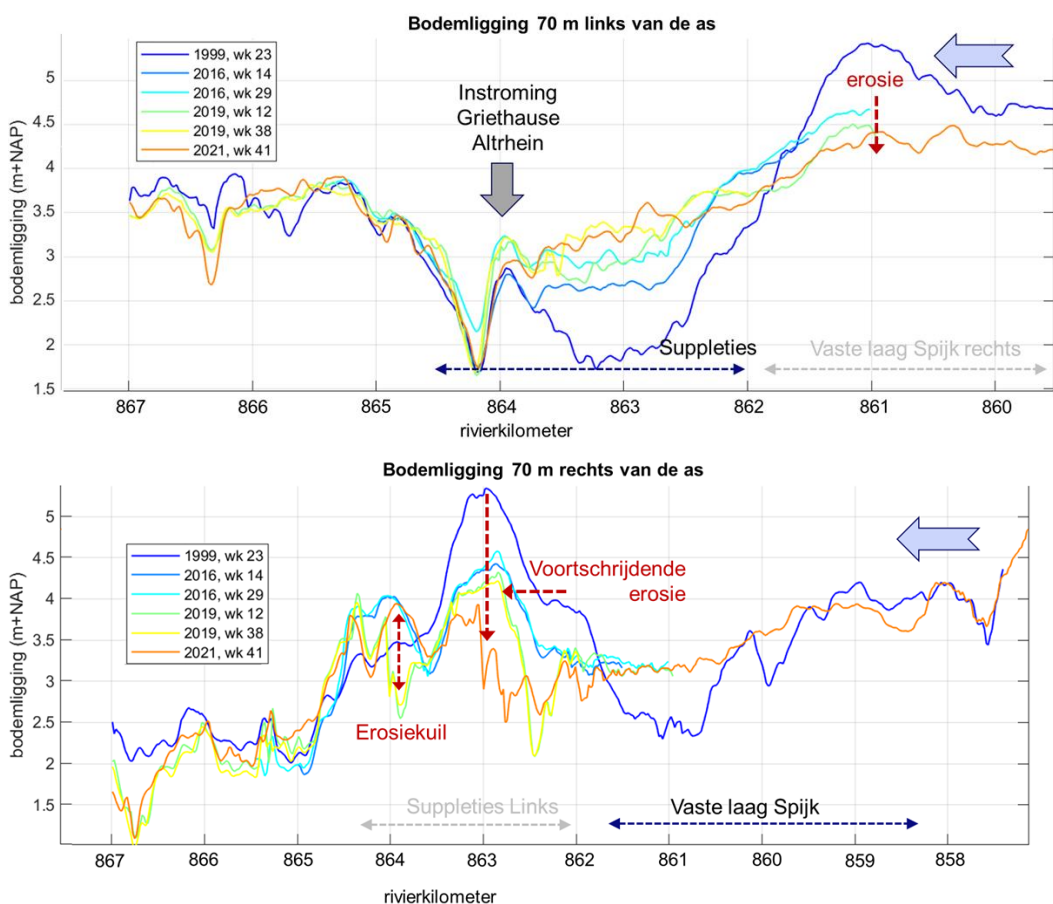
Figuur 38 Langgerekte parallelle vaarsporen op de Boven-Rijn afgeleid uit de multibeampeiling van nov 2020, km 864-865, met afbuigende sporen naar de Vluchthaven Lobith (Sloff, 2022). In dit figuur is een ruimtelijk gemiddelde bodemhoogte van de oorspronkelijke bodemhoogte afgetrokken, zodanig dat kleinschalige fluctuaties overblijven. De resolutie van de peiling is 1 m.

Gruijters et al. (2001b) nemen waar dat de actieve laag ruwweg enkele decimeters tot een meter dik is. Daarbij is uitgegaan van een dikte waarbij uit boringen volgt dat deze één of meer keren in het voorgaande decennium was verplaatst. De dikte van de laag die wordt verplaatst varieert met de afvoer (bij hoge afvoeren neemt morfodynamiek toe, d.w.z. ontwikkeling van ribbels en duinen), maar ook met passages van scheepvaart (invloed die juist bij lage afvoeren met geringe kielspeling toeneemt), bagger- en stort activiteiten (dat gering is in de Boven Rijn), en andere processen waarbij de actieve laag wordt omgewoeld. De dikte van de actieve laag wordt bepaald doordat over deze diepte het sediment onder invloed staat van mengingsprocessen, onder andere door stroming en turbulentie. 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.

Hoewel bovengenoemde morfologische processen betrekking hebben op de horizontale schaal van enkele meters tot tientallen meters, treden er ook grootschaligere morfologische processen op in de Boven-Rijn die bijdragen aan de bodemsamenstelling, zowel door de suppletie zelf als door andere ingrepen. In Figuur 39 is een aantal relevante morfologische ontwikkelingen en verschijnselen aangeduid op een kaart van bodemveranderingen (details van bodemverandering zijn gepresenteerd in hoofdstuk 4). Vervolgens is in Figuur 40 de bodemligging geplot van de twee langstraaien links en rechts van de as waar bodemmonsters zijn genomen.



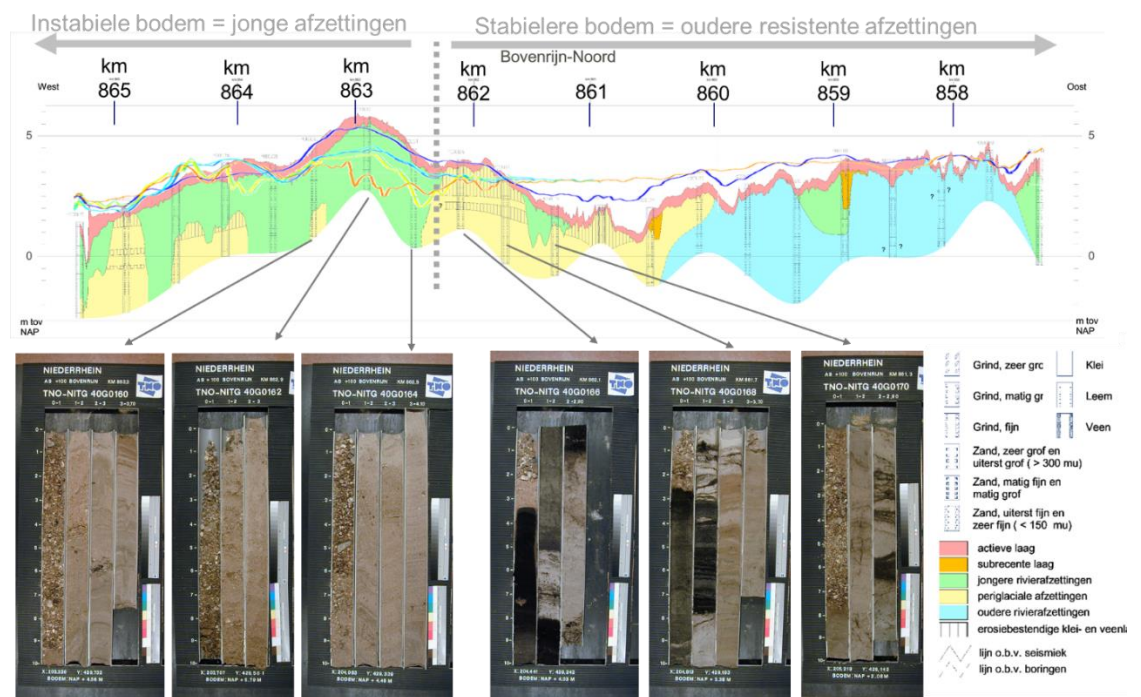
Figuur 39 Overzicht relevante morfologische verschijnselen op kaart van bodemverschil: gemeten bodemligging 2021 (week 41) minus bodemligging 2016 (week 29, voor suppleties). Op rode delen is bodem 2021 hoger dan 2016 (sedimentatie) en op blauwe delen juist lager (erosie). Voor details en kwantitatieve waarden, zie hoofdstuk 4.



Figuur 40 Langsprofilen op 70 m links en 70 m rechts van de as (langsraaien waar bodemmonsters zijn genomen).

In Figuur 39 en Figuur 40 zijn een aantal belangrijke locaties aangeduid die relevant zijn voor de analyse van de bodemsamenstelling:

- Links van de in 2012 aangelegde vaste laag bij Spijk (rond km 861) is sprake van erosie. Het materiaal dat hierbij vrijkomt verplaatst zich stroomafwaarts door het suppletietraject.
- Aan de rechterzijde, direct benedenstrooms van de vaste laag Spijk, en direct naast de suppletie, treedt een voortschrijdende erosie op over de volledige helft van de rivier. De erosie is deels mogelijk opgewekt tijdens hoogwater 2018 (zie paragraaf 4.4.4). Rond km 863 heeft bijvoorbeeld de bodem een erosiediepte van 2 á 2,5 m ontwikkeld op de langsgraai op 70 m van de as. De bodem snijdt zich daarbij in het onderliggende sediment. Figuur 41 toont het profiel van de ondergrondsamenstelling op de langsgraai aan de rechterzijde van de rivier afgeleid uit boringen door Gruijters et al. (2001), met daarin de lijnen van de langspromen uit bovenstaande Figuur 40. De boringen tonen hoe rond km 863 het substraat vooral bestaat uit zand (met een fractie grind) en overwegend fijner is dan het materiaal in de actieve laag. Rond 862.4 is sprake van een overgang in substraat van deze jonge rivierafzettingen met zand/grind (benedenstrooms) naar oude periglaciale afzettingen met kleilagen (bovenstrooms) uit de laatste IJstijd. Door de erosie komt het onderliggende materiaal beschikbaar voor sedimenttransport, en draagt bij aan (tijdelijke) verfijning van de samenstelling van de actieve laag stroomafwaarts. De vrijkomende jaarlijkse volumes zijn in de orde van enkele duizenden kubieke meters zand. Ook de erosiekuil aan de rechterzijde rond km 864 is mogelijk te relateren aan het aansnijden van fijn materiaal na het doorbreken van de grovere toplaag tijdens hoogwater 2018 (zie paragraaf 4.4.4). Deze is in de periode erna weer opgevuld. De gemiddelde diameter toont bovenstrooms van km 862 grotere variaties dan benedenstrooms van km 862. Voor de hand ligt dat het hogere grindgehalte leidt tot sterke sorteringsverschijnselen, maar ook het substraat kan hier invloed hebben.

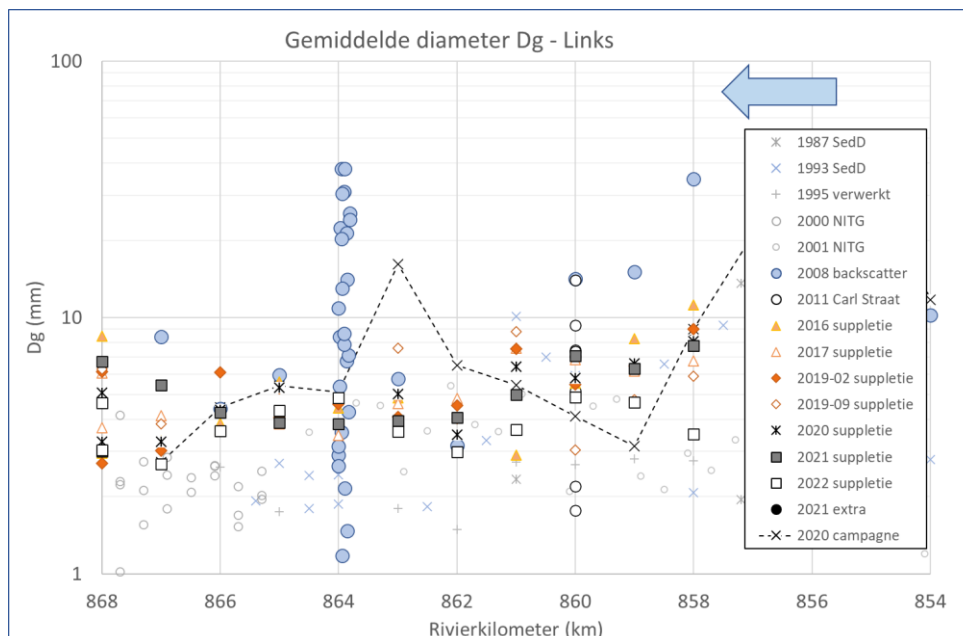


Figuur 41 Profiel van de ondergrondsamenstelling aan de rechterzijde, en foto's van boorkernen uit de studie Gruijters et al. (2001). De lijnen van bodemligging op 70 m rechts van de as uit Figuur 40 zijn hierin op het langspromen geprojecteerd.

- Net bovenstrooms van km-raai 864, aan de linkerzijde, stroomt de Griethauser Altrhein de rivier in. Deze geul is actief tijdens hoogwaters, en leidt tot forse fluctuaties in bodemligging in de rivier. Zie Figuur 39 en Figuur 40 en de gedetailleerde beschrijving in paragrafen 4.4 en 4.6.1. Deze dynamiek leidt mogelijk tot sterke variaties in bodemsamenstelling op deze locatie. Op deze locatie zijn in 2008 in een zone van circa 60 x 200 m 25 monsters genomen en gezeefd, zie Figuur 42. De meting is uitgevoerd als validatie van multibeam backscatter analyses. De resulterende gemiddelde diameters D_g uit de zeefanalyse zijn in Figuur 43 geplot samen met gegevens van andere jaren. De monsters langs de "oever" (160 m links van de as) zijn zandiger en hebben een lagere D_g , de monsters in de rivier zijn daarentegen veel grover dan het normale mengsel. De waargenomen variaties (1 mm tot 40 mm) liggen dus ver buiten de bandbreedte die kan worden afgeleid van de 'reguliere' bemonstering in de rivier. De locatie valt binnen het suppletietraject.



Figuur 42 Locaties van monstername back-scatter onderzoek 2008 bij de monding van de Griethauser Altrhein.

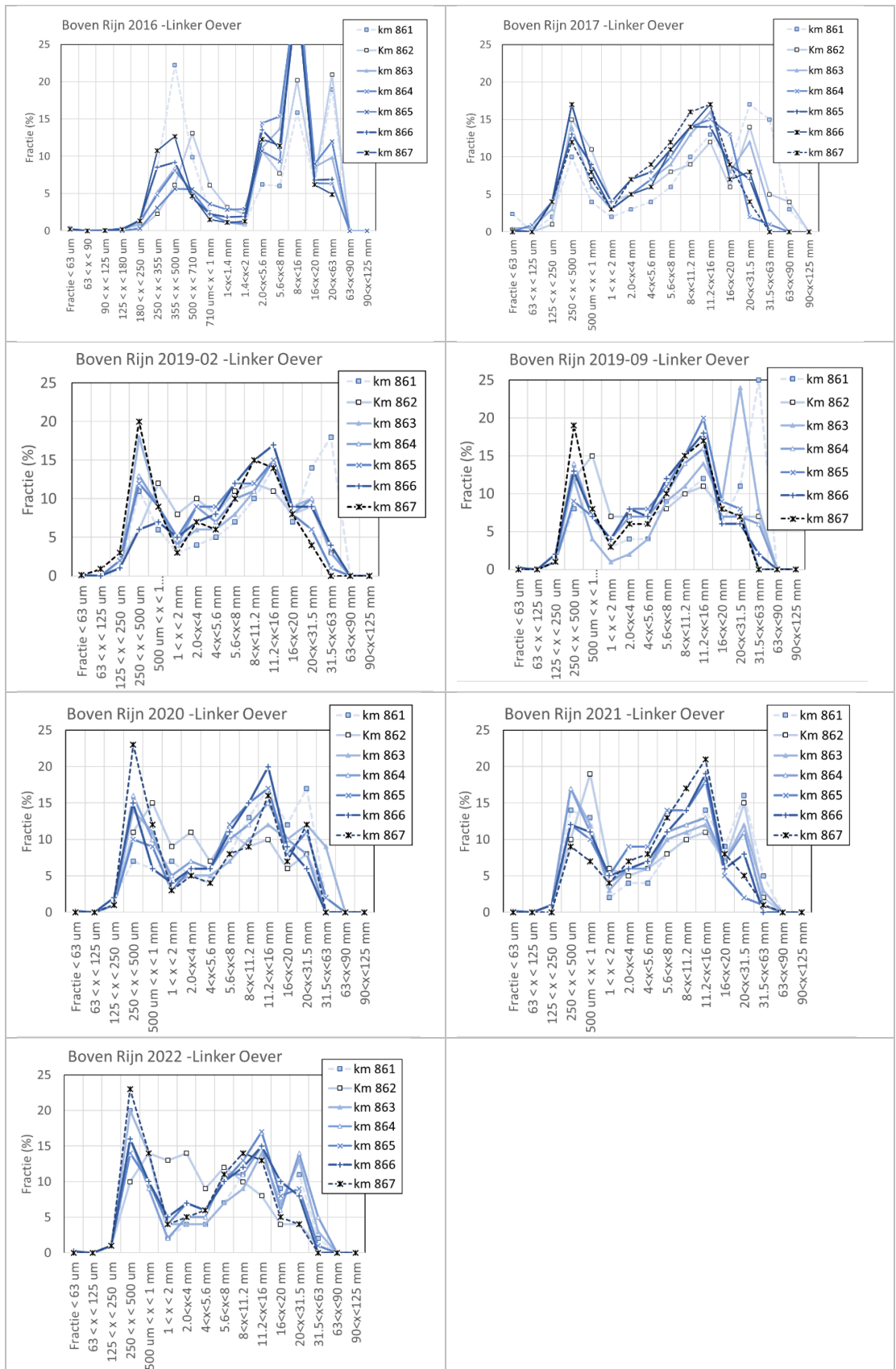


Figuur 43 Gemeten gemiddelde diameters in de Boven Rijn voor meerdere jaren, met opvallend grote spreiding bij km 864 in de 2008 bemonstering. De verticale schaal is logaritmisch.

5.2.2 Ontwikkeling bodemsamenstelling in tijd en plaats

Uit eerdere analyses van de 2016 suppletie en uit modelberekeningen is geconstateerd dat het gesuppleerde sediment geleidelijk stroomafwaarts migreert en daarbij wordt gemengd met het aanwezige sediment in de toplaag (Niesten et al., 2017, en Koolstra, 2020b). Het sediment blijft daarbij voornamelijk aan de rivierzijde waar is gesuppleerd (dus links van de rivieras). Er treedt weinig uitwisseling op in dwarsrichting. De directe invloed van de suppletie (dus de migratie van het gesuppleerde materiaal) zou dus volgen uit de metingen aan de linkeroever en de as. Indirecte invloed komt voort uit de door de suppletie opgewekte morfologische effecten, waarbij sedimentatie of erosie bijdraagt aan uitsortering van de fracties (en dus ook optreedt aan de rechterzijde).

Op het beschouwde traject is sprake 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 fractieverdelingen op locaties 70 m links van de rivieras, voorafgaande, tijdens en na de suppleties van 2016 en van 2019 zijn gepresenteerd in Figuur 44 (het betreft de monsters van Rijkswaterstaat). Deze illustreren het bimodale karakter, maar ook de variabiliteit van de verdelingen in plaats en tijd. Bij een meer gedetailleerde beschouwing van deze figuren valt op dat in de sedimentklassen rond 30 mm sprake is van een derde piekje (een derde modus) waardoor in theorie zelfs sprake is van een trimodaal mengsel. Deze derde modus is het sterkst aanwezig in de bovenstroomse monsters, zowel voor als na de suppleties. Deze kan dus niet worden gerelateerd aan het suppletie materiaal. De piek neemt af in stroomafwaartse richting. In Appendix D, paragraaf D.2 zijn deze figuren ook voor de rivieras en de rechter oever gepresenteerd. Daarbij valt op dat de samenstelling in de rivieras meer gelijkmatig is verdeeld over de fracties (de bimodaliteit is minder sterk). Aan de rechterzijde treden aanzienlijke variaties in de verdeling van de fracties in de ruimte en in de tijd (meer dan de monsters op de linkerzijde of in de rivieras). Er is daarvoor echter geen duidelijke oorzaak aan te wijzen. Mogelijk is hier een relatie met het aanbod van sediment dat vrijkomt uit de ontwikkelde erosiekuilen en aangesneden onderlagen.

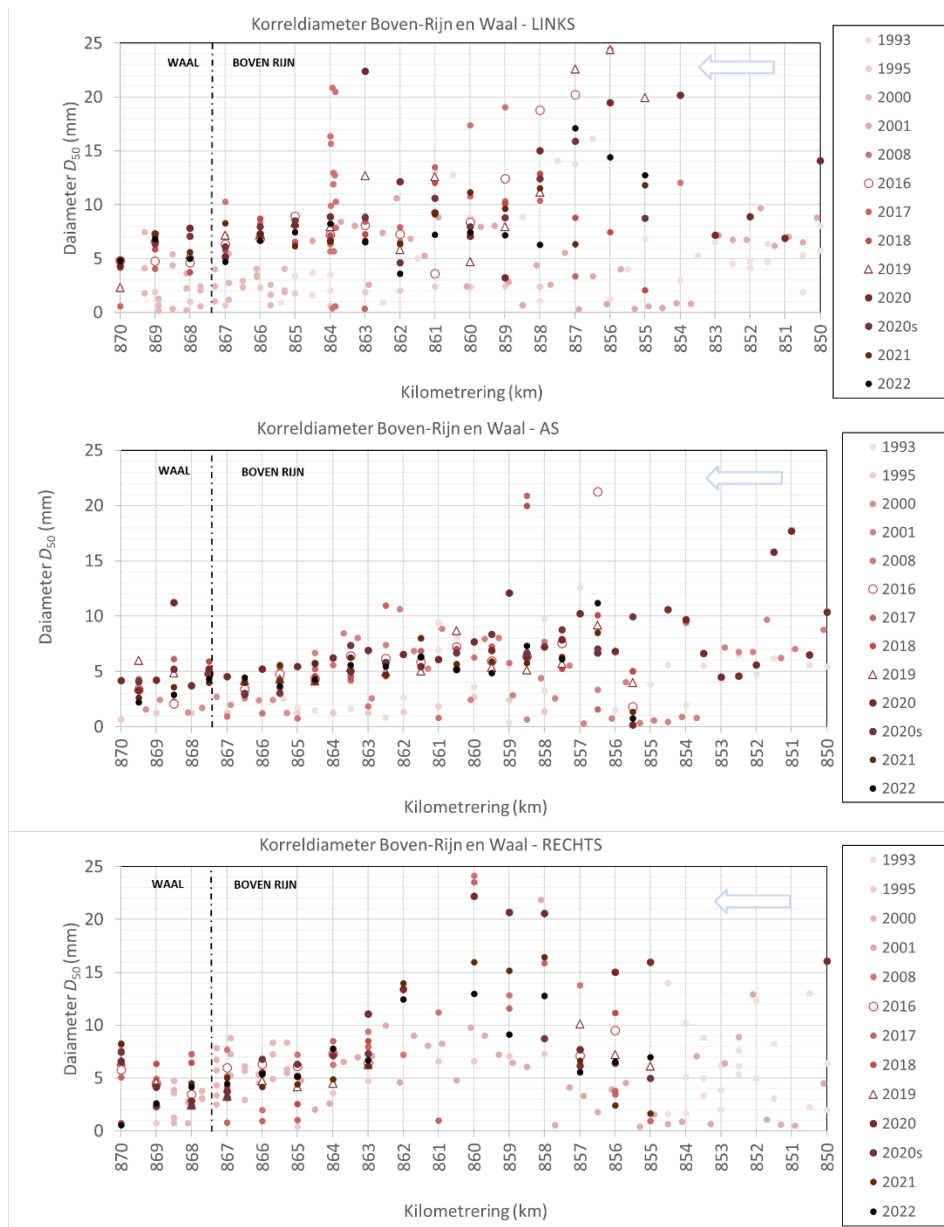


Figur 44 Fractieverdeling voor bodemonsters aan de linker oever voor de periode 31/03/2016 t/m 11/04/2022, rond de suppletielocatie. N.B.: Het aantal fracties is niet hetzelfde in alle figuren, waardoor pieken anders uitvallen wanneer deze figuren onderling worden vergeleken.

Uit de in deze paragraaf gepresenteerde figuren van fractieverdelingen is het niet mogelijk gebleken om eventuele effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling benedenstrooms van de suppleties te onderscheiden. Ook op andere kenmerkende parameters is een resulterend effect niet te onderscheiden.

In Figuur 45 zijn de mediane korreldiameters geplot voor een groot aantal monsters links, midden en rechts van de rivieras in de periode 1993 t/m 2022 (inclusief bemonsteringen voor de suppletieproef). De mediane diameter is de korreldiameter waarvoor 50% van het monster fijner is (in massa). Appendix D, paragraaf D.2, toont vergelijkbare figuren met aanvullende datasets vanaf 1951. Hoewel deze mediaan de eigenschappen van de betreffende bimodale mengsels slechts beperkt kan aanduiden, geeft dit wel al een globaal beeld dat kan worden afgelezen uit de figuren:

- 1 De meest recente monsters zijn aan de linkeroever over het algemeen grover dan de monsters van het jaar 2000 en eerder, met name in het traject benedenstrooms van km 853. Voor de rechterzijde en de rivieras is dit effect minder zichtbaar.
- 2 De monsters links en rechts van de as zijn over het algemeen iets grover dan in de rivieras zelf, en tonen meer fluctuaties in D_{50} dan de monsters in de rivieras.
- 3 Bovenstrooms van de suppletieproef (km 862) tonen de monsters een grover en meer variabel beeld dan benedenstrooms, vooral links en rechts van de as.
- 4 De mediaan D_{50} toont geen opvallende trends of fluctuatie na 2016 die aan de suppletieproef kan worden toegeschreven.



Figuur 45 Ontwikkeling van de mediane diameter D_{50} in de tijd voor samenstelling links van de as, op de rivieras, en rechts van de rivieras.

Voor de bemonstering in het traject van de suppleties en benedenstrooms (inclusief de eerste 2 kilometer in de Waal) zijn enkele statistische eigenschappen van de mediane diameters van alle monsters gepresenteerd in Tabel 5. Hiervoor zijn de monsters gemiddeld over de jaren 2016 t/m 2022 (jaarlijkse monsters), inclusief de monsters van de 2020 campagne. Uit de tabel volgt dat het onderscheid in D_{50} voor de verschillende langstraaien niet veel afwijkt, en dat het gemiddeld over de jaren ligt tussen 4 en 7 mm (afname in diameter stroomafwaarts). De standaardafwijking van de waargenomen D_{50} -waarden in de tijd is het grootst in de langstraai op de rivieras (orde 5,3 mm in Boven Rijn en 4,9 mm op Waal) en het kleinst aan de rechterzijde (orde 1,5 mm op Boven Rijn en 1,8 mm op Waal). Deze mate van spreiding is ook zichtbaar in het verschil in minimum en maximum van de D_{50} waarden. Voor de linkerzijde is de spreiding gemiddeld in de orde van 3,5 mm. Er zijn geen aanwijzingen dat deze waarden zijn beïnvloed door de suppleties.

Tabel 5 Overzicht van gemiddelden, standaardafwijking en extremen voor mediane diameters per locatie, voor zeefkrommes voor suppletie-bemonstering 2016-2022 en campagne 2020.

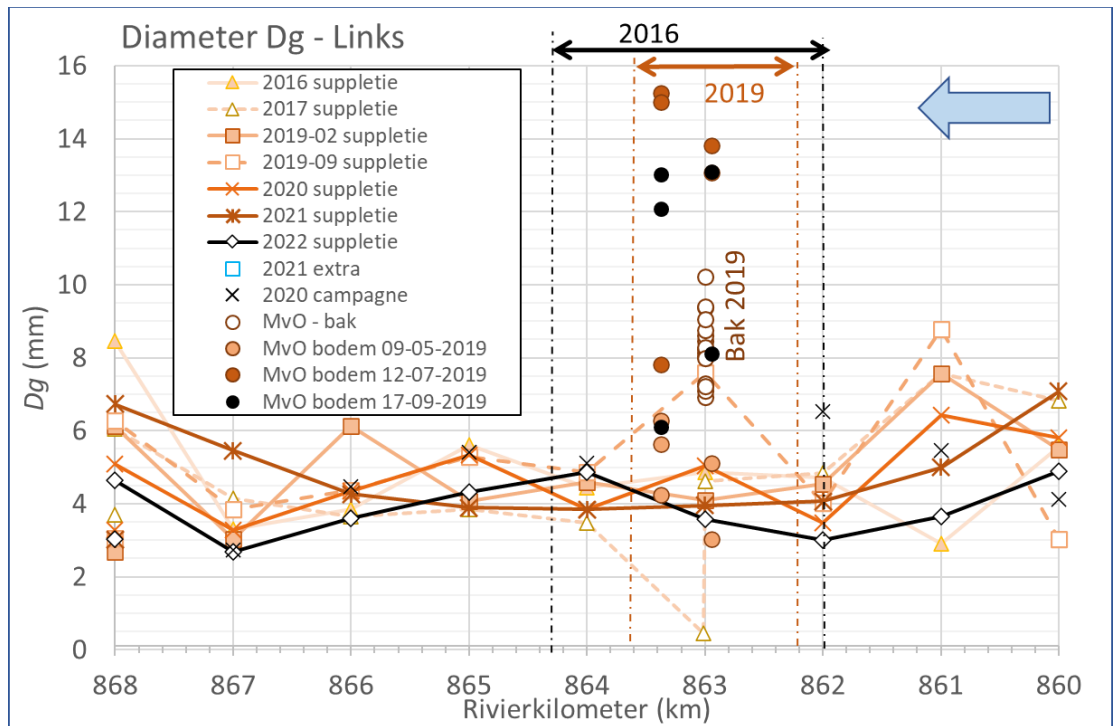
| Tak | Zijde | Km | Gem-D50 (mm) | Stdafw D50 (mm_) | Min-D50 (mm) | Max-D50 (mm) |
|-----|--------|-------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| BR | Links | 862 | 6.26 | 3.62 | 0.56 | 12.17 |
| BR | Links | 863 | 9.32 | 6.84 | 0.35 | 22.43 |
| BR | Links | 864 | 6.58 | 2.85 | 0.40 | 8.89 |
| BR | Links | 865 | 6.58 | 2.90 | 0.39 | 8.98 |
| BR | Links | 866 | 6.16 | 2.43 | 0.67 | 7.31 |
| BR | Links | 867 | 5.60 | 2.64 | 0.31 | 8.32 |
| WL | Links | 868 | 4.91 | 2.26 | 0.35 | 7.82 |
| WL | Links | 869 | 5.33 | 2.52 | 0.35 | 7.32 |
| WL | Links | 870 | 3.18 | 2.06 | 0.34 | 4.88 |
| | | | | | | |
| BR | Midden | 861.5 | 7.62 | 4.74 | 5.04 | 18.29 |
| BR | Midden | 862.5 | 6.90 | 4.28 | 4.61 | 16.51 |
| BR | Midden | 863.5 | 9.36 | 8.18 | 4.57 | 27.58 |
| BR | Midden | 864.5 | 6.44 | 5.61 | 4.16 | 19.27 |
| BR | Midden | 865.5 | 6.50 | 4.96 | 3.70 | 17.89 |
| BR | Midden | 866.5 | 5.42 | 4.30 | 2.96 | 15.30 |
| WL | Midden | 867.5 | 6.17 | 4.01 | 2.83 | 15.00 |
| WL | Midden | 868.5 | 7.22 | 6.37 | 2.07 | 20.00 |
| WL | Midden | 869.5 | 5.68 | 4.21 | 2.21 | 14.64 |
| | | | | | | |
| BR | Rechts | 863 | 7.57 | 1.65 | 6.20 | 11.10 |
| BR | Rechts | 864 | 6.78 | 1.49 | 4.52 | 8.49 |
| BR | Rechts | 865 | 5.04 | 1.30 | 2.56 | 2.56 |
| BR | Rechts | 866 | 4.80 | 1.79 | 0.95 | 6.80 |
| BR | Rechts | 867 | 4.58 | 1.28 | 3.17 | 6.79 |
| WL | Rechts | 868 | 4.19 | 1.83 | 2.36 | 7.26 |
| WL | Rechts | 869 | 3.68 | 0.97 | 2.35 | 4.60 |
| WL | Rechts | 870 | 6.39 | 2.50 | 0.57 | 8.29 |

Vanwege het bimodale karakter van de bodemsamenstelling geeft de waarde voor D_{50} een onvoldoende karakterisering van het mengsel. Een verdere analyse van andere percentielen, zoals D_{10} en D_{90} biedt extra inzicht, maar in dit geval is de combinatie van een geometrisch gemiddelde D_g en een zandpercentage gekozen. De waarde van D_g is minder gevoelig voor de interpolatie tussen fracties voor het vinden van de 50% waarde (voor D_{50}), en het zandpercentage biedt inzicht in hoeverre de verdeling tussen zand en grind bijdraagt aan een verandering in D_g (bijvoorbeeld een gelijkblijvende zand/grind verdeling kan toch leiden tot een toename van D_g wanneer een aandeel van een heel grove grindfractie iets toeneemt). In onderstaande Figuur 46 en Figuur 47 zijn voor het traject van de suppleties, aan de linkerzijde van de rivier, voor de relevante jaartallen 2016 t/m 2022, de waarden van D_g en zandpercentage uitgezet. Ook zijn hier de gemeten waarden voor de monsters van MVO geplot. Vergelijkbare figuren voor de rivieras en de rechterzijde zijn gepresenteerd in de Annex D.2.

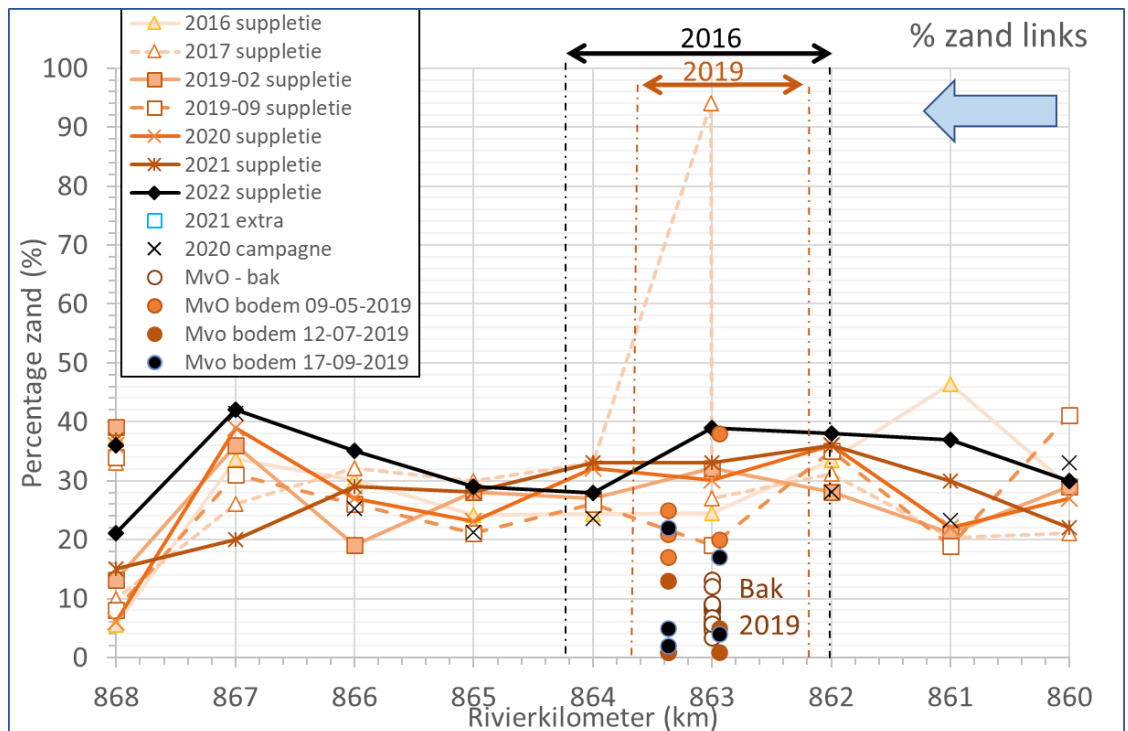
Uit de figuren blijkt de volgende ontwikkelingen:

- Het gesuppleerde materiaal (MVO monsters) heeft een gemiddelde diameter D_g die ruim uitsteekt boven de waarden die kenmerkend zijn voor de toplaag van de bedding op dit traject. Voor het zandpercentage zijn de waarden van de MVO monsters juist veel lager.
- In de monster in het eerstvolgende jaar na de suppleties is geen sprake meer van een grovere bedding. De diameter en het zandgehalte zijn teruggekeerd naar de waarden van omliggende secties. De veranderingen in de jaren 2020 t/m 2022 voor de linkerzijde wijzen er op dat een gelijkmatige toename van percentage zand over de gehele lengte van het traject km 855-867 optreedt, zie Figuur 118 in Appendix D.2, en dat de invloeden van bovenstrooms van het suppletietraject een sterkere invloed hebben op de samenstelling dan de suppleties.
- Hoewel het materiaal benedenstrooms van de suppletie in samenstelling dus fluctueert, is er geen waarneembare voortschrijdende vergroving (als voortplantende golf). De fluctuaties liggen binnen de bandbreedte van eerdere waarnemingen en invloeden van bovenstrooms. Variabiliteit in gemeten samenstelling is terug te leiden naar detailprocessen in de bedding, meetmethode, invloeden van ingrepen zoals de vaste laag Spijk, de variatie in afvoer, etc. 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 bodemonsters kan worden herleid. Dit duidt erop dat het grovere suppletiemateriaal wordt opgenomen in de actieve laag zonder noemenswaardige vergroving in de bovenste (bemonsterde) decimeters. Een mogelijke oorzaak hiervan is dat de grofste fracties door verticale sortering in beddingvormen op lagere niveaus van de actieve laag terecht zijn gekomen (zie bijvoorbeeld Kleinhans, 2005, en een voorbeeld van beddingvormen in Figuur 37), en daardoor enige tijd na aanleg niet in de van Veen of Hamon happens terecht komen. Een andere mogelijkheid is dat het van bovenstrooms aangevoerde zand zich mengt met het grove minder mobiele grind, en (zonder noemenswaardige verandering van de bodemligging) zorgt voor een verfijning van de toplaag. Hierbij kan spelen dat op de suppletielocatie een sedimentatie trend aanwezig was voorafgaande aan de suppleties (paragraaf 4.4.2).
- De radiometrische metingen met MEDUSA, waarbij de verspreiding van tracer materiaal (graniet) na suppletie van 2016 werd gevolgd, tonen eveneens dat na circa km 864,5 het tracer materiaal wordt vermengd met bodemmateriaal en in concentratie afneemt. Meerdere processen kunnen hierbij een rol spelen, bijvoorbeeld bovengenoemde verticale sortering door beddingvormen, of door verschillende snelheid in stroomafwaartse spreiding voor verschillende sedimentfracties door verschillen in mobiliteit (zie ook Gözl et al., 2006). Daardoor kan er ook afdekking van het tracer materiaal plaatsgevonden hebben met sediment afkomstig van een bovenstrooms suppletievak. Ook daaruit volgt dat er processen optreden die zorgen voor snelle 'uitdamping' van golfgedrag in bodemsamenstelling.
- Het zandpercentage in het beschouwde traject aan de linkerzijde ligt gemiddeld tussen de 20 en 40%. Aan de rechterzijde ligt dit percentage tot en met km 863 tussen de 10 en 40%, en benedenstrooms van km 863 loopt dat weer op tot 20 à 40%. Voor de rivieras geldt dit ook, alleen treedt de overgang naar 20 à 40% al op rond km 862. Uit de literatuur volgt dat voor een zandfractie groter dan 15% sprake is van een "matrix supported bed". De grove korrels 'drijven' in een fijn-korrelige matrix (<15% is een "clast-supported bed"). Sambrook Smith et al. (1997) beschrijft verder dat in geval van een zandfractie van 20-40% in een bimodaal mengsel, de bedding omschakelt van een grindbedding naar een bedding dat zich gedraagt als een zandbedding (Sambrook Smith et al., 1997). Omdat de samenstelling van het mengsel in de Boven Rijn ongeveer samenvalt met deze transitie van clast- naar matrix-supported bedding zal het morfologische gedrag van dit traject dat van een zandbedding benaderen. Deze conditie is nog sterker van toepassing op de Waal waar het percentage zand nog veel hoger is.

Op basis van deze analogie in zandpercentages tussen Boven Rijn en Waal, veronderstellen we dat de waarnemingen voor de Boven Rijn suppletie vertaalbaar zijn naar de benedenstroomse trajecten.



Figuur 46 Overzicht van gemiddelde diameter D_g ter plaatse en benedenstrooms van de suppletielocaties.

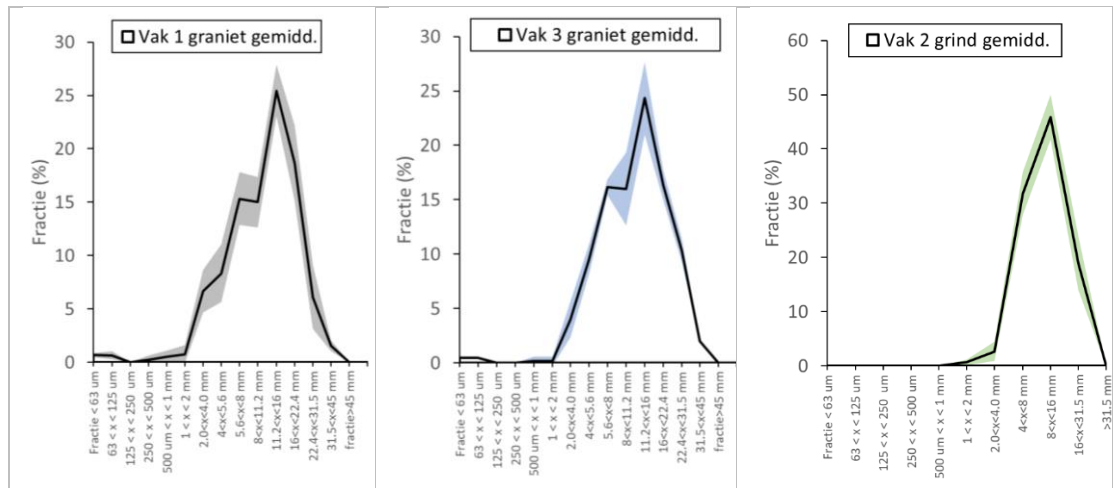


Figuur 47 Overzicht van zandpercentage ter plaatse en benedenstrooms van de suppletielocaties.

5.2.3 Samenstelling van het gesuppleerde materiaal en invloed van storten

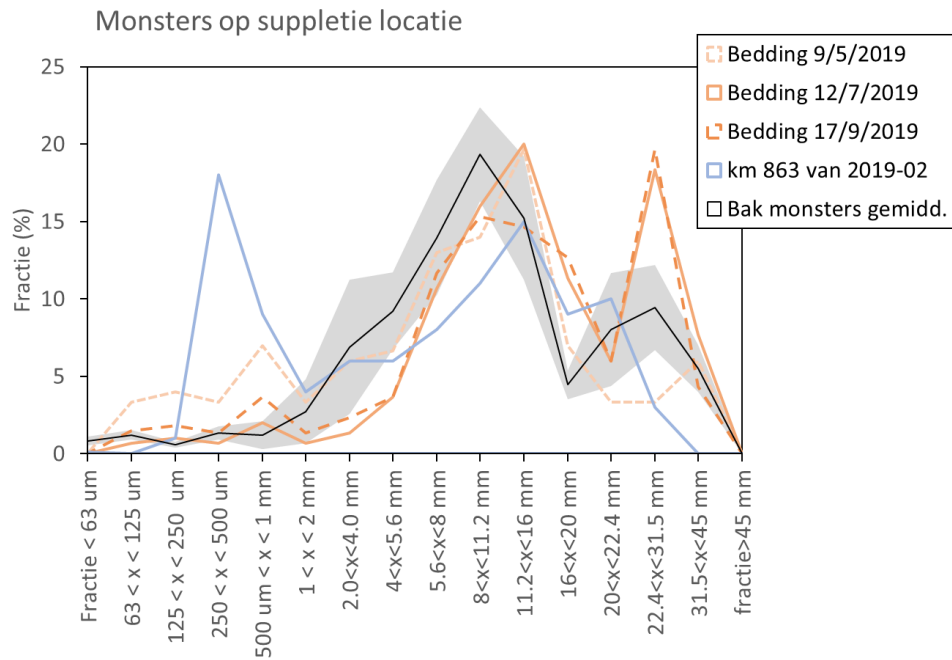
De eerste suppletie heeft plaatsgevonden tussen de bemonsteringen van maart 2016 en november 2017. In deze suppletie is in Vakken 1 en 3 een mengsel van Norstone graniet aangebracht. In Vak 2 is een mengsel van grind gestort. In alle drie de vakken is vrij grof materiaal gestort: de zandfractie ontbreekt vanwege praktische redenen.

Figuur 48 toont de gemiddelde verdeling (met bandbreedte) van de monsters van het gebruikte sediment. Voor Vak 1 is gemiddeld over 9 monsters, Vak 2 over 13 monsters, en Vak 3 over 6 monsters. Alle zeefkrommes zijn te vinden in Annex D.1. De verdelingen zijn redelijk consistent, en hebben allen een gemiddelde waarde D_g rond de 10 mm (met standaardafwijking van slechts 0,5 mm) en een D_{50} van ongeveer 11 mm. Deze verdeling (met bijbehorende statistiek) blijkt redelijk goed overeen te stemmen met het grind-deel van de monsters die op deze locatie voorafgaande aan de suppletie van de bedding zijn genomen.



Figuur 48 Samenstelling van gesuppleerd materiaal in 2016 (februari – april). De donker lijn geeft het gemiddelde van de zeefkrommes van de monsters in ieder vak. De bandbreedte om het gemiddelde geeft de standaardafwijking.

De tweede suppletie heeft plaatsgevonden tussen de bemonstering 2019-02 en 2019-09. In de verdeling van 2019-09 is dit terug te zien bij km 863 in een forse piek aan de rechterzijde van Figuur 44 in de vorige sub-paragraaf, in de sedimentklasse 20-31,5 mm. Hoewel voorafgaande aan de suppleties een beperkte piek van deze klasse in de bestaande bedding al zichtbaar is (vooral de monsters op km 861) is de piek direct na suppletie extreem voor deze locatie. De bemonsteringen van Martens en Van Oord (hierna MVO genoemd) van de bedding en van sediment in de bakken voor de stort in 2019, tonen inderdaad ook deze opvallende piek. Deze is consequent aanwezig in alle monsters over de hele duur van de suppletiebemonstering door MVO (4 maanden). Dit is getoond in Figuur 49. Hoewel Lokin en Barneveld (2019) stellen dat de samenstelling van de suppleties binnen een bandbreedte vallen die overeenstemt met de ontvangende bodem, tonen de zeefkrommes dat om praktische redenen voornamelijk grove (grind) fracties zijn gesuppleerd.



Figuur 49 Fractieverdeling van monsters genomen vlak voor en tijdens de suppletie door MVO en RWS. De lijnen voor 9-mei, 12 juli, en 17 september 2019 tonen het gemiddelde van de monsters op locaties 1 t/m 3 rond km 863.4. De lijn "Bak monsters gemidd." is het gemiddelde van 16 monsters genomen uit de bakken voor het storten in de periode 18 april t/m 8 juli 2019. De grijze band rond deze lijn geeft het omhullende (standaardafwijking per fractie) van alle monsters uit de bakken.

In de bemonsteringen van de bedding zonder suppleties (zowel links, midden en rechts) ligt het totale aandeel zand met name in de klassen tussen 250 μm en 1 mm in de orde van 20 à 30% van het totale mengsel, zowel in 2016 als in 2019. In Figuur 49 is dat geïllustreerd met de fractieverdeling van km 863 van februari 2019 (voor de suppletie). Uit de figuur blijkt dat deze zandfractie in de monsters van het gesuppleerde materiaal ontbreekt, en dat het aandeel grof materiaal met zeefdiameter $D > 20$ mm groter is dan de ontvangende bodem. In de 2016 suppleties is dat aandeel niet aanwezig.

De monsters die MVO heeft genomen van de bodem direct na de suppletie op 12/7 en 17/9 zijn nog grover dan de monsters uit de bakken, zoals blijkt uit Figuur 49 en Figuur 46. Ook is het zandpercentage van de grofste monsters vrijwel nihil (Figuur 47). Uit de korrelverdelingen in Figuur 45 blijkt dat de MVO monsters van de bedding vooral afwijken 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. Echter, 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.

Voor beide suppleties geldt 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. De relatief snelle verfijning van de bedding na de suppletie (zoals volgt uit de monsters) kan ertoe hebben geleid dat sedimenttransportgradiënten, en dus de morfologische effecten, vrij snel na aanleg niet sterk meer worden beïnvloed door de samenstelling van het gesuppleerde materiaal. Het is aannemelijk dat de verfijning van de toplaag wordt veroorzaakt door de aanvoer van fijner sediment van bovenstreams. In geval er wordt gesuppleerd met alleen een fijne fractie (zand) zal het mogelijk langer duren voordat het grove (minder mobiele) sediment van bovenstreams wordt aangevoerd en zorgt voor een herstel/vergroving van de toplaag. In dat geval zal mogelijk de morfologische respons van de suppletie sneller plaatsvinden.

We constateren dat bij het voorgeschreven mengsel een bandbreedte is aangegeven rond een cumulatieve zeefkromme. De band biedt echter de mogelijkheid om consistent te grof te suppleren, dus met een verdeling die juist voldoet aan de uiterste onderzijde van de band. De suppleties voldoen dan niet aan de eis dat deze gemiddeld overeenstemmen met het ontvangende sediment. Uit de zeefkrommes in deze paragraaf blijkt dat het hier vooral gaat om toevoegen van een zandfractie met diameters tussen 250 µm en 1 mm. In deze situatie had het wellicht mogelijk geweest om bijvoorbeeld eerst een suppletie met zand uit te voeren, direct gevolgd door een afdekking met het grovere materiaal uit de winput, en dit vervolgens afwisselend te herhalen gedurende opeenvolgende ritten. De dynamiek op de bedding zorgt voor menging van dit sediment.

5.3 Conclusies

Uit de analyse van de bodemsamenstelling zijn de volgende conclusies te trekken:

De bodemsamenstelling van de Boven Rijn zonder 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 benedenstreams van de in 2012 aangelegde vaste laag bij Spijk (rechts) 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.
- Uit de bemonstering van Martens en van Oord in 2019 van het suppletiemateriaal in de winlocatie en van de bedding na de suppletie, kan worden afgeleid dat het gesuppleerde materiaal in de tweede suppletie ook gemiddeld grover is dan de ontvangende bodem. Over het algemeen ontbreekt de fractie zand met diameters van 250 µm tot 1 mm, en is er een hoger percentage grof materiaal met diameter > 20 mm dan gemiddeld in de bedding. Ook de monsters van de eerste suppletie laten een mengsel zien dat aan de grove kant van de voorgeschreven bandbreedte ligt. 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, doordat het percentage grind met diameters 2 tot 5,6 mm sterk is afgenomen, en het percentage grof grind van 22,4 tot 31,5 mm is toegenomen. 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, Koolstra (2020b) en Niesten et al. (2017) geven verschillende waarden voor verschillende periodes. 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 fluctueert 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.

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 happens 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.

Aanbevelingen voor toekomstige suppleties:

- In geval van toekomstige suppleties in de Boven Rijn kan ervan worden uitgegaan dat toepassing van een relatief grof mengsel, waarin de zandfractie grotendeels ontbreekt, niet zal leiden tot een vergroving van de toplaag van de bedding. Dit is echter vooral van toepassing voor suppleties met een interval en volume dat vergelijkbaar is met de suppleties in 2016 en 2019. Het grove sediment zal echter wel worden opgenomen in de bedding, en zal dan bij grotere volumes beschikbaar komen voor sedimenttransporten. Dit betekent dan ook, dat voor een gewenste vergroving van de toplaag, en beschikbaarheid voor transporten, er een aanzienlijke hoeveelheid grof sediment moet worden gesuppleerd voordat het leidt tot een zichtbare vergroving (zichtbaar in de toplaag die wordt bemonsterd).
- Voor een suppletie met een fijn mengsel (bijvoorbeeld alleen zand) kan naar verwachting niet worden verondersteld dat er een snelle aanpassing van de samenstelling van de bedding optreedt, en dat deze 'verfijning' een grotere en langdurigere invloed kan hebben op de morfologische ontwikkeling van het suppletievolume. Dit is echter een hypothese die niet kan worden geverifieerd met de waarnemingen van de suppleties in de Boven-Rijn. Voor dergelijke suppleties wordt aanbevolen ervaring op te bouwen door deze toe te passen en te monitoren.
- Om meer inzicht te krijgen in de sorteringsprocessen die leiden tot het 'verdwijnen' van de grove fracties, wordt aanbevolen ter plaatse van de suppleties en benedenstreams van de suppleties een aantal boringen van de bodem uit te voeren. Daarmee kan de verticale structuur van de actieve laag worden bestudeerd, wat met de normale bemonstering niet mogelijk is.
- Voorschrijven van een bandbreedte rond de gemiddelde zeefkromme kan leiden tot een structureel te grof of te fijn mengsel, dat past bij de meest grove of meest fijne monsters in de omgeving. Bij het suppleren voor het creëren van een vaste laag is een grof (immobiel) mengsel noodzakelijk, maar voor suppletie voor aanvulling van een tekort in sedimentaanbod is het nodig een sortering te kiezen die past bij het bodemtransport onder normale condities. Om te suppleren met een mengsel dat bijdraagt aan het gemiddelde natuurlijke sedimenttransport, is het wellicht beter om extra eisen te stellen aan het percentage zand, en een gemiddelde korreldiameter van de zand fractie en van de grind fractie in de suppletie. Een bandbreedte kan worden toegepast, maar de ruimte waarin kan worden gevarieerd is op basis van de huidige studie niet te geven. Hiervoor is meer ervaring nodig. Door toepassing van een uitgekiend mengsel met zowel zand als grind, kan worden voorkomen dat bij herhaalde suppleties een accumulatie van grove of fijne fracties ontstaat, en een grootschalige (benedenstroomse) beïnvloeding kan optreden. Over het algemeen kan worden verondersteld dat het mengsel dat als bodemtransport wordt getransporteerd iets fijner is dan de samenstelling van de bodemmonsters. Het aandeel van zand speelt daarbij een grote rol. De beschikbaarheid van sediment met een juiste sortering is wellicht lastig, en het zal wellicht nodig zijn om een mengsel samen te stellen uit verschillende bronnen. Hoewel deze menging voor het aanbrengen kan worden toegepast, wordt opgemerkt dat de menging ook door de natuurlijke processen op de bodem kan optreden. Dit biedt dan de mogelijkheid om bijvoorbeeld verschillende sedimentfracties afzonderlijk (in gescheiden vaarten) laagsgewijs over elkaar te storten. Deze toevoeging wordt dan uitgevoerd met een zogenaamde sandwich-methode. De opmenging gebeurt dan door omwoeling door morfodynamiek en transport.
- De combinatie van suppleties met een grove samenstelling (immobiel) voor vastleggen van eroderende kuilen, en suppleties met een samenstelling van bodemtransport, is een strategie die in Duitsland met succes is toegepast voor de stabilisatie van de Niederrhein. Aanbevolen wordt om kennis te nemen van de ervaringen en methoden die hiervoor zijn gebruikt, en deze zo mogelijk te vertalen naar een strategie voor de Rijntakken.

6 Effect op waterstanden

6.1 Onderzoeksvragen

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

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

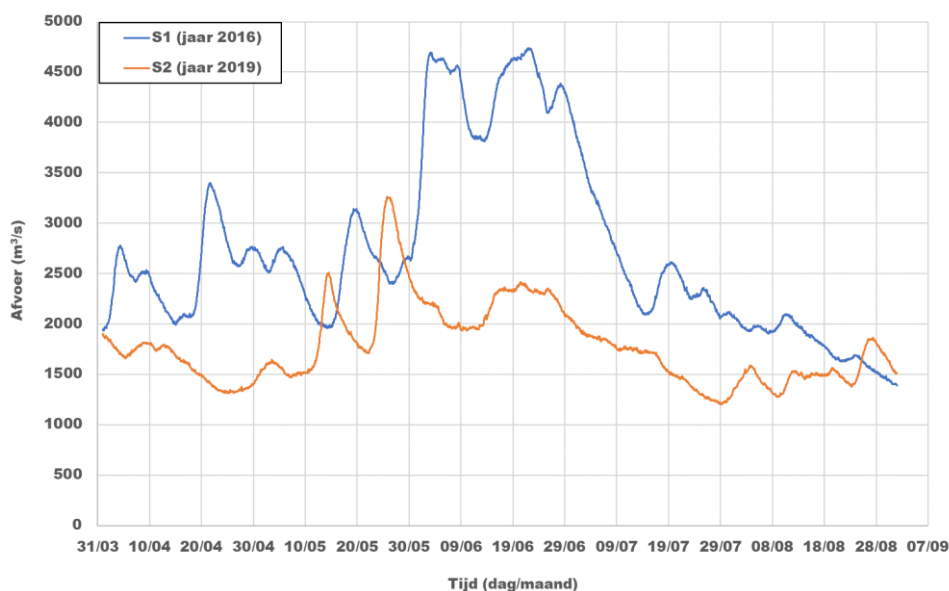
Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

- 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.

6.2 Ontwikkelingen in de gemeten waterstanden

De focus voor de analyse ligt op de invloed van de suppleties op de ontwikkelingen in waterstanden en waterstandsverval in de jaren voorafgaand, tijdens en na de uitvoering van elk suppletiedeel rekening houdend met de andere ontwikkelingen die van invloed kunnen zijn. Zoals te zien is in Figuur 50 hieronder is bijvoorbeeld de afvoer bij Lobith anders geweest tijdens de periode rond de eerste suppletie (S1) dan in de periode rond de tweede suppletie (S2), en dit heeft naar verwachting ook invloed gehad op de verplaatsing van het gesuppleerde materiaal. In de periode tussen de eerste en de tweede suppletie zijn hogere afvoeren tot 7.500 m³/s gemeten, gevolgd door de lage afvoerperiode van tot 3.300 m³/s tijdens de tweede suppletie."



Figuur 50 Afvoer bij LMW-station Lobith in de periodes van aanleg van de suppleties. NB: In de analyses zijn de afvoeren en waterstanden van langere periodes meegenomen, zie beschrijving van de beschouwde periodes in de tekst.

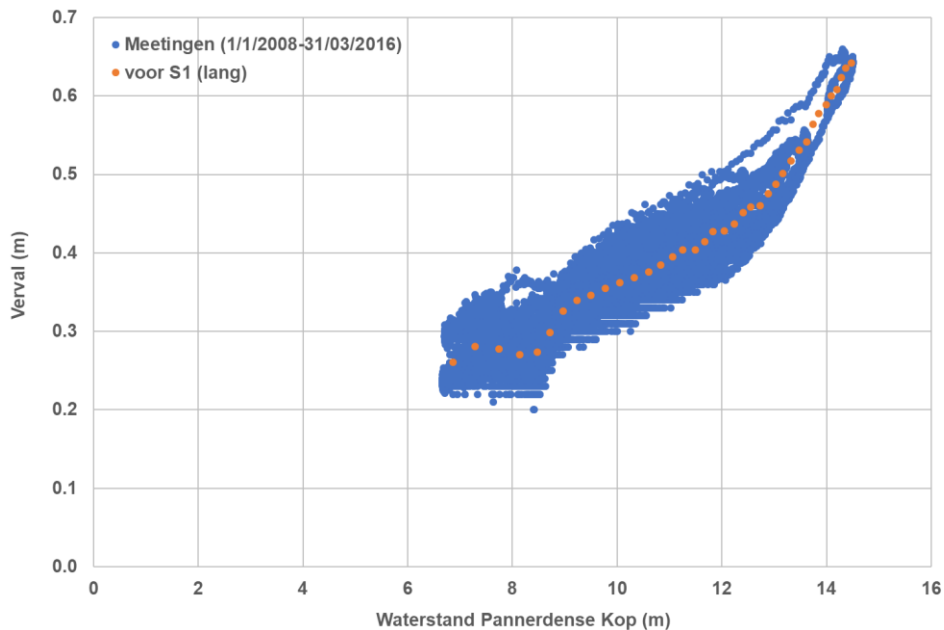
De tijdreeksen van het Landelijk Meetnet Water (LMW) (ook wel MWTL genoemd) worden gebruikt voor de analyse. De gegevens zijn op 12 september 2022 gedownload van waterinfo.rws.nl. De nieuwe, meest recente Qf-relatie is nog niet van toepassing in de gedownloade gegevens voor de periode tot december 2020. De tijdreeksen bestaan uit gemeten waterstanden en de daaraan gekoppelde afvoeren bij de Pannerdenschse Kop en Lobith voor de periode januari 2008 t/m december 2020 (voor meer recente periodes ontbreken de gegevens voor de Pannerdenschse 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 wordt verwacht. De waterstand bij Lobith wordt echter beïnvloed door zowel de suppletie als veranderingen benedenstrooms van het suppletietraject. Om invloeden van veranderingen benedenstrooms zo veel mogelijk uit de analyse te verwijderen wordt in plaats van absolute waterstanden het verval tussen meetstations Lobith en Pannerdenschse Kop bekeken.

De waterstandmetingen worden 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 worden de volgende periodes gedefinieerd:

- 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)

De methode van de gemiddelde waterstand per afvoer-bin lijkt redelijk te werken zoals gezien kan worden in Figuur 51. In de metingen (voor middeling van waterstanden per afvoerbin) ligt de variatie van het verval voor dezelfde waterstand bij station Pannerdenschse Kop wel in de orde van een decimeter.

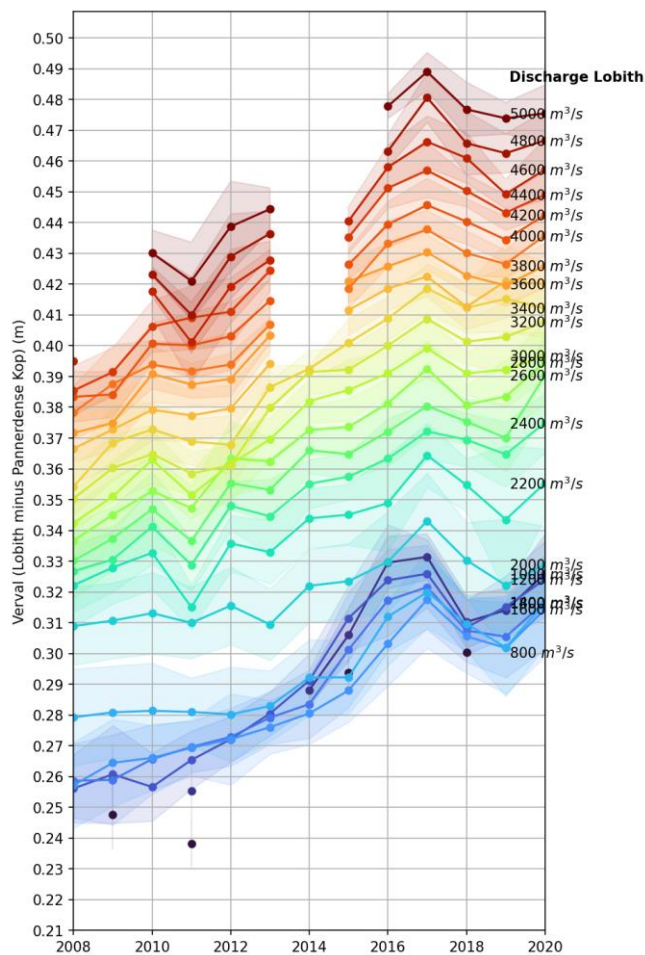


Figuur 51 Waterstandsverval (Lobith-Pannerdenschekop) versus waterstand bij Pannerdenschekop voor de periode 01/01/2008-31/03/2016 op basis van de metingen (blauw) en volgens de gemiddelde waterstand per afvoer-bin (oranje).

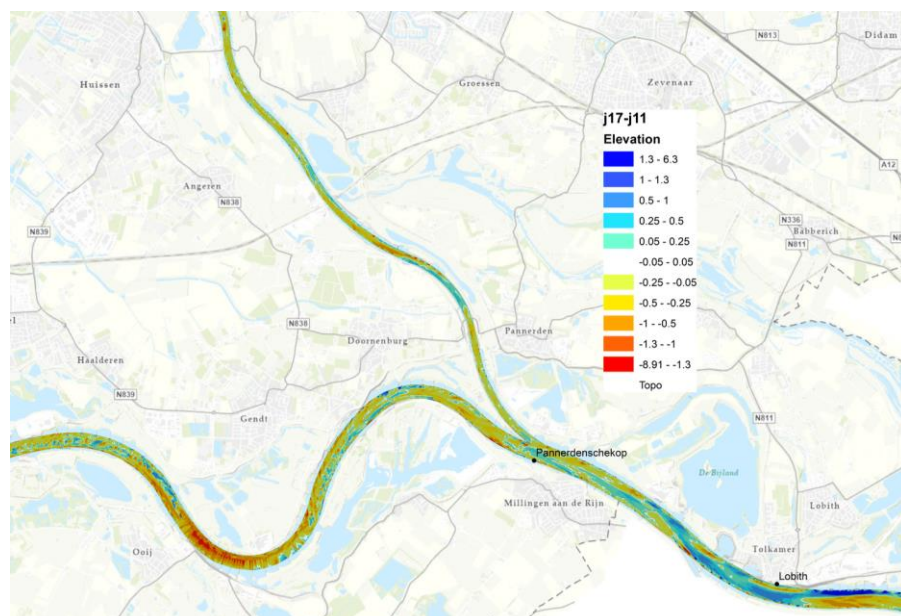
Figuur 52 laat het verloop het waterstandsverval in de tijd zien voor de verschillende afvoerbins. Figuur 54 en Figuur 55 tonen het waterstandsverval (tussen Lobith en Pannerdenschekop) versus de waterstand bij de Pannerdenschekop voor de boven genoemde periodes. De spreiding van de metingen is ook opgenomen, als voorbeeld voor de korte periode van tijdens de suppleties, waar de kleinste spreiding te verwachten is. Uit deze figuren kan het volgende geconcludeerd worden:

- Figuur 52 laat een geleidelijke toename zien van het waterstandsverval over de periode 2008 tot 2017. Deze trend wordt mogelijk veroorzaakt door de bodemdynamiek (continue insnijding van de zomerbedbodem van vooral de Waal) en in mindere mate de uitgevoerde projecten die van invloed kunnen zijn tijdens lage afvoer in de Rijn. Figuur 53 toont het bodemhoogteverschil tussen de jaren 2017 en 2011. Deze vergelijking laat het steeds verder insnijden van de zomerbedbodem in de Boven-Waal zien. De bodemveranderingen en de daarop reagerende afvoerverdeling zijn vermoedelijk de grootste oorzaak van de waterstandstrends. Benedenstrooms van Pannerdenschekop daalt de waterstand sneller dan bij Lobith. De daling in de Waal trekt ook de waterstand bij Pannerdenschekop sneller naar beneden dan bij Lobith, waardoor het verval steeds groter wordt. In 2017 waren de werkzaamheden rondom Haven Tolkamer-Tuindorp gaande. Het effect van de haven op waterstanden bij mediane en lage rivierafvoeren zou beperkt moeten zijn. Tussen 2013 en 2022 is veel werk verzet in natuurgebied de Millingerwaard net ten zuiden van de Boven Waal. Het is niet bekend of de Millingerwaard in de periode tot 2020 van invloed kan zijn geweest voor lage of mediane afvoeren.
- Van 2017 tot 2019 is een lichte afname van het peilverschil waar te nemen. De variaties in de periode 2016 tot 2020 blijven van kleine orde van 1 tot 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.

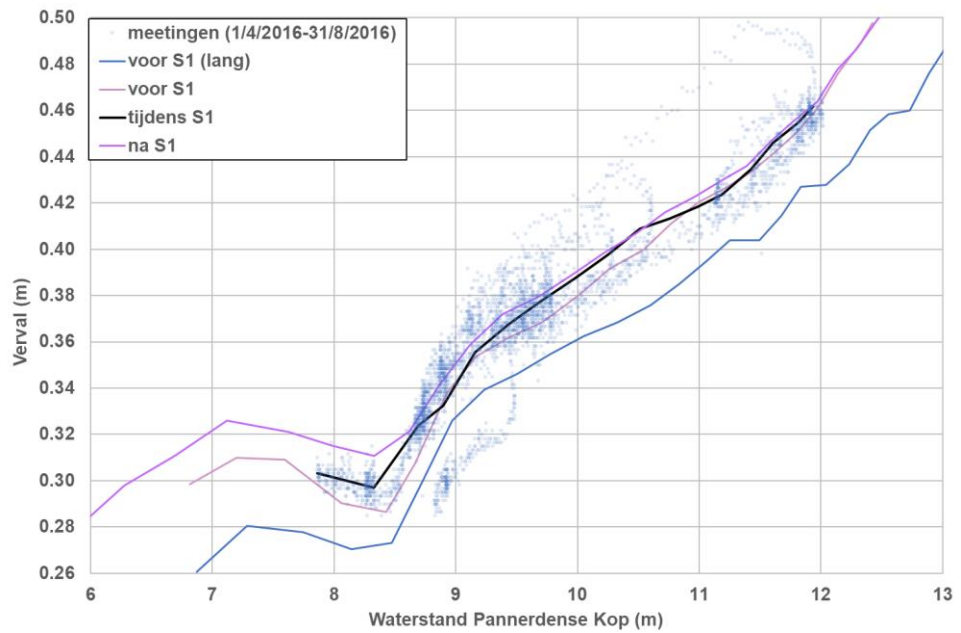
- De invloed van alle ontwikkelingen door de jaren heen (bodemontwikkeling) is ook goed te zien in vergelijking van voor *S1 (lang)* met die voor *S1* (Figuur 54). De lijn voor *S1 (lang)* toont het gemiddelde van de jaren 2008 tot 2016, terwijl de lijn voor *S1* het gemiddelde van de kortere periode (2015 tot 31 maart 2016) toont. Omdat er in die tijd een trend van toenemend verval is, ligt de lijn voor de kortere en latere periode hoger.
- Het waterstandsverval verandert tot maximaal 2 cm tijdens en na uitvoering van de eerste suppletie tijdens lage afvoeren. Het effect tijdens hoge afvoeren is gering (Figuur 54). Zoals te zien is in Figuur 54 en Figuur 55 is de spreiding in de data, zelfs in de korte periodes tijdens de suppleties, veel groter dan de verschillen tussen de lijnen van de verschillende periodes. De verschillen tussen de lijnen hebben dus maar beperkte waarde. Tijdens de tweede suppletie lijkt het verval in Figuur 55 zelfs minder te worden dan voor de suppletie. Dat is niet logisch. Het is daarbij op te merken dat in de periode voorgaand aan deze suppletie hoge afvoeren (tot 7.500 m³/s) zijn gemeten (hoogwater januari 2018). Paragraaf 4.4.4 laat zien dat dat hoogwater grote veranderingen in de bodemligging heeft geïnitieerd. Met name de sedimentatie aan de rechterkant van de rivier tussen rkm 862,7 en 863,2 kan hier een rol spelen. Gemiddeld over de rechterhelft van de rivier is de bodem hier, direct benedenstrooms van meetstation Lobith en op het ondiepste punt van het traject, 50 cm omhoog gekomen. Dit kan voor opstuwung bij Lobith en dus een groter verval voorafgaand aan de tweede suppletie gezorgd hebben. Eind 2018, net voor aanleg van de tweede suppletie, is dit materiaal verwijderd bij vaargeulonderhoud, waardoor er tijdens de aanleg van de tweede suppletie geen sprake meer was van de extra opstuwung.
- Bij deze conclusies moet men in het achterhoofd houden dat de variatie in de metingen groter is dan de verschillen in de lijnen van de per afvoer-bin gemiddelde waterstanden, zie Figuur 51. 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.
- Om alleen de invloed van de suppleties uit de metingen te isoleren, is moeilijk gezien er andere factoren een rol gespeeld kunnen hebben zoals de dynamiek van de bodem. Daarom wordt in paragraaf 6.3 het waterstandseffect van de suppleties afgeleid uit modelberekeningen, waarbij de suppletie als enige veranderende variabele behouden blijft.
- De analyse van de bodemsamenstelling heeft laten zien dat de suppleties geen aanhoudende verandering in samenstelling hebben veroorzaakt (hoofdstuk 5). 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 (hoofdstuk 4). 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.



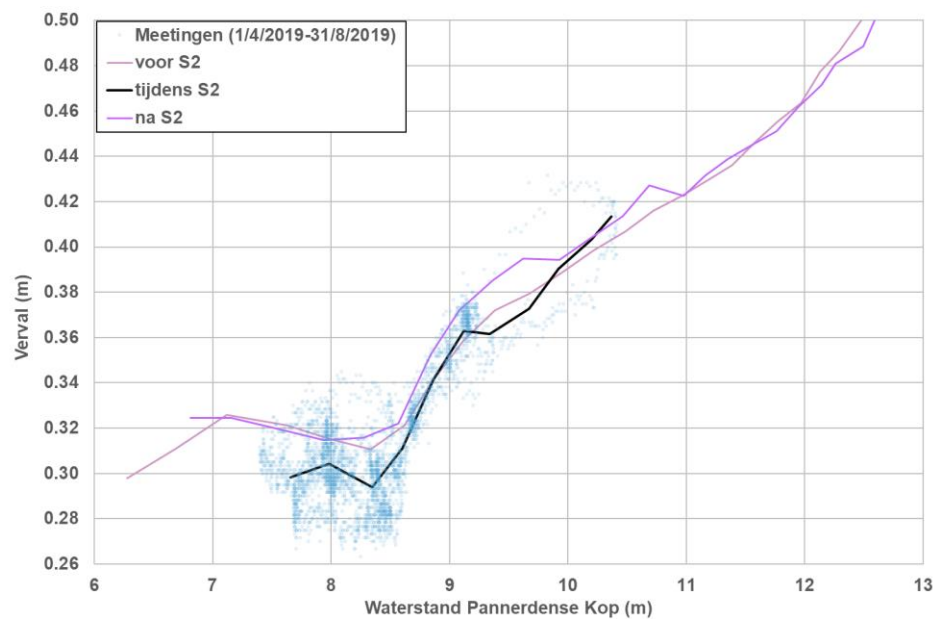
Figuur 52 Trends in waterstandsverschil Lobith minus Pannerdenschekop, met weergave van het gemiddelde en de standaarddeviatie per afvoer- bin ($\pm 100 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur 53 Bodemhoogteverschil tussen 2017 en 2011 (metingen binnen de normaallijnen).



Figuur 54 Waterstandsverval (Lobith-Pannerdensch Kop) versus waterstand bij Pannerdensch Kop voor verschillende periodes rondom de eerste suppletie van het jaar 2016 inclusief de spreiding van de metingen tijdens de suppletie periode.



Figuur 55 Waterstandsverval (Lobith-Pannerdensch Kop) versus waterstand bij Pannerdensch Kop voor verschillende periodes rondom de tweede suppletie van het jaar 2019 inclusief de spreiding van de metingen tijdens de suppletie periode.

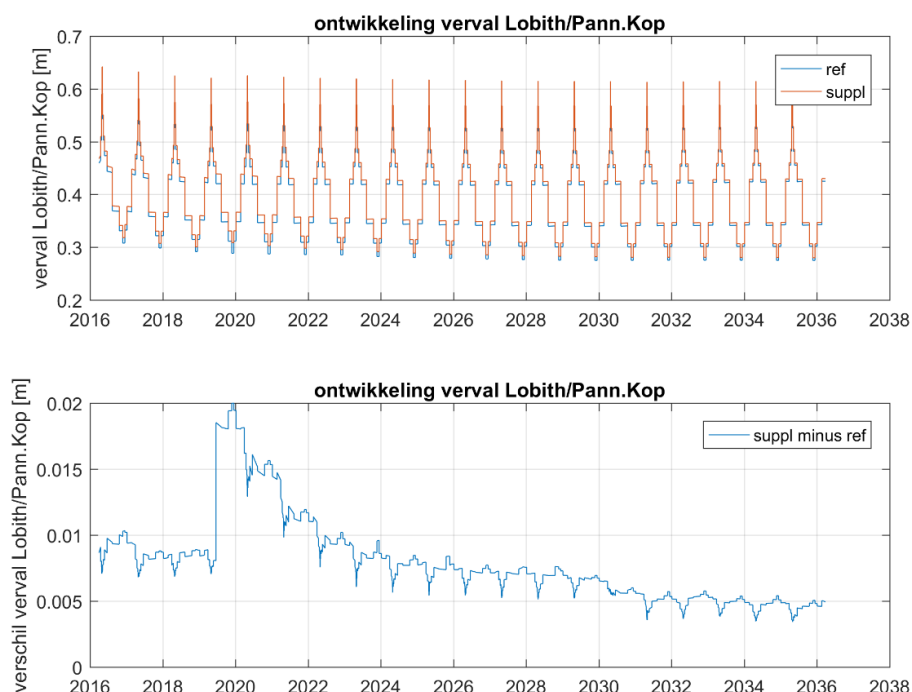
6.3 Invloed van de suppleties op waterstanden volgens modelberekeningen

Omdat het effect van de suppleties op de waterstanden niet eenduidig is af te leiden uit de metingen (paragraaf 6.2) wordt teruggevallen op de morfologische modelberekeningen. Voor deze berekeningen geldt het volgende (zie de beschrijving van de berekeningen in meer detail in paragraaf 7.2):

- De 1^e suppletie (van het jaar 2016) zit in de initiële bodemligging en samenstelling. De 2^e suppletie (van het jaar 2019) wordt na ongeveer 3 jaar instantaan geplaatst.
- De afvoer bij Lobith is opgelegd als een gemiddelde jaarlijkse hydrograaf (zie beschrijving van de prognoseberekeningen in paragraaf 0) en varieert van 1.020 m³/s tot 8.592 m³/s. De hoogste afvoer is dus hoger dan de hoogste gemeten afvoer sinds de aanleg van de suppleties, namelijk 7.541 m³/s.

Het effect op de waterstand wordt berekend als (verval in model met suppletie) – (verval in model zonder suppletie). Daardoor wordt het effect van de suppleties geïsoleerd van de autonome veranderingen in het gebied tijdens de berekeningen. Figuur 56 laat zien dat het effect het grootst is in de eerste 1-2 jaar na aanleg van een suppletie en daarna langzaam afneemt. Zoals verwacht is het effect op de waterstanden het sterkst bij lagere afvoeren en het kleinst bij hoge afvoeren.

Beide suppleties hebben 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). De tweede suppletie is dikker uitgevoerd dan de eerste maar had uiteindelijk iets minder volume (zie paragraaf 2.1). Dat duidt er op dat de dikte iets belangrijker is voor de invloed op laagwaterstanden dan het volume. Becker (2021) heeft een modelstudie voor verschillende suppletievolumes en -geometrieën op de Boven-Waal uitgevoerd. Daarin wordt geen heel duidelijke conclusie over het waterstandseffect direct bovenstrooms van de suppleties getrokken, maar de kaarten van het waterstandseffect laten bij gelijkblijvend volume een iets groter waterstandseffect (orde 1,5 cm meer bij een totaal effect van orde 5 cm) zien bij een duidelijk dikkere (2 m vs. 1 m) en kortere suppletie.



Figuur 56 Ontwikkeling van het verval tussen Lobith en Pannerdensch Kop voor de referentieberekening en de berekening met suppleties (boven) en verschil ertussen (onder) (prognoseberekening).

6.4 Conclusies

De suppleties verhogen de waterstand bij Lobith, dus aan het bovenstroomse einde van de suppleties, met ongeveer 1 cm per suppletie. Vanwege de grote variatie in de waterstandsgegevens is dit getal afgeleid uit de modelberekeningen. Gebaseerd op deze en eerdere modelberekeningen (Becker, 2021) lijkt het waterstandseffect met name bepaald te worden door het volume van de suppletie (lengte, breedte en dikte)

7 Numerieke modellering

7.1 Doel

Als onderdeel van de eindevaluatie suppletie Boven-Rijn zijn Delft3D-berekeningen uitgevoerd (WP1) met en zonder suppleties op de Boven-Rijn. Deze moeten de analyses uit de voorgaande hoofdstukken (4 t/m 6) ondersteunen en helpen om een prognose voor de dynamiek en effecten van de suppleties in de toekomst te maken.

We gebruiken in de berekeningen een bestaande Delft3D-4 modelschematisatie, met enige relevante aanvullingen. Het Delft3D-model beslaat de Duitse Rijn vanaf km 826, de Boven-Rijn, het Pannerdensch Kanaal tot de IJsselkop en de Boven-Waal tot Nijmegen.

We maken in dit hoofdstuk onderscheid tussen:

- Een hindcast, waarin het werkelijke afvoerverloop van april 2016 t/m zomer 2022 is gemodelleerd. Deze simulaties gebruiken we voor het beoordelen van de modelprestatie door vergelijking met metingen.
- Een prognose, waarin een representatieve jaarlijkse afvoerhydrograaf 20x herhaald wordt om (langjarige) (neven)effecten van de suppleties in beeld te brengen. Deze resultaten zijn in hoofdstuk 4 en 6 gebruikt om de prognose van toekomstige ontwikkelingen te ondersteunen en in Becker (2023) voor het beoordelen van de invloed van de suppleties op diverse rivierfuncties. Dit hoofdstuk geeft alleen een overzicht van de relevante modelresultaten.

Paragraaf 2.1 geeft een beschrijving van het ontwerp en de locatie van de suppleties. De suppleties liggen grofweg tussen rkm 862 en 864 aan de linker zijde in het zomerbed van de Boven-Rijn, waarbij de 2016-suppletie (70.000 m³) een groter gebied beslaat dan de 2019-suppletie (55.000 m³). Voor de numerieke analyse, en de interpretatie van de resultaten, is de vaste laag Spijk (opvullen van de buitenbocht met ruim 200.000 m³) die net bovenstrooms van de suppleties ligt (Figuur 57) van belang.



Figuur 57 Locatie van suppleties en vaste laag Spijk.

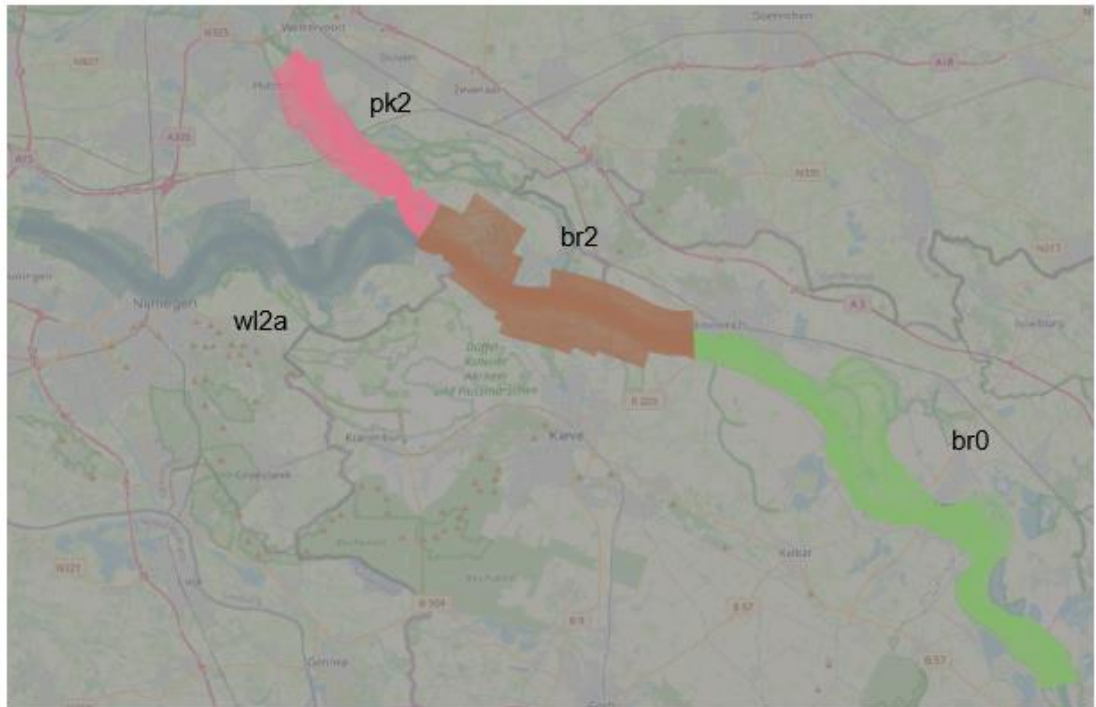
Paragraaf 7.2 beschrijft de modelopzet in Delft3D; daar komen onder andere de toegepaste hydrografen en de aanpak voor implementatie van de 2019-suppletie aan de orde. In paragraaf 7.3 wordt ingegaan op de vaste laag bij Spijk en in hoeverre die de effecten van de suppleties al dan niet beïnvloedt. De modelprestatie is beoordeeld aan de hand van hindcast-simulaties in paragraaf 0. De modelresultaten voor de prognose-simulaties over een periode van 20 jaar, die in andere deelprojecten zijn gebruikt voor het in kaart brengen van (neven)effecten van suppleties op rivierfuncties, zijn beschreven in paragraaf 7.5.

7.2 Modelopzet in Delft3D-4

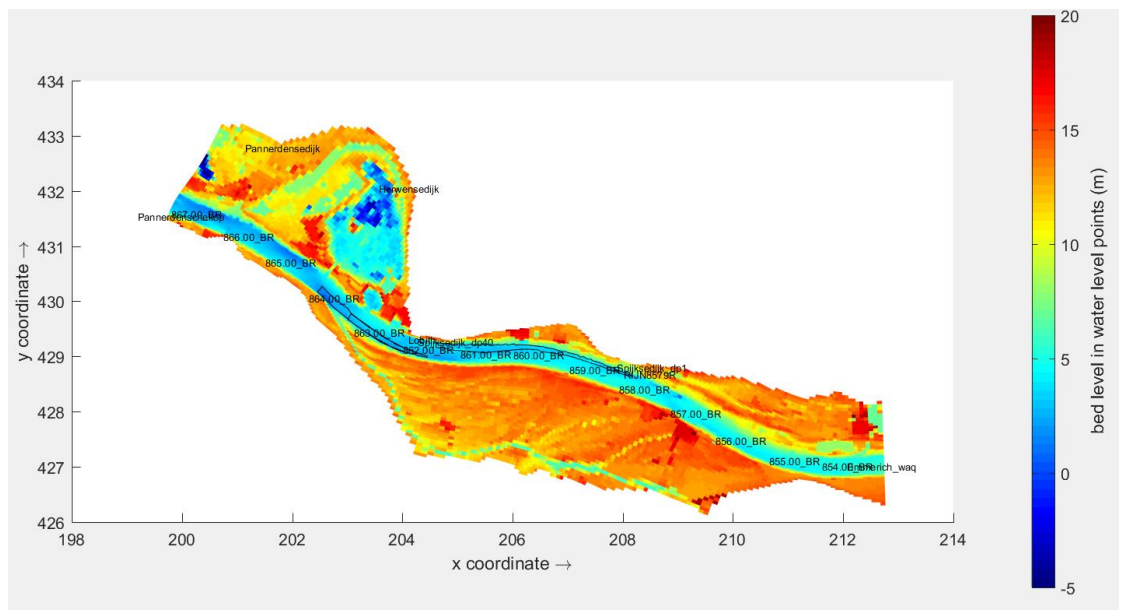
7.2.1 Basismodel

Nielsen et al (2017) heeft, op basis van het reguliere DVR-model, een Delft3D-4 modelschematisatie opgesteld van het interessegebied. Daarbij zijn de gangbare DVR-rekenroosters niet aangepast c.q. verfijnd. De zomerbedbodempligging is wel vervangen door een recente bodempeiling en de 2016-suppletie is verwerkt in de initiële bodempligging. Het model bevat gegradeerd sediment waarbij de formulering van de actievlaagdikte is aangepast (zie paragraaf 7.2.3). Voor de studie in dit rapport is dit model als basis gebruikt. Het model is daarbij uitgebreid ten aanzien van (i) de gemodelleerde afvoerreeks en (ii) functionaliteit voor baggeren -en storten (vaargeulonderhoud) op basis van Becker (2021). De 2019-suppletie is verwerkt in de modelschematisatie op een soortgelijke wijze als Nielsen et al (2017) dat voor de 2016-suppletie heeft gedaan. Initiële condities en Qh-relatie zijn overgenomen uit de modelstudie van Nielsen et al (2017). De gebruikte Delft3D-versie is "Deltares, FLOW2D3D Version 6.04.00.69179, Jun 11 2021, 21:29:34". Verdere details van de gebruikte modelschematisatie en modelinstellingen zijn te vinden in Nielsen et al (2017) en Becker (2021).

Figuur 58 geeft een overzicht van het modeldomein (roosters) en Figuur 59 geeft de bodemhoogte in het interessegebied (br2-domein). De geul in linker uiterwaard is goed te zien. Ook de 'insnoering van de uiterwaard' t.p.v. suppleties komt duidelijk naar voren (linker oever, zijde suppletie), welke een invloed heeft op het morfologisch gedrag in het zomerbed ter plaatse van de suppleties.



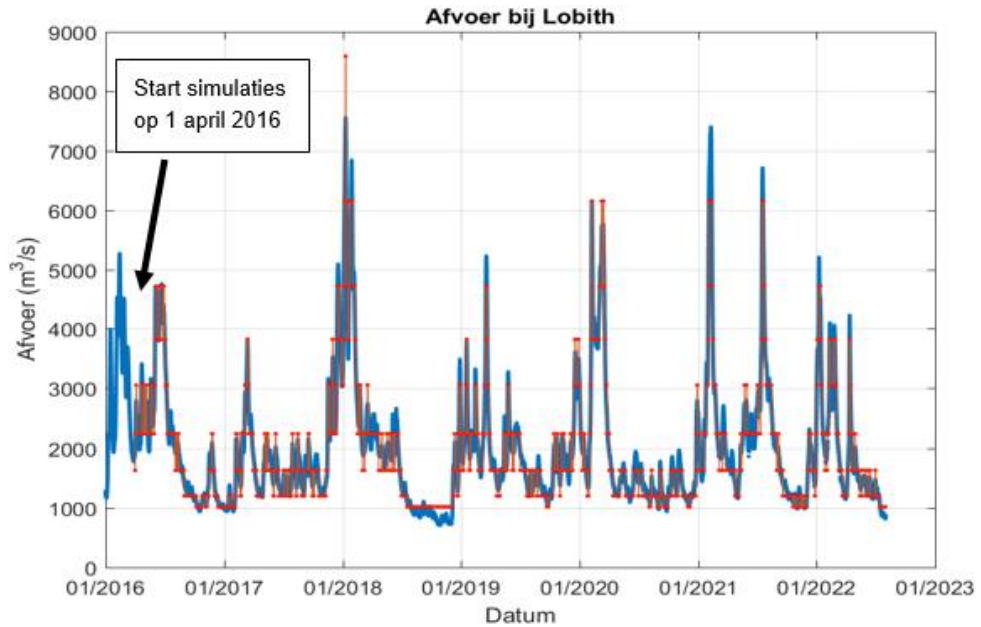
Figuur 58 De gebruikte deelmodelroosters; (anders dan Becker, 2021, waar de hele Waal is toegepast, vergelijk Figuur 2 uit dat rapport).



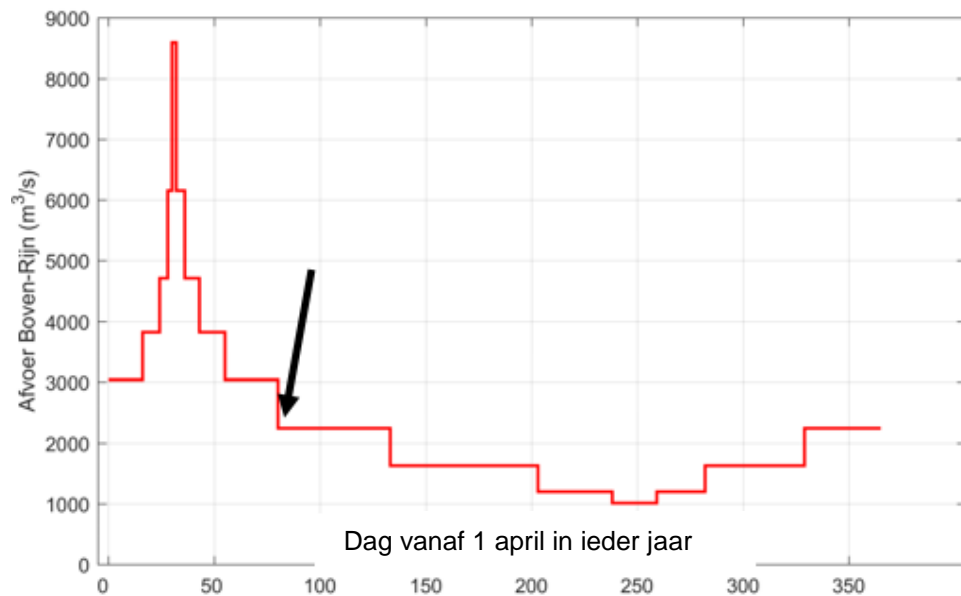
Figuur 59 Bodemhoogte (m+NAP) in het br2-rooster, samen met de locaties van de suppleties en de vaste laag bij Spijk. De geul in de linker uiterwaard is goed te zien. Ook de 'insnoering van de uiterwaard' t.p.v. de suppleties (rond rkm 863) komt duidelijk naar voren (linker oever, zijde suppletie).

7.2.2 Hydrograaf hindcast en prognose

Voor de hindcast schematiseren we het werkelijke afvoerverloop in Boven-Rijn-afvoerniveaus uit het DVR-model (1020, 1203, 1635, 2250, 3053, 3824, 4717, 6151, 8592 m³/s bij Lobith). Afvoermetingen (10-minuten-waarden) zijn ontleend aan waterinfo.rws.nl (download op 26 augustus 2022). Voor discretisatie van de afvoerreeks hanteren we dezelfde werkwijze als Niesten et al. (2017). De afvoerreeks voor de hindcast is weergegeven in Figuur 60. Er is te zien dat door de middeling van afvoer over langere perioden een deel van de hoogwaterpieken in het model lager uitvallen dan in werkelijkheid. Bij het hoogwater van januari 2018 daarentegen gebruikt het model een hogere afvoerpiek dan toen is gemeten.



Figuur 60 Afvoerverloop in de hindcast-berekeningen. Blauwe lijn: metingen, rode lijn: gediscrètiseerd afvoerverloop in de berekeningen. De simulaties starten op 1 april 2016.



Figuur 61 Afvoerhydrograaf in Delft3D voor de prognose, die jaarlijks wordt herhaald (365 dagen). De zwarte pijl geeft het moment weer waarop de suppletie ingebracht wordt in het model (in 2019), zie paragraaf 7.2.3.2.

De gehanteerde afvoerreeks voor de prognose is weergegeven in Figuur 61. Deze afvoerreeks is ook toegepast door Niesten et al. (2017) en Becker (2021) en wordt in de simulaties ieder jaar herhaald. De hoogste afvoer van 8.592 m³/s komt ongeveer eens per 7 jaar voor conform de laatste GRADE-afvoerstatistiek en is dus vrij hoog. De afvoerreeks is echter bepaald op basis van een afvoerduurlijn die is samengesteld uit afvoergegevens van meerdere jaren. Het feit dat deze afvoer niet elk jaar voorkomt weerspiegelt zich daardoor in een relatief korte duur (3 dagen) van dit afvoerniveau. Zowel in de hindcast als in de prognose is het model morfologisch actief bij Overeengekomen Lage Afvoer (OLA, 1020 m³/s); bij deze afvoer vinden er (in ieder geval in het interessegebied met relatief grof sediment) vrijwel geen bodemveranderingen plaats in het model.

7.2.3 Implementatie 2016- en 2019-suppletie

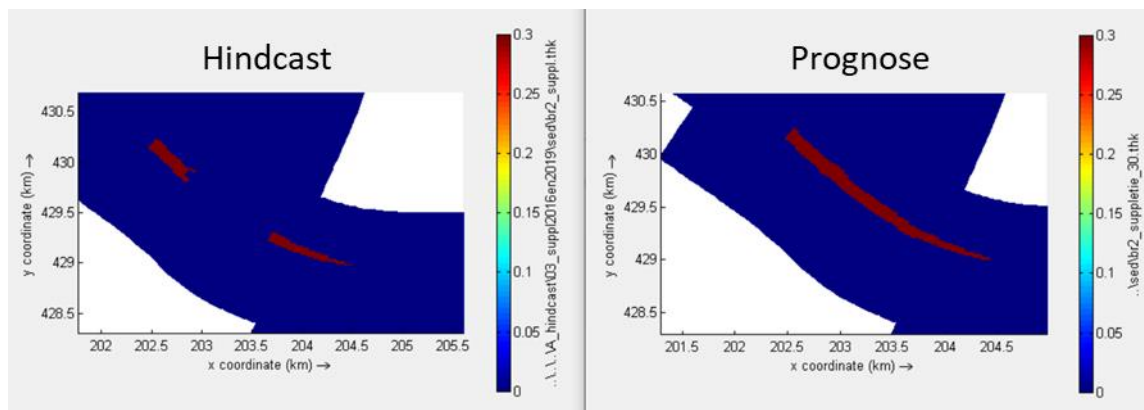
We beschouwen zowel de 2016-, als de 2019-suppletie. De 2016-suppletie is al verwerkt in het basismodel dat we voor dit project hanteren (Niesten et al, 2017; Becker, 2021), zie paragraaf 7.2.3.1. De gehanteerde aanpak voor het inbrengen van de 2019-suppletie in het model is beschreven in paragraaf 7.2.3.2; dat gaat om (i) het tijdstip in de berekening waarop de suppletie (instantaan) wordt ingebracht, (ii) welke bodemverhoging is aangebracht en (iii) welke korrelgrootteverdeling is gehanteerd. Een belangrijk aspect is initiële menging van de suppletie die optreedt voor zowel de 2016- als de 2019-suppletie; dit is toegelicht in paragraaf 0.

7.2.3.1 2016-suppletie

De schematisatie van de 2016-suppletie is overgenomen uit Niesten et al (2017). In de basisschematisatie van het DVR-model is gebruik gemaakt van 4 bodemlagen in de verticaal: één actieve laag (variabele dikte), 2 bodemlagen daaronder van minimaal 0,5 m dik en een base layer van ongeveer 60 m dik. De actievelaagdikte is, net als in de berekeningen voor de suppletiepilot Boven-Rijn (Niesten et al., 2017), gekoppeld aan de waterdiepte, waarbij een minimale actievelaagdikte van 0,5 m is aangehouden. De suppletie is in de bodem opgenomen door een uniforme bodemverhoging van 30 cm toe te passen.

Zowel in de referentiesimulatie als in de simulatie met suppleties is een extra bodemlaag toegevoegd om de suppletie te schematiseren. De korrelgrootteverdeling van de suppletie verschilt tussen de hindcast en de prognose. In de hindcast is de suppletie opgedeeld in 3 vakken.

Vak 1 (bovenstrooms) en vak 3 (benedenstrooms) zijn gesuppleerd met graniet (Figuur 62) dat een hogere dichtheid en een andere korrelgrootteverdeling heeft dan het gesuppleerde grind (Niesten et al, 2017). In deze vakken is de dikte van de nieuwe bodemlaag 30 cm. In het middelste vak (vak 2) is aangenomen dat het suppletiemateriaal hetzelfde is als het materiaal dat aanwezig is in de bodem. In de modelschematisatie is in vak 2 alleen een bodemhoogteverandering toegepast en is de dikte van de extra bodemlaag 0 cm (dat betekent effectief dat er in het model in vak2 wordt uitgegaan van een suppletie van hetzelfde materiaal als dat op de bodem ligt op dat moment). In de prognose berekening is geen onderscheid gemaakt tussen de vakken (Figuur 62) en bestaat het suppletiemateriaal volledig uit graniet met de daarbij horende korrelgrootteverdeling en hogere dichtheid (dan grind). De dikte van de nieuwe bodemlaag is in de prognose over de gehele suppletie uniform (30 cm).



Figuur 62 De dikte van de granietsuppletie in 2016 voor de hindcast en prognose.

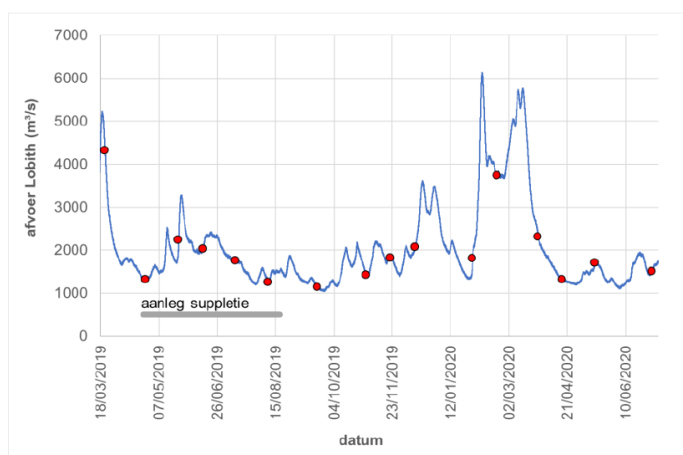
7.2.3.2 2019-suppletie

Voor de 2019-suppletie gebruiken we een soortgelijke aanpak. Voor beide suppleties geldt:

- We gebruiken afzonderlijke (tracer)-fracties, zodat de verplaatsing van de suppletie gevolgd kan worden (in ruimte en ondergrond).
- De suppletie wordt instantaan aangebracht in het model (conform 2016-suppletie), terwijl deze in werkelijkheid gefaseerd is aangebracht.

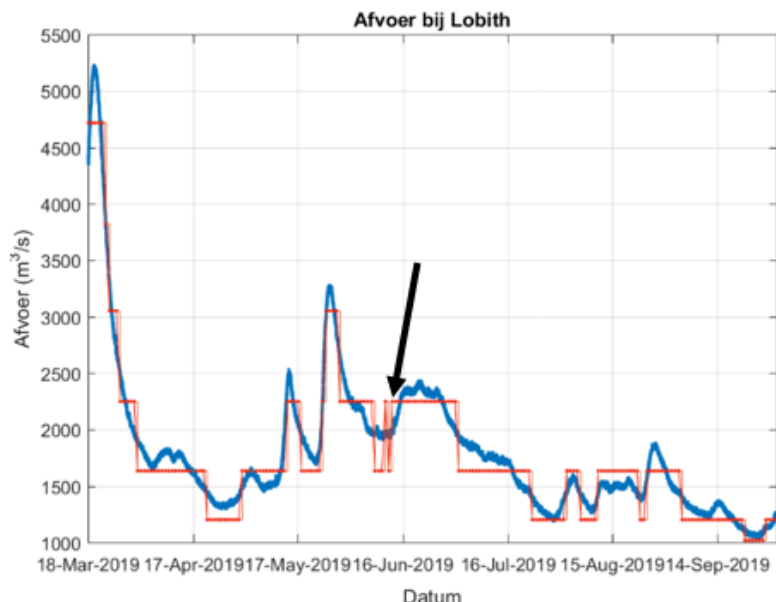
Tijdstip aanbrengen suppletie 2019 in hindcast en prognose

De hindcast-simulaties starten op 1 april 2016 (pijl in Figuur 60). Hoewel de suppletie gefaseerd is aangelegd (en bemeten), gaan we net als Niesten et al. (2017) in het model uit van een eenmalige (instantane) suppletie. De aanlegperiode van de suppletie is te zien in Figuur 63. (De suppletie is tussen eind april en medio augustus 2019; 24 april t/m 19 augustus 2019).



Figuur 63 Afvoer bij Lobith tijdens de uitvoering en monitoring van de tweede suppletie (Becker, 2022).

De suppletie is in de simulaties eenmalig en instantaan uitgevoerd bij de start van het afvoerblok op 13 juni 2019 (bij een afvoer van 2250 m³/s, zie de zwarte pijl in Figuur 64), wat ongeveer halverwege de aanleg van suppleties is (Figuur 63).

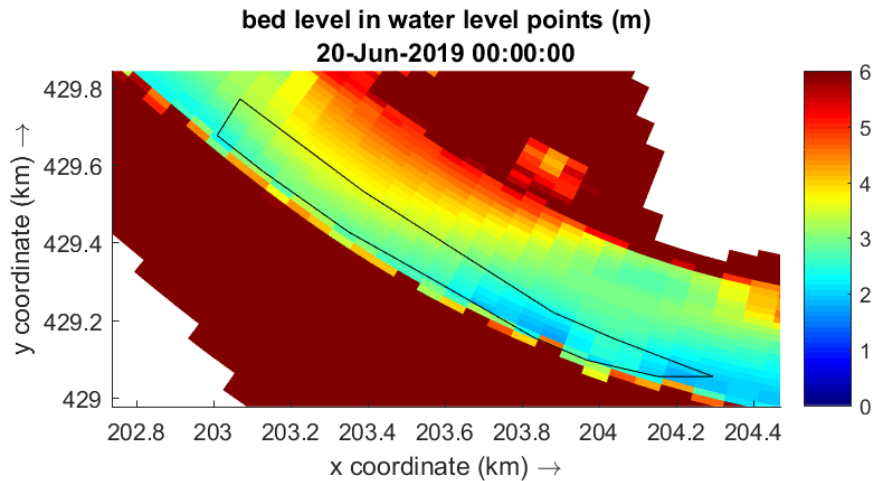


Figuur 64 Afvoerhydrograaf in Delft3D voor de hindcast, focus op periode van aanleg van de 2^e suppletie (2019). De zwarte pijl geeft het moment weer waarop de 2^e suppletie ingebracht wordt in het model.

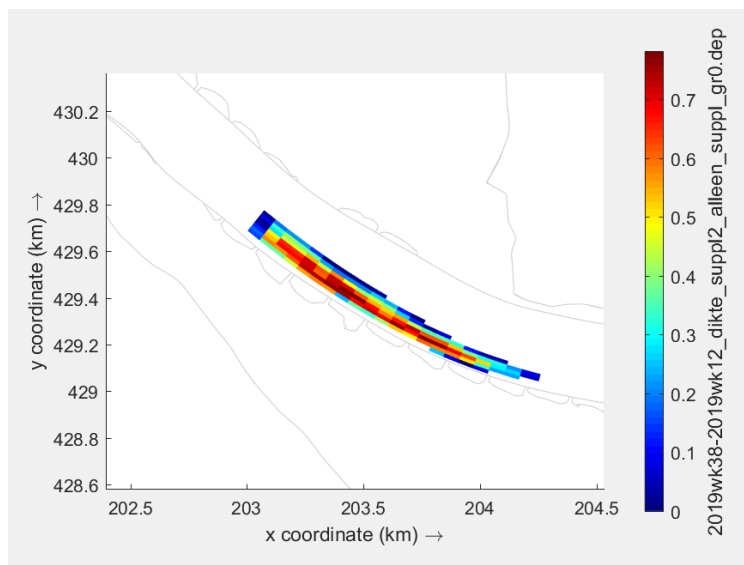
Voor de prognose zijn we wat minder flexibel in het kiezen van het moment omdat de duur van ieder afvoerblok langer is. De hydrograaf die we hanteren (= conform Niesten et al, 2017 en Becker, 2021) is weergegeven in Figuur 61. De hydrograaf wordt jaarlijks herhaald en start, net als de hindcast, op 1 april 2016. De suppletie voegen we na 3 jaar, na het hoogwater, toe aan het model. Dit moment is weergegeven met de zwarte pijl in Figuur 61. Dat is 80 dagen na 1 april = 20 juni 2019, wat vrijwel overeenkomt met de datum in de hindcast.

Bodemhoogte

De bodemligging op het moment van suppletie in het model (Figuur 65) wijkt af van de bodemligging in werkelijkheid. Een model met een dergelijk relatief grof rooster is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid waardoor de bodemligging en bodempatronen afwijken van die in het veld (hier wordt nader op ingegaan in paragraaf 7.4.2). Belangrijk verschil tussen model en werkelijkheid is vooral dat de 'bar' die in het model duidelijk aanwezig is in de binnenbocht minder aanwezig is in werkelijkheid. Daarom is er – in overleg met RWS – voor gekozen om de suppletiedikte (afgeleid uit metingen, zie Figuur 20 in paragraaf 4.4.5 en Figuur 4 in paragraaf 2.1.2; 2019wk38 minus 2019wk12) te projecteren op het Delft3D-rooster (Figuur 66) en op te tellen bij de bodemhoogte op het moment van suppleren in het model. Dit betekent dat de 2019-suppletie met deze werkwijze op dezelfde manier geïmplementeerd is als de 2016-suppletie. Dit komt overeen met een volume van ruim 53.000 m³; dat past bij het beeld van RWS; de aannemer kon met zijn eigen wekelijkse in- en uitpeilingen orde 55.000 m³ aantonen.



Figuur 65 bodemligging (kleuren in m+NAP) op moment suppleren in hindcast; voor prognose is bodem vrijwel gelijk op moment suppleren.



Figuur 66 Suppletiedikte uit metingen (2019wk38-2019wk12) geprojecteerd op de roosterzellen van het Delft3D-model.

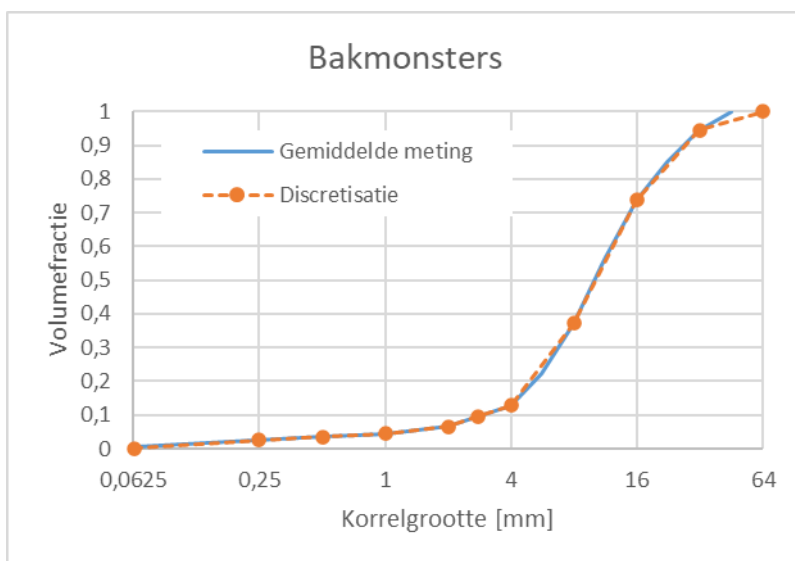
Suppletie materiaal

De korrelgrootte van het suppletie materiaal is geschematiseerd door een extra bodemlaag toe te passen met dezelfde dikte als de bodemverhoging. De korrelgrootteverdeling van het suppletie materiaal is bepaald op basis van korrelgroottemetingen die gedurende de suppletie zijn uitgevoerd (Lokin & Barneveld, 2019).

Er zit vrij veel onzekerheid in de bodemmonsters door zowel de meetlocatie (bv, dicht bij kribben) als de meetmethodiek (Paragraaf 5.2.3). De bakmonsters zijn onder iets meer gecontroleerde omstandigheden genomen. De gemiddelde zeefcurve van de bakmonsters wordt daarom als zeefcurve gebruikt. Mogelijk wordt de suppletie hierdoor in het model met fijner materiaal aangelegd dan in werkelijkheid (Paragraaf 5.2.3). De gemiddelde zeefcurve van de bakmonsters is verdeeld over de standaard sedimentklassen uit het DVR-model (Tabel 6 en Figuur 67). De volledige suppletie is in het model gebracht als extra tracersedimentklassen om deze te kunnen scheiden van de 2016-suppletie.

Tabel 6 Verdeling van de gemiddelde zeefcurve van de bakmonsters over de Delft3D-sedimentklassen.

| Nr. | ondergrens [mm] | bovengrens [mm] | Bakmonsters (Volumefractie) |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 1 | 0,063 | 0,25 | 0,03 |
| 2 | 0,25 | 0,5 | 0,01 |
| 3 | 0,5 | 1 | 0,01 |
| 4 | 1 | 2 | 0,02 |
| 5 | 2 | 2,8 | 0,03 |
| 6 | 2,8 | 4 | 0,03 |
| 7 | 4 | 8 | 0,25 |
| 8 | 8 | 16 | 0,36 |
| 9 | 16 | 32 | 0,21 |
| 10 | 32 | 64 | 0,05 |



Figuur 67 De gemiddelde zeefcurve van de bakmonsters en de discretisatie in Delft3D.

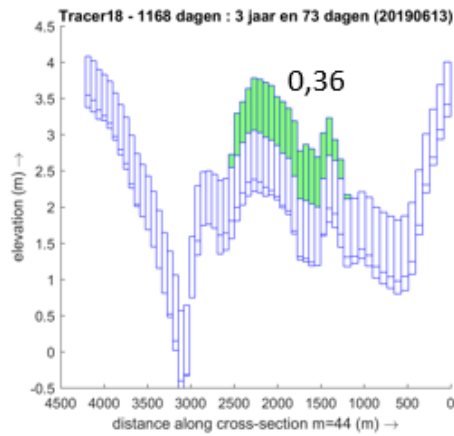
7.2.3.3 Initiële menging suppletie

Zowel de 2016- als de 2019-suppletie is als een extra bodemlaag in het model ingebracht. Deze extra bodemlaag heeft dezelfde dikte als de suppletie en is bijna overal dunner dan de actieve laag. De actievelaagdikte varieert met de waterdiepte, maar heeft een minimale dikte van 0,5 m.

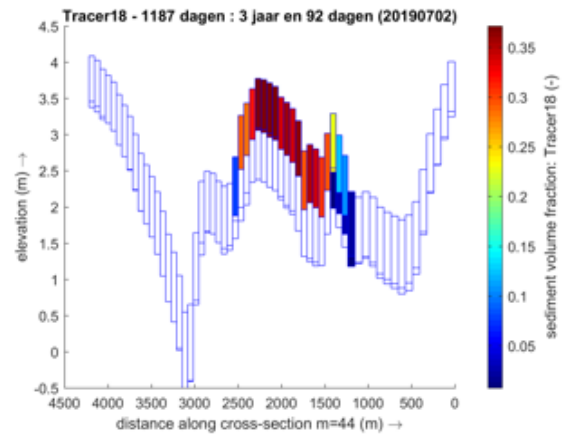
In Delft3D wordt initieel de opgelegde dikte van de suppletie overgenomen (Figuur 68A). Voor de eerste morfologische tijdstap wordt het actievelaagconcept toegepast en vindt er een numerieke menging van de suppletie met de onderlagen plaats. Dit zorgt ervoor dat na één doorgerekend afvoerniveau de volumefractie van de suppletie in de actieve toplaag van de bodem kleiner wordt (Figuur 68B). Daarnaast zorgt enige sedimentatie voor “transport” van sediment naar de onderlagen waardoor het gesuppleerde sediment lager komt te liggen dan de aanleghoogte (Figuur 68B bij 1400 m).

De vermenging in de actieve laag en de onderlagen is een karakteristiek van het gehanteerde Hirano-actievelaagmodel. De verwachting is dat, aangezien beide suppleties met min of meer gebiedseigen materiaal worden aangebracht, het effect van deze numerieke menging klein is.

A. Net na suppletie



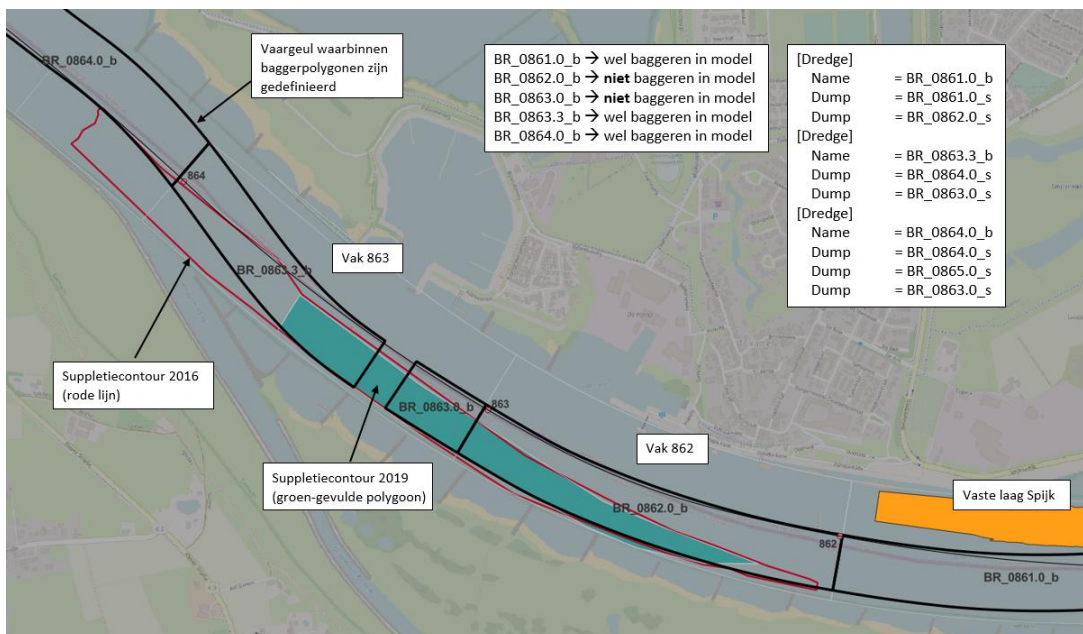
B. Suppletie eind Qstep1



Figuur 68 De initiële verdeling van de 2019-suppletie (fractie 8) over de bovenste drie bodemlagen (links) en na één afvoerstep (rechts) in de hydrograaf (hindcast). De base layer (ongeveer 60 m dik) is niet weergegeven.

7.2.4 Baggeren en storten

Niessen et al (2017) hebben geen simulaties uitgevoerd waarin rekening wordt gehouden met vaargeulonderhoud. Voor het beoordelen van de rivierfunctie scheepvaart is dat wel nodig. Becker (2021) heeft voor het project 'slim suppleren Boven-Waal', waarbij de focus lag op de Waal, wel simulaties uitgevoerd inclusief vaargeulonderhoud. De instellingen voor baggeren en storten (zoals ligging vaargeul, bagger- en stortpolygonen, en instellingen zoals het OLR-vlak, duinhoogtevoorspeller en diepte-eisen) zijn overgenomen uit Becker (2021) en gekoppeld aan de modelschematisatie van dit project. Het baggeren vindt alleen plaats in de vaargeul met een diepte-eis van 2,8 m onder OLR; terugstorten vindt plaats tussen de normaallijnen waarbij een minimale diepte van 4m onder OLR in iedere rekencel moet restereren. Baggeren- en storten vindt plaats in zowel het Duitse als het Nederlandse deel van het model, volgens gelijke criteria. De baggerpolygonen voor Nederlands grondgebied zijn (door Becker, 2021) gecorrigeerd voor niet-baggerlocatie (zie Figuur 69). De baggerpolygonen overlappen deels met de locatie van de suppleties. Uit de berekeningen met baggeren en storten blijkt echter dat binnen de suppletiepolygonen niet wordt gebaggerd.



Figuur 69 bagger- en stortpolygonen rond de suppletie van 2019.

Zowel in de berekeningen voor de referentie als voor die met suppleties wordt sediment onttrokken tussen rivierkilometer 856 en 857, omdat er onvoldoende stortruimte is binnen de gestelde eisen in het model. Er wordt in dit baggervak in jaar 1 ongeveer 110.000 m³ sediment gebaggerd, waarvan ongeveer 80.000 m³ wordt onttrokken omdat er onvoldoende stortruimte binnen de toegewezen polygonen is. Dit beïnvloedt de uitkomsten (verschilanalyse baggervolumes) niet, omdat de onttrokken volumes vrijwel gelijk zijn tussen een berekening zonder en met suppleties. Merk hierbij op dat berekeningen met vaargeulonderhoud bedoeld zijn voor het bepalen van de invloed van de suppleties op vaargeulonderhoud in een ander werkpakket (Becker et al., 2023). De analyses en figuren in navolgende paragrafen voor de hindcast en prognose van bodemontwikkeling zijn op basis van berekeningen zonder vaargeulonderhoud, wat dichterbij de realiteit blijkt te liggen (Becker et al., 2023).

7.2.5 Uitgevoerde berekeningen

Voor de hindcast (voorjaar 2016 t/m zomer 2022) zijn de volgende simulaties uitgevoerd:

- Simulatie referentie zonder suppletie, met en zonder onderhoudsbaggerwerk
- Simulatie met suppleties van 2016 en 2019 met en zonder onderhoudsbaggerwerk

Voor de prognose zijn langjarige berekeningen (20 jaar) uitgevoerd als prognose voor het toekomstig gedrag van de suppleties (inclusief vaste laag bij Spijk), met 'standaard-afvoerhydrograaf' die representatief wordt geacht voor langetermijnvoorspellingen.

- Simulatie referentie zonder suppletie, met en zonder onderhoudsbaggerwerk
- Simulatie met suppleties van 2016 en 2019, met en zonder onderhoudsbaggerwerk
- Simulatie referentie zonder vaste laag bij Spijk (alleen zonder onderhoudsbaggerwerk).

In alle bovenstaande berekeningen hanteren we een 'inspeelduur' voor de hydrodynamica ("InitialPeriod") van 360 minuten (6 uur). Er is geverifieerd dat dit (ruim) voldoende is om een stabiel stroombeeld te genereren voordat de morfologische effecten worden berekend; ook juist na de suppletie.

Aanvullend aan de Delft3D-simulaties is één WAQUA-berekening uitgevoerd (dus alleen hydrodynamica). Dit betreft een hoogwater (D8000 standaardson), en is gebruikt voor het identificeren van locaties met duidelijke stroming tussen hoofdgeul en uiterwaard (bijv. Griethauser Altrhein) om aan te geven hoe de stromingspatronen bij hoogwater de dynamiek van de suppletie beïnvloeden. De reden om hiervoor een WAQUA-simulatie te gebruiken is dat daarin een (wat) fijner rooster is toegepast. Deze modelresultaten zijn gebruikt in de analyse van de invloed van de suppleties op de bodemligging, en daar specifiek bij het benoemen van de invloed van lokale stromingscondities bij hoogwater (paragraaf 4.6.1).

7.3 Vaste laag Spijk

In 2012 is in de bovenstroomse buitenbocht tussen rkm 858 en 862 (rechter oever) een vaste laag aangelegd. Deze laag heeft een dikte van 0,7-1,0 m. De aanleg van de vaste laag heeft geleid tot erosie in de bovenstroomse binnenbocht tussen rkm 858 en 862 (linker oever). De metingen laten zien dat dit materiaal als sedimentatiegolf de suppletielocatie bereikt (paragraaf 4.4.2 en Sieben, 2017). Dit beïnvloedt de bodemontwikkeling in het gebied van de suppletie. Er is een extra berekening uitgevoerd om de invloed van de vaste laag bij Spijk op de bodemligging bij de suppletie te bepalen. In deze berekening is er geen suppletie toegepast.

De initiële bodemligging van het model is een ingespeelde bodemligging over een periode van vijf jaar (Niessen et al 2017). Bovendien is de initiële bodemligging van deze inspeelberekening gebaseerd op een bodemhoogtepeiling van november 2015. De initiële bodemligging in het model bevat dus al acht jaar morfologische ontwikkeling als gevolg van de aanleg van de vaste laag bij Spijk. Deze inspeelberekening is daarnaast gedaan met de hydrograaf van de prognose waarin elk jaar een (kort) hoogwater optreedt. Deze hydrograaf is niet representatief voor de opgetreden afvoer tussen 2012 en 2015, die relatief laag was. De initiële bodem zal daardoor grotendeels het “evenwichts”effect van de vaste laag bevatten. Het inverse effect van de aanleg van de vaste laag wordt bepaald door de vaste laag in het model te verwijderen. Het verschil tussen de berekeningen met en zonder vaste laag geeft een indicatie van het evenwichtseffect. Dit zal echter niet worden bereikt door de grootschalige erosie die in het br2 domein optreedt als gevolg van de erosie in het Pannerdensch Kanaal en de bovenstrooms opgelegde erosie in het br0 domein (Paragraaf 7.4.2; Figuur 73).

De vaste laag is in het model geschematiseerd door de bodemlagen een dikte van nul te geven. Er is hierdoor geen sediment aanwezig dat kan worden geërodeerd. Op basis van de polygoon in de Waterdieptekaart (Jans, 2018) zijn de dikte en de volumefracties van de base layer aangepast naar de gemiddelde waarde over de breedte van de gridcellen buiten de polygoon. Het effect van het weghalen van de vaste laag is bepaald op basis van een (prognose)berekening uitgevoerd voor een periode van 20 jaar.

De modelresultaten na 20 jaar (Figuur 70) laten zien dat als de vaste laag bij Spijk wordt verwijderd:

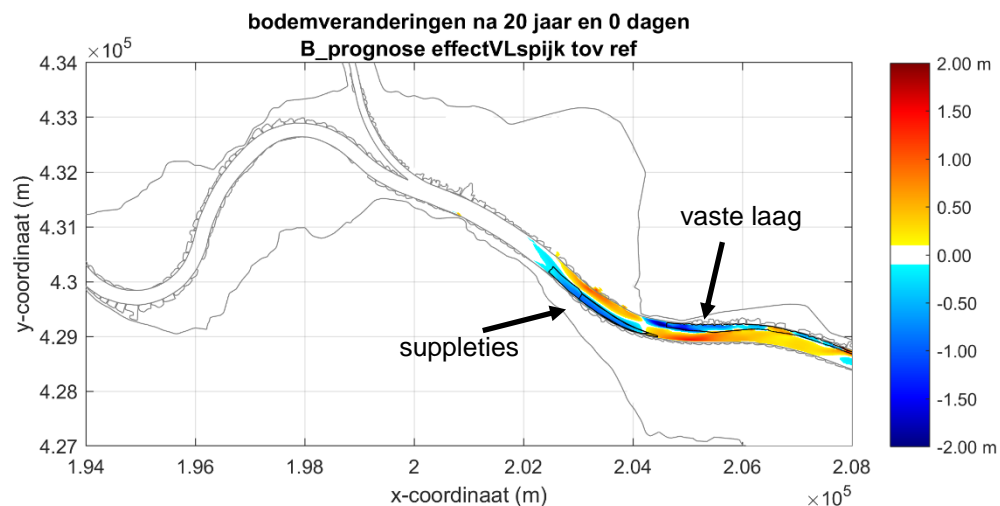
- Ter hoogte van de vaste laag:
 - Op de locatie van de verwijderde vaste laag (aan de rechter kant) treedt 0,8-1,8 m erosie op (-300.000 m³).
 - Aan de linker kant treedt 0,3-1,3 m aanzanding op (+300.000 m³).
- Benedenstrooms van de vaste laag aan de rechter kant van de rivier treedt sedimentatie op (0,6-1,0 m; 200.000 m³).
- Ter hoogte van de suppletielocatie treedt tot 1 m erosie op (-300.000 m³).

Deze bodemveranderingen treden op als gevolg van het weghalen van de vaste laag. Bij de aanleg van de vaste laag verwachten we dat het omgekeerde gedrag is opgetreden.

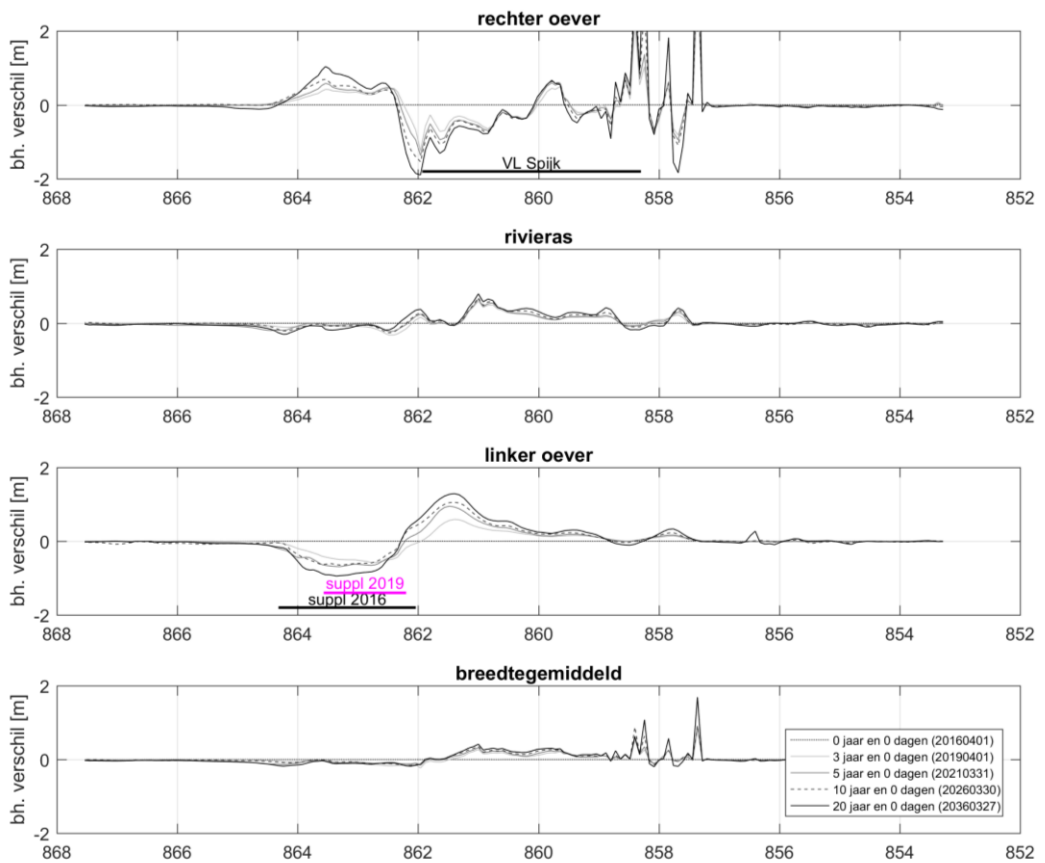
De lengteprofielen laten hetzelfde gedrag zien (Figuur 71). In het model is na 3-5 jaar de nieuwe bodemligging grotendeels bereikt. De bodemveranderingen die na de eerste 5 jaar optreden zijn kleiner en langzamer. Dit betekent dat in het model met een ingespeelde bodemligging de gevolgen van de aanleg van de vaste laag relatief klein zullen zijn bij de aanleg van de suppletie in 2016. De morfologische ontwikkeling als gevolg van de aanleg van de vaste laag heeft dus nauwelijks nog effect op de ontwikkeling van de suppletie. Het is onduidelijk in hoeverre de bodemveranderingen na 10 tot 20 jaar beïnvloed zijn door de grootschalige bodemerosie die in het model optreedt (Paragraaf 7.4.2).

Metingen laten zien dat vlak na de aanleg van de vaste laag de binnenbocht van de vaste laag tot 50 cm is geërodeerd (Paragraaf 4.4.2) en dit wordt niet veel meer in de eerste vier jaar na aanleg (Sieben, 2017). De modelberekeningen laten echter zien dat na 5 jaar tot 1 m erosie is opgetreden links van de rivieras (Figuur 71). Dit verschil wordt grotendeels bepaald door de morfologische tijdschaal tussen 2012 en 2016 die grotendeels wordt bepaald door de hydrograaf. In de berekening met vaste laag is te zien dat net benedenstrooms van de vaste laag erosie ontstaat bij hoge afvoeren. Het model laat geen/nauwelijks migratie van deze erosie zien na de hoge afvoer en deze dynamiek heeft hierdoor in het model nauwelijks tot geen invloed op de suppletielocatie.

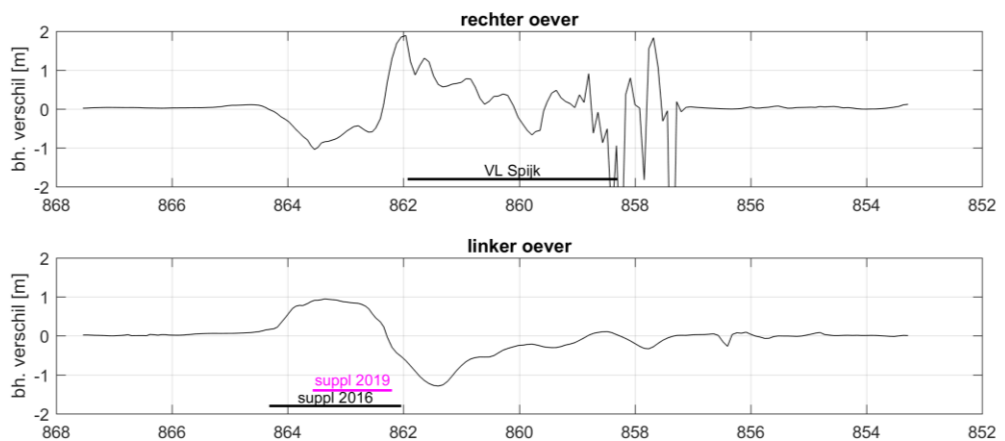
Figuur 72 laat het verwachte evenwichtseffect zien van de aanleg van de vaste laag bij Spijk. De aanzanding op de rechter oever ter hoogte van de vaste laag is de aanleg van de vaste laag zelf. Bij de suppletielocatie verwachten we tot 1 m aanzanding als gevolg van de aanleg van de vaste laag. De metingen laten echter zien dat dit evenwicht bij de aanleg van de suppletie nog niet is bereikt (Sieben, 2017). De aanleg van de suppletie draagt daardoor bij aan de sedimentatie die als gevolg van de vaste laag bij Spijk ook zonder suppletie zou zijn opgetreden. Hierdoor is in het model de suppletie een verstoring van de “evenwichts”bodemligging terwijl in werkelijkheid de suppletie mogelijk bijdraagt aan het bereiken van een nieuw “evenwicht”. De verwachting is dat dit voornamelijk leidt tot verschillen in de snelheid van de bodemontwikkeling tussen het model en de meting.



Figuur 70 De bodemverandering (kleurschaal in m) na 20 jaar als gevolg van het verwijderen van de vaste laag bij Spijk.



Figuur 71 Lengteprofielen van de bodemveranderingen links, midden, rechts en gemiddeld over het dwarsprofiel als gevolg van het weghalen van de vaste laag bij Spijk (prognose-berekening). Linker en rechter oever zijn ongeveer 120 m uit de as.



Figuur 72 Het verwachte evenwichtseffect als gevolg van de aanleg van de vaste laag bij Spijk.

7.4 Modelprestatie op basis van hindcast

7.4.1 Reeds in eerdere studies uitgevoerde validaties

Het berekende waterstandsverhang is door Niesten et al. (2017) beoordeeld aan de hand van een vergelijking van gemeten en berekende verhanglijnen. Het waterstandsverhang op het Pannerdensch Kanaal wordt door het model duidelijk te groot berekend, waardoor de absolute waterstanden op de Boven-Rijn ook te groot worden (orde 30 cm bij lage tot gemiddelde afvoeren). Het waterstandsverhang op de Boven-Rijn wordt echter goed voorspeld. Het model kan daarom gebruikt worden om de invloed van de suppletie op het verhang tussen meetstations Lobith en Pannerdensch Kanaal en daarmee de invloed op de waterstanden te schatten.

De berekende stroomsnelheden op de Boven-Rijn zijn al door Niesten et al. (2017) vergeleken met ADCP-metingen en vertoonden in de hoofdgeul van de Boven-Rijn goede overeenkomst. Het model wordt daarom geschikt bevonden voor een beoordeling van de bodemschuifspanningen in het kader van de analyse naar de invloed van de suppleties op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen. De details van die analyse worden beschreven in Becker et al. (2023).

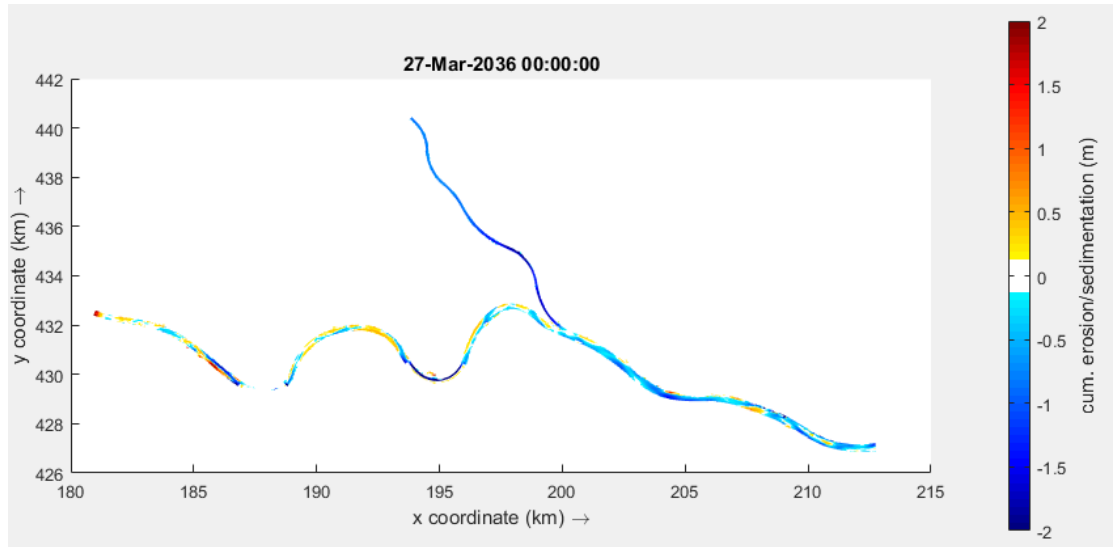
7.4.2 Bekende tekortkomingen in toegepast Delft3D-model

Voor de eindevaluatie Pilot Langsdammen (Paarlberg et al, 2021) is een DVR-Delft3D-4 model van een deel van de Waal toegepast. Paarlberg et al (2021) beschrijft enkele bekende “tekortkoming” in dergelijke modelschematisaties met een relatief grof rooster, waar rekening mee moet worden gehouden bij de interpretatie en het gebruik van modelresultaten. Dat gaat vooral om kleinschalige bodempatronen (bodenvormen) die in werkelijkheid wel optreden, maar in het model niet worden opgelost, of complexe processen die vereenvoudigd opgenomen zijn in het model, zoals transport over vaste lagen. Daarnaast beïnvloeden de schematisatie van de riviergeometrie (bv grove cellen in de uiterwaard, kribben), het afvoerloop en van het sedimenttransport en bodemlagenconcept die mogelijk in te weinig detail worden meegenomen om lokale bodemhoogtevariëaties volledig te beschrijven (e.g. erosiekuilen, bodemvariëaties/erosie bij kribben, dynamiek hoogwater/ geulen uiterwaarden, ofwel interactie zomerbed en uiterwaarden). Verder valt te denken aan effecten van scheepvaart (opwerveling van sediment) en het mogelijk ontstaan van diepe erosiekuilen omdat er een pleisterlaag doorbreekt, waar geen rekening mee wordt gehouden.

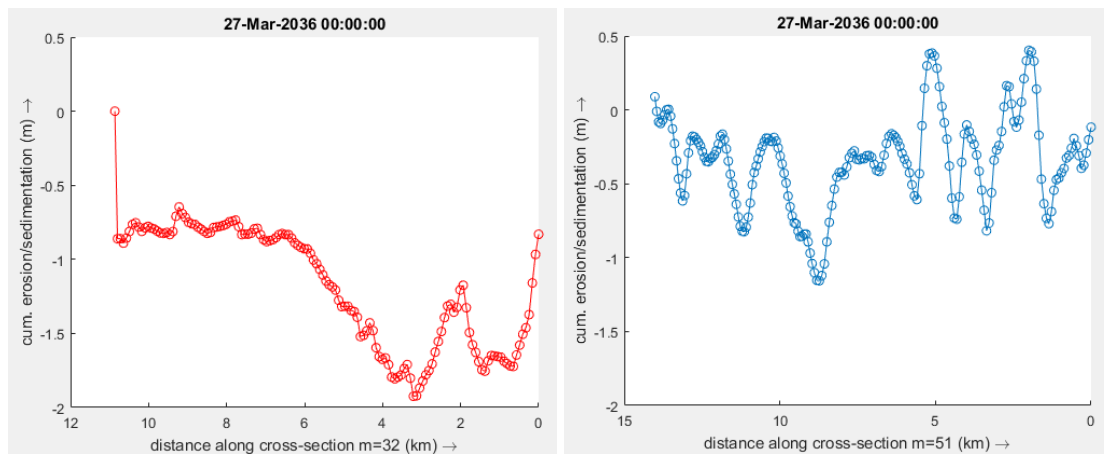
Verder gelden de volgende aannames in het model, die afwijkingen geven tussen model en werkelijkheid:

- In het model wordt als initiële startbodem een morfologisch ingespeelde bodemligging gebruikt, om een sterke initiële reactie van het model te voorkomen. In de metingen zijn bodemvariëaties die initieel zijn opgewekt door de aanleg van de vaste laag nog wel aanwezig in de vorm van bodemgolven (paragrafen 4.4.2 en 4.4.3).
- De initiële bodemligging en samenstelling zijn door Niesten et al (2017) bepaald middels een berekening waarin de vaste laag Spijk reeds aanwezig is en inclusief bodemerosie met als startpunt een bodemligging uit 2015.
- Bodemerosie; 2 cm/jaar bovenrand (terwijl Boven-Rijn inmiddels stabiel is, zie De Jong en Ottevanger, 2020)
- Erosie opgewekt in Pan. Kanaal (zie onder)
- Sediment dat wordt verwijderd uit het model bij toepassing van de bagger-stortmodule doordat er onvoldoende stortruimte aanwezig is (zie paragraaf 7.2.4). De morfologische inspeelberekening is zonder bagger-stortmodule uitgevoerd en de resultaten van deze berekening worden alleen gebruikt om de bagger- stortvolumes in te schatten.

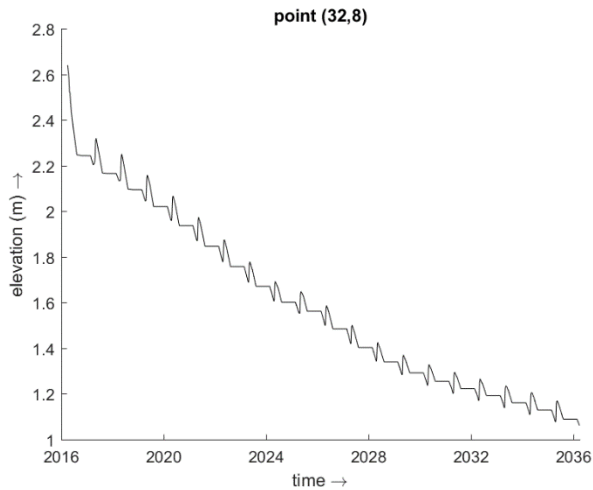
De bodem in het Pannerdensch Kanaal erodeert sterk, waarschijnlijk vanwege het te steile verhang (Paragraaf 7.4.1) dat al door Niesten et al. (2017) geconstateerd is. Figuur 73 en Figuur 74 tonen de totale cumulatieve erosie en sedimentatie over een periode van 20 jaar. Deze erosie en sedimentatie bouwt zich geleidelijk op (Figuur 75). Vanuit metingen is de prognose dat het Pannerdensch Kanaal met 1 cm/jaar erodeert (Sloff, 2019) wat een orde grootte kleiner is dan wat het model voorspelt (tot ca. 10 cm/jaar).



Figuur 73 Cumulatieve erosie en sedimentatie in referentiemodel over een periode van 20 jaar.

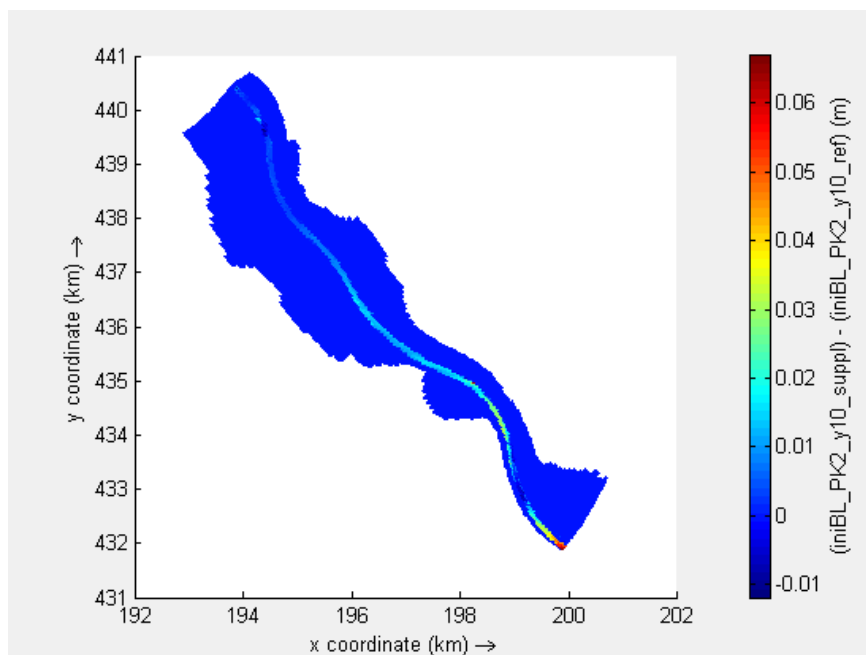


Figuur 74 Cumulatieve erosie en sedimentatie in as rivier vanaf de Pannerdensch Kop voor het Pannerdensch Kanaal (links) en voor de Waal (rechts) over een periode van 20 jaar.



Figuur 75 De ontwikkeling in tijd van de bodemhoogte bovenstrooms in het Pannerdensch Kanaal.

Figuur 76 geeft het verschil in bodemligging na 10 jaar tussen een simulatie met en zonder suppleties. In beide berekeningen treedt de bodemerrosie in gelijke mate op; bij de Pannerdensch Kop is het bodemhoogteverschil enkele centimeters en verder benedenstrooms nog kleiner. Aangezien we in analyses naar relatieve effecten kijken levert deze sterke bodemerrosie waarschijnlijk geen problemen voor de toepasbaarheid van het model op.

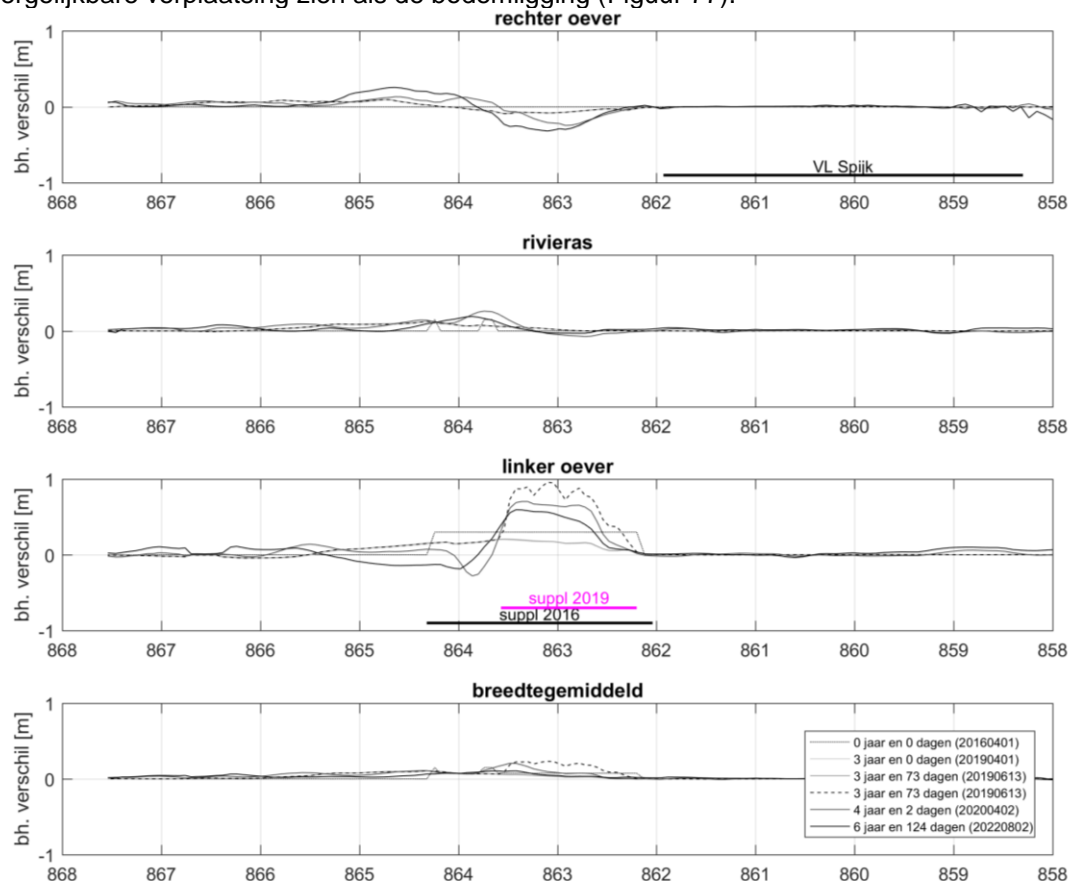


Figuur 76 Het verschil in bodemligging na 10 jaar op het Pannerdensch Kanaal; berekening met suppleties vergeleken met berekening zonder suppleties.

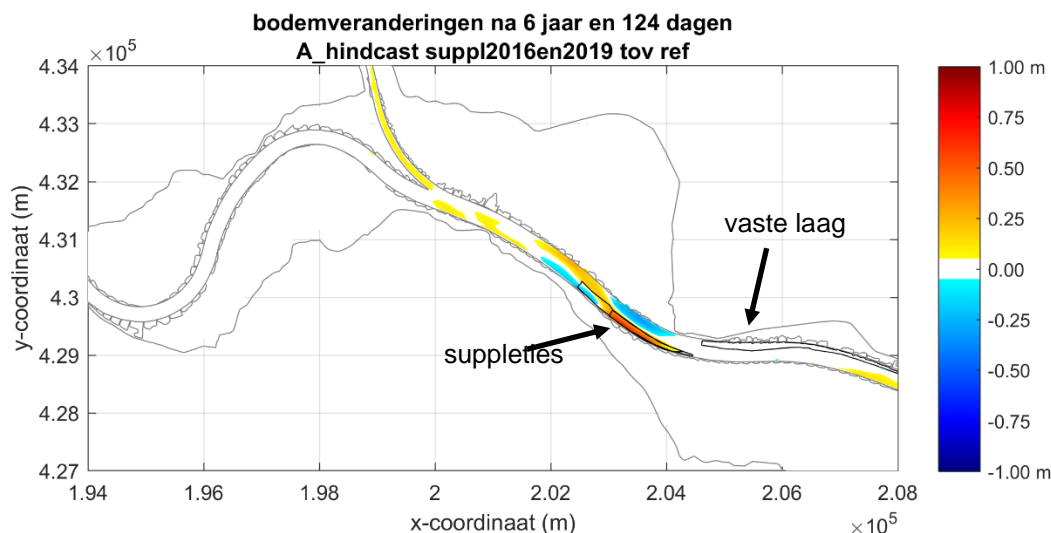
7.4.3 Tijdsontwikkeling effect suppletie in model

Deze paragraaf geeft een overzicht van de bodem- en korrelgrootteveranderingen in de simulaties met suppletie ten opzichte van de referentie. De 2016-suppletie is minder dik dan de 2019-suppletie en zorgt hierdoor voor andere bodemveranderingen (Figuur 77). De 2016-suppletie verplaatst zich en dempt uit, maar zorgt nauwelijks voor sedimentatie en erosie in het gebied benedenstrooms van de suppletie. De 2019-suppletie (relatief fijn sediment ten opzichte van het sediment dat na suppletie op de bodem is gemeten, zie paragraaf 7.2.3.2) zorgt voor erosie net benedenstrooms van de suppletie. Op de rechter oever is te zien dat de 2019-suppletie ten opzichte van de 2016-suppletie meer erosie veroorzaakt in de binnenbocht ter hoogte van de suppletie en meer sedimentatie benedenstrooms daarvan. Dit patroon is ook zichtbaar aan het einde van de hindcast berekening (Figuur 78).

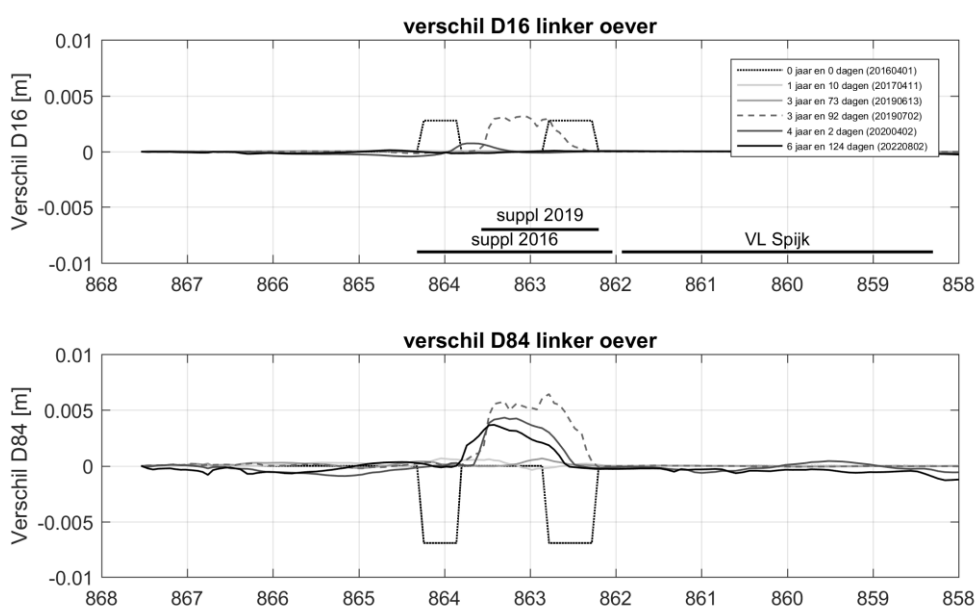
Door het bimodale karakter van de bodemsamenstelling is de D50 niet representatief voor de verandering in bodemsamenstelling (Paragraaf 5.2.2). We laten daarom de tijdsontwikkeling van de D16 en D84 zien (Figuur 79). Dit zijn de korrelgroottes die horen bij 16% en 84% op de zeefcurve. Voor de 2016-suppletie is alleen het graniet zichtbaar omdat het grind in het model dezelfde korrelgrootte heeft als wat aanwezig is op de bodem (Paragraaf 7.2.3.1). De 2016-suppletie is binnen een jaar niet meer herkenbaar in de korrelgrootteverandering. De 2019-suppletie is uitgevoerd met grover materiaal. De fijne fractie van het gesuppleerde materiaal (D16) verplaatst snel. De grove fractie (D84) verplaatst langzamer en laat een vergelijkbare verplaatsing zien als de bodemligging (Figuur 77).



Figuur 77 De ontwikkelingen van de suppleties (hindcast) ten opzichte van de referentieberekening. Linker en rechter oever zijn ongeveer 120 m uit de as. In de hindcast-berekening wordt na 3 jaar en 73 dagen de 2019-suppletie instantaan aangebracht. Het verschil tussen de blauwe en de roze lijn geeft daarmee de suppletiedikte weer. De rode lijn zit vrijwel geheel 'achter' de blauwe lijn omdat er in die periode nauwelijks bodemveranderingen ten opzichte van de referentie zijn. De 'driehoekjes' op de rivieras in de grijze lijn zitten op locaties waar de 2016-suppletie ook ter plaatse van de rivieras is.

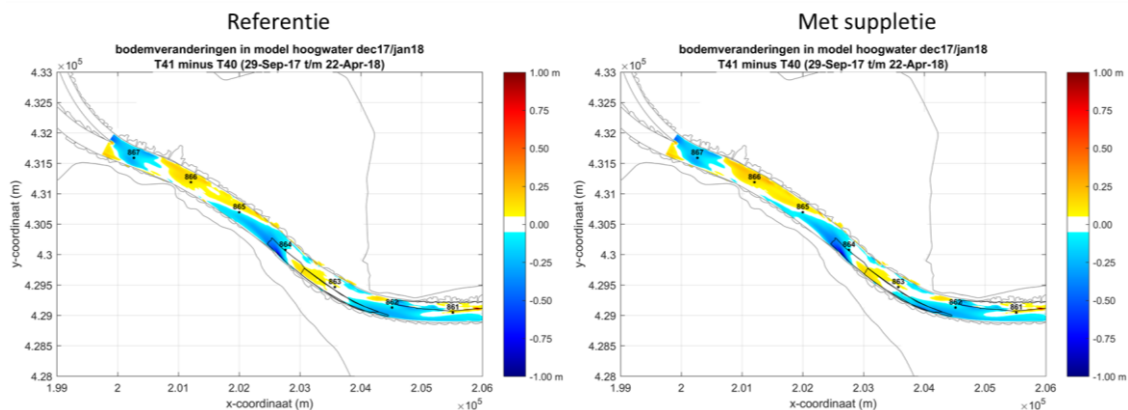


Figuur 78 De bodemverandering aan het einde van de hindcast ten opzichte van de referentie.

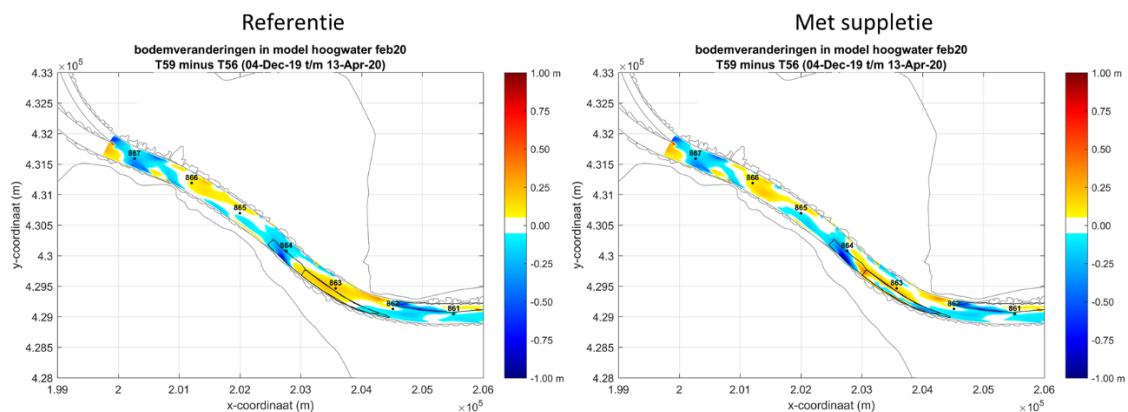


Figuur 79 Verschil in korrelgrootte in de actieve laag tussen de berekeningen met en zonder suppleties aan de linker zijde van de rivier voor de zandfractie (D16, boven) en grindfractie (D84, onder). De gestippelde lijn geeft het initiële effect (aanleg 2016-suppletie), de gestreepte lijn geeft het verschil net na de 2019-suppletie.

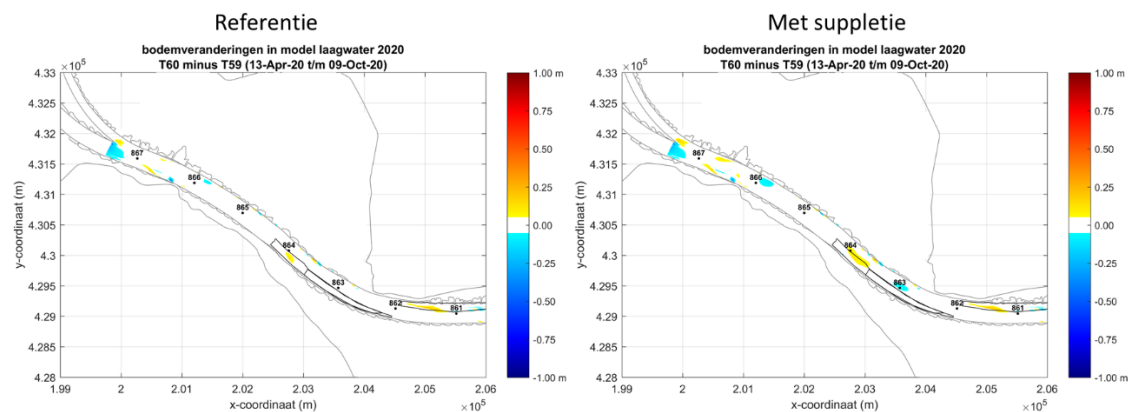
Variaties in afvoer hebben grote effecten op de bodemveranderingen in het gebied. Bij rkm 864 ontstaat in de berekeningen bij elk hoogwater een kuil als gevolg van de uitstroom uit de linker uiterwaard (paragraaf 4.4). Tijdens het hoogwater van 2018 is deze kuil dieper als gevolg van de suppletie (Figuur 80). De suppletie van 2019 ligt iets verder naar bovenstrooms en zorgt er daardoor voor dat de benedenstroomse erosie verder naar bovenstrooms verplaatst (Figuur 81). Tijdens laagwaterperiodes zijn er nauwelijks tot geen bodemveranderingen over relatief lange periodes (Figuur 82). De resultaten laten zien dat de suppleties relatief kleine effecten hebben op de bodemveranderingen ten opzichte van de bodemontwikkeling in de referentieberekening.



Figur 80 Bodemhoogteverandering hoogwater 2018 zonder en met suppletie.



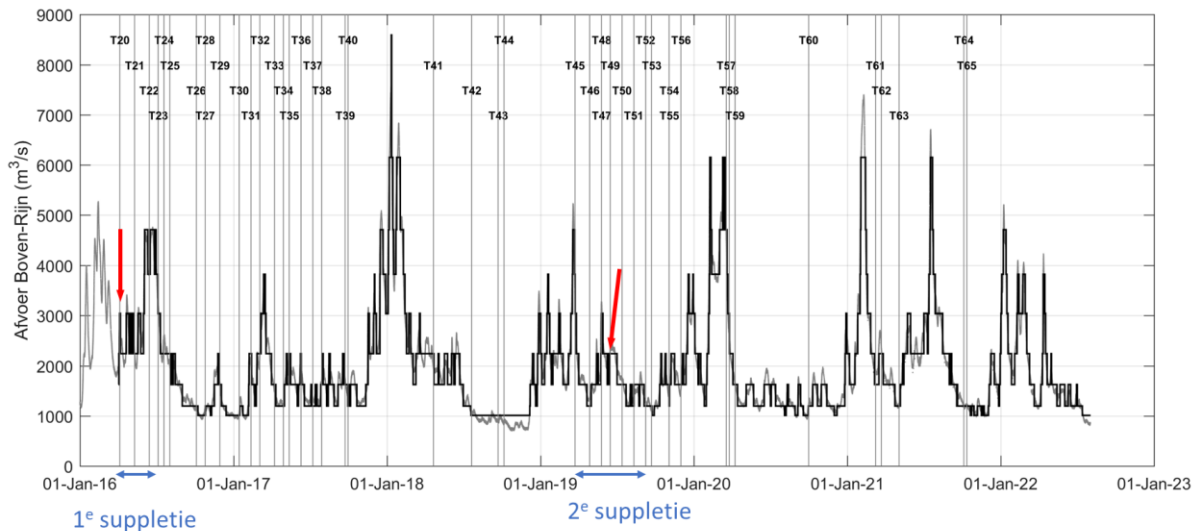
Figur 81 Bodemhoogteverandering hoogwater 2020 zonder en met suppletie.



Figur 82 Bodemhoogteverandering laagwater 2020 zonder en met suppletie.

7.4.4 Vergelijking met bodempeilingen

Voor en na de aanleg van de suppletie zijn er regelmatig multibeampeilingen uitgevoerd door of in opdracht van Rijkswaterstaat (paragraaf 2.2.1). De bodempeilingen zijn door RWS geprojecteerd op een regelmatig 20x20 m rooster uitgelijnd met de rivieras, door per 20x20m-vak de gemiddelde bodemligging te bepalen (paragraaf 4.2). In de vergelijking tussen modelresultaten met peilingen gebruiken we uit deze metingen de gemiddelde bodemliggingen in de rivieras en 120 m uit de rivieras in beide richtingen. Daarnaast gebruiken we de breedtegemiddelde bodemligging over deze totale breedte van 240 m. De bodempeilingen geven een goed beeld van de bodemveranderingen bij verschillende afvoerniveaus (Figuur 83).



Figuur 83 De afvoer bij Lobith en de daar bij horende afvoerd discretisatie met daarbij de meetmomenten van bodempeilingen. De twee rode pijlen geven het moment van suppletie in het Delft3D-model weer.

In deze paragraaf voeren we op twee manieren een vergelijking uit:

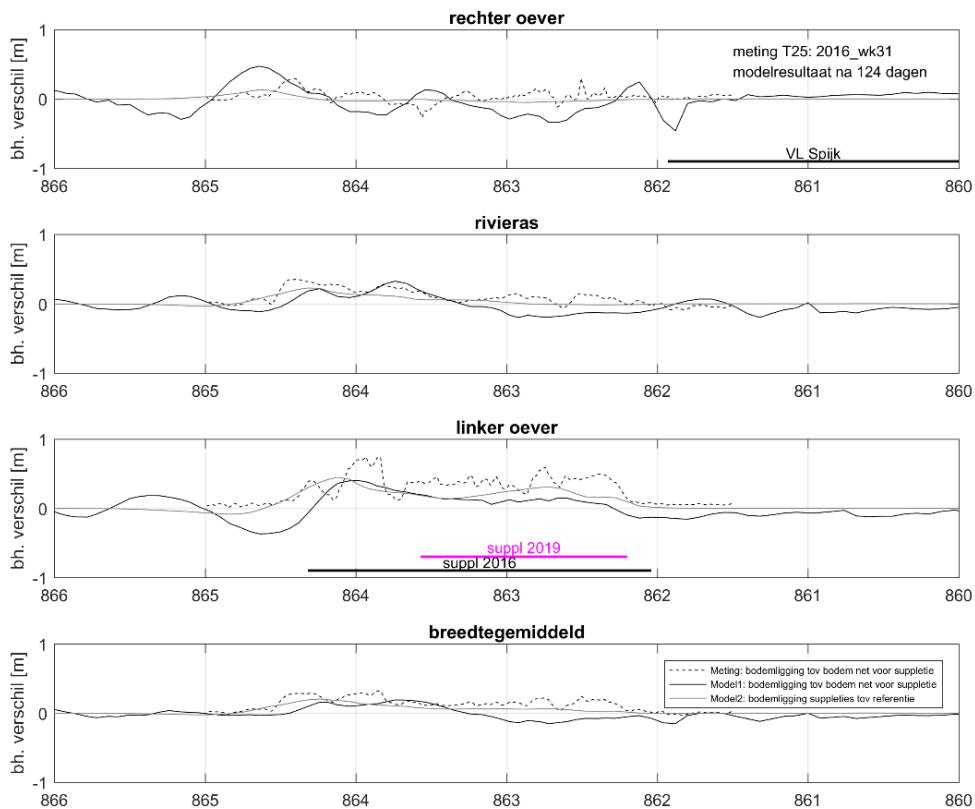
- 1 In langsdoorsneden
- 2 In 4 karakteristieke vakken rond de suppletie

Vergelijking in langsdoorsneden

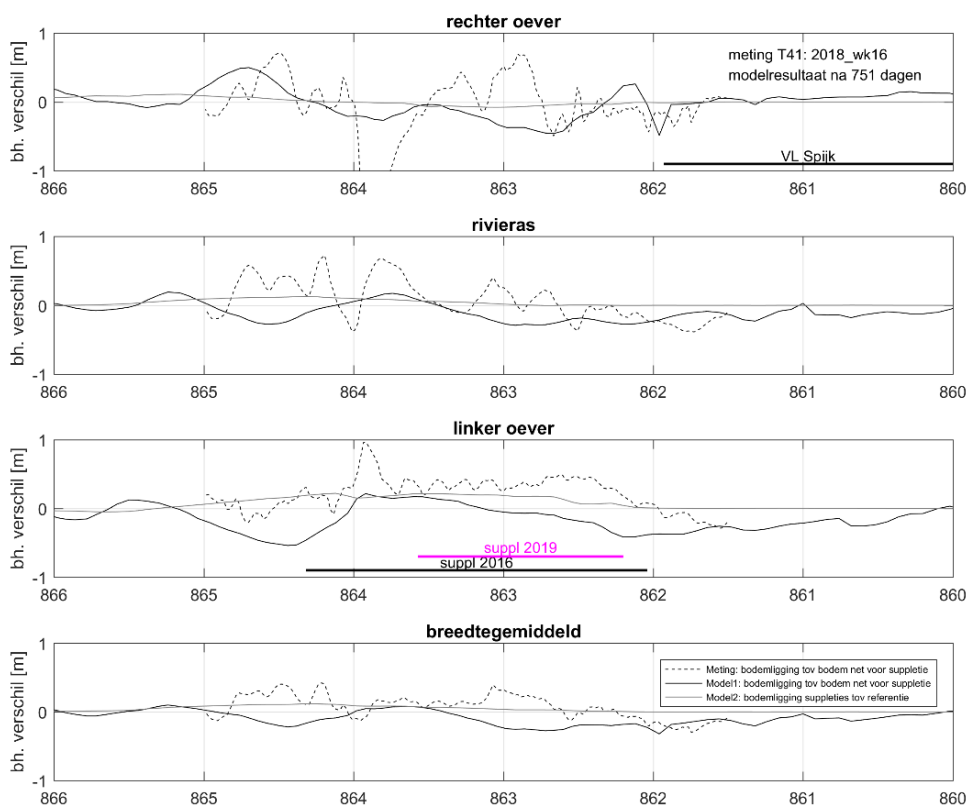
Deze vergelijkingen voeren we uit op een aantal karakteristieke momenten: de bodemverandering na aanleg van de 2016-suppletie, na het hoogwater van 2018, na aanleg van de 2019-suppletie, na het hoogwater van 2020 en bij de laatst beschikbare meting. Figuren voor alle meetmomenten zijn digitaal opgeleverd. De bodemveranderingen zijn zowel voor de metingen als voor de modelresultaten bepaald ten opzichte van de (ingespeelde) bodemligging vóór suppletie ($t=0$). Aangezien de resultaten van het referentiemodel afwijken van de metingen (paragraaf 7.4.2) is daarnaast de bodemverandering ten opzichte van de referentie bepaald om het effect van de suppletie weer te geven ('Model2' in de figuren).

- Na aanleg van de 2016-suppletie (Figuur 84)
 - De suppletie 2016 is in de meting net volledig aangelegd, maar in het model al 124 dagen aanwezig. Het model laat migratie zien van de suppletie.
 - De bodemhoogteverandering die volgt uit het model is veel gladder dan de metingen. Deels komt dit door de hogere resolutie van de metingen (20x20 m) en deels door het ontbreken van bepaalde processen in het model (paragraaf 7.4.2).
 - Het model laat grootschalige en breedtegemiddelde erosie zien vanaf halverwege de suppletie naar bovenstrooms. In de metingen is dit niet zichtbaar.

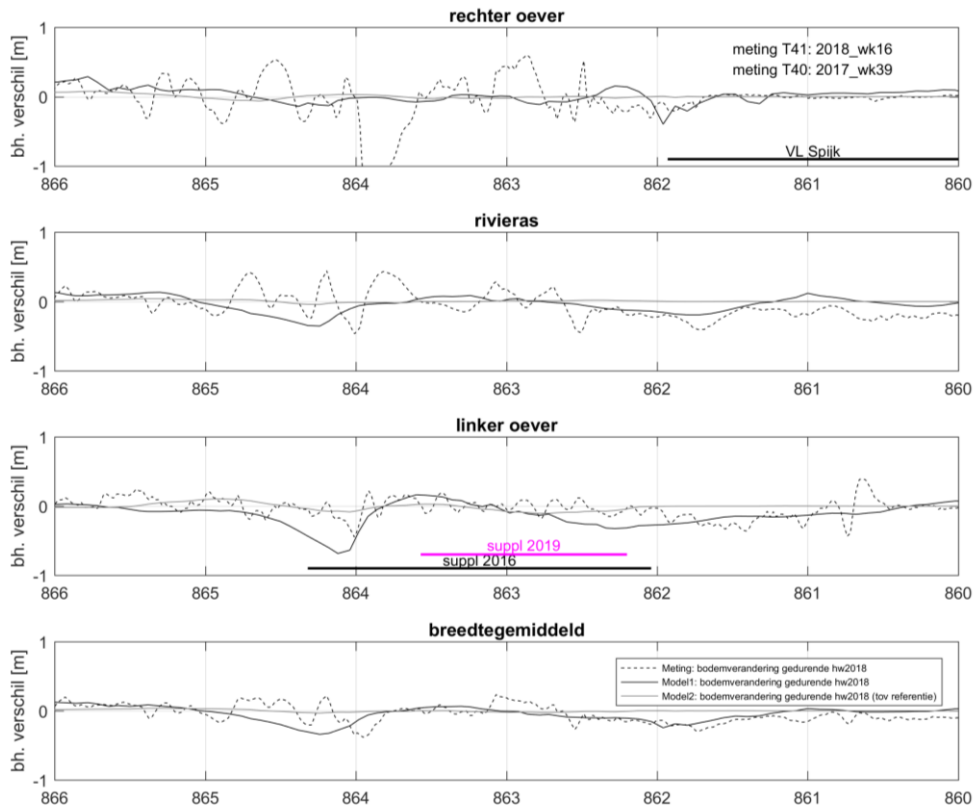
- In het model ontstaat (suppleties en referentie) bij rkm 864,5 een bult op de rechter oever en erosie op de linker oever (Model1). Dit is niet zichtbaar in de meting en is geen effect van de suppletie.
- Hoogwater van 2018 (Figuur 85 ten opzichte van de bodemligging voor de 2016-suppletie; Figuur 86 ten opzichte van de bodemligging voor hoogwater):
 - De grootschalige bodemerosie in het model (zie paragraaf 7.4.2) is doorgezet.
 - Op de rechter oever is in de meting een grote bult aanwezig rond km 863 en een diepe kuil bij rkm 864. Deze erosiekuil ontstaat door het aansnijden van een sterk erodeerbare laag (paragraaf 4.4.4). Dit proces wordt niet meegenomen in het model.
 - Het model laat op de rechter oever erosie zien ter hoogte van de suppletie en sedimentatie benedenstrooms van de suppletie.
 - Op de linker oever verplaatst de suppletie naar benedenstrooms. De erosie benedenstrooms van 864 ontstaat (in het model) door de uitstroom van water uit de uiterwaard. In de metingen is de erosie ook te zien. De verplaatsing van de suppletiefront is in de metingen minder duidelijk, er is ter plekke van de diepe kuil de hele dikte van de suppletie geërodeerd, dit materiaal beweegt naar benedenstrooms in de vorm van golven (paragraaf 4.4.4).
 - De grootschalige bodemveranderingen door het hoogwater worden door het model redelijk goed bepaald, maar de kleinschalige dynamiek (sedimentgolven, zie paragraaf 4.4.4) kan het model niet berekenen (zie ook paragraaf 7.4.2).
- Na aanleg van de 2019-suppletie (Figuur 87)
 - Bij de rechter oever is aanzanding zichtbaar bij km 864,5 zowel in de meting als in het model. Dit is het 2D-patroon (vergelijkbaar met alternerende banken) dat ontwikkelt als gevolg van de suppletie (paragraaf 4.4.4).
 - De linker oever laat zien dat de suppletie in het model al voor een deel is gemigreerd.
- Hoogwater van 2020 (Figuur 88 ten opzichte van de bodemligging voor de 2016-suppletie; Figuur 89 ten opzichte van de bodemligging voor hoogwater):
 - Op de rechter oever is de bodem in het model in de binnenbocht ter hoogte van de suppletie verder geërodeerd.
 - De metingen laten zien dat er aanzanding op de linker oever bij de suppletie is opgetreden. Een deel hiervan is ontstaan gedurende het hoogwater.
 - Het modelresultaat laat zien dat de hoogte van de suppletie is afgenomen, in de metingen is dit niet te zien. Daarnaast lijkt de suppletie in het model zich sneller te verplaatsen dan in de metingen. De bovenstroomse zijde van de suppletie is tussen T50 en T57 (37 weken) in het model met ongeveer 200 m verplaatst terwijl in de meting de verplaatsing nihil is. In het model is relatief fijn suppletiemateriaal (bakmonsters) ten opzichte van de bodemmonsters na suppletie gebruikt; dat leidt mogelijk tot een grotere verplaatsing in het model.
 - De benedenstroomse rand van de 2019-suppletie ligt verder bovenstrooms dan die van de 2016-suppletie. Het modelresultaat laat duidelijk erosie zien net benedenstrooms van de 2019-suppletie. Bij de 2016-suppletie viel deze samen met de erosiekuil van de Griethauser Althrein. De metingen laten hier geen/nauwelijks erosie zien. Het lijkt er op dat het model de erosie overschat.
- Laatst beschikbare meting (Figuur 90)
 - De verplaatsing van de suppletie in de meting is heel beperkt terwijl deze in het model verder naar benedenstrooms migreert.



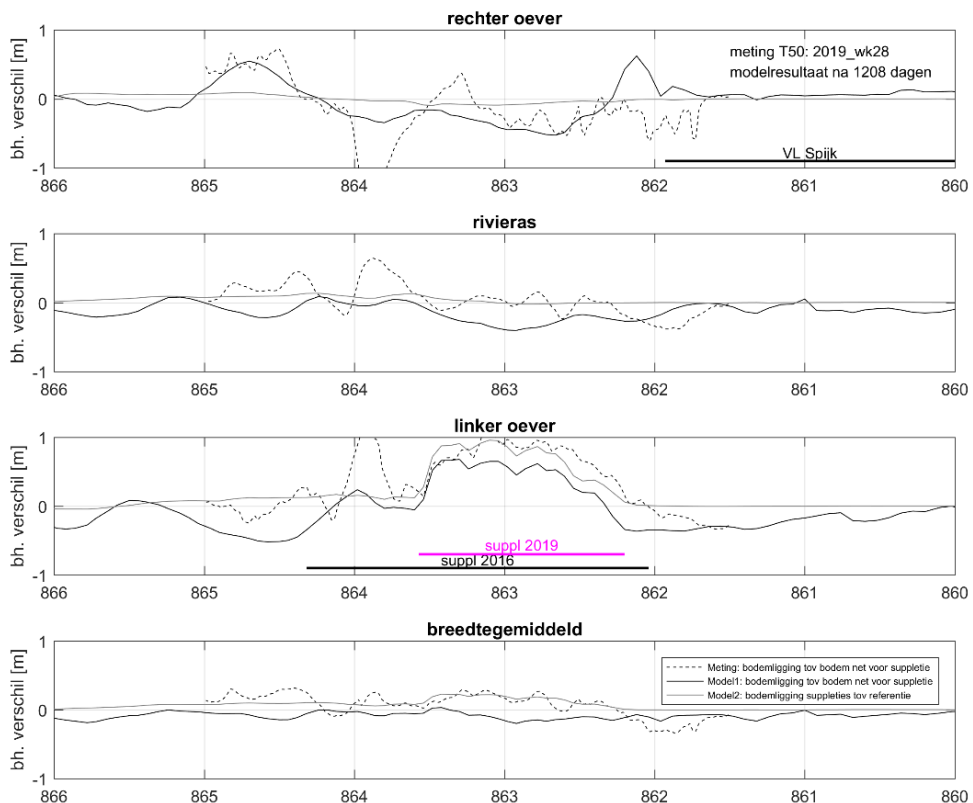
Figuur 84 Langsdoorsnedes van de bodemverandering na aanleg van de 2016-suppletie. (bodemligging ten opzichte van bodemligging voor 2016-suppletie).



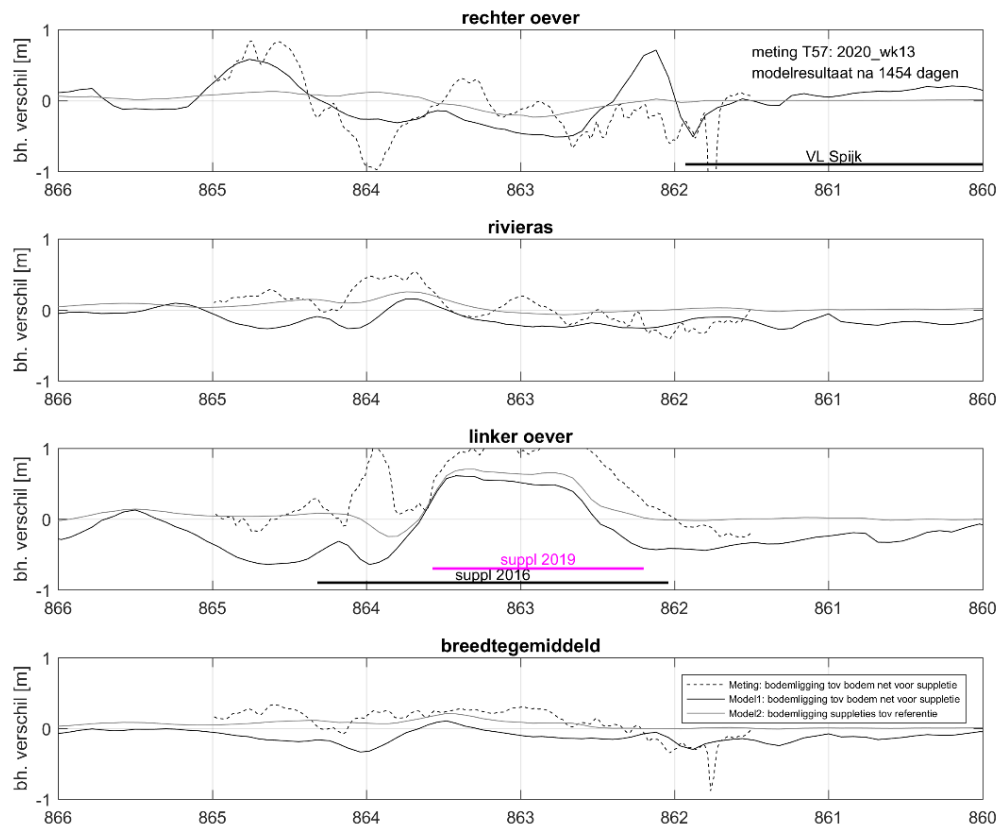
Figuur 85 Langsdoorsnedes van de bodemverandering na het hoogwater van 2018. (bodemligging ten opzichte van bodemligging voor 2016-suppletie).



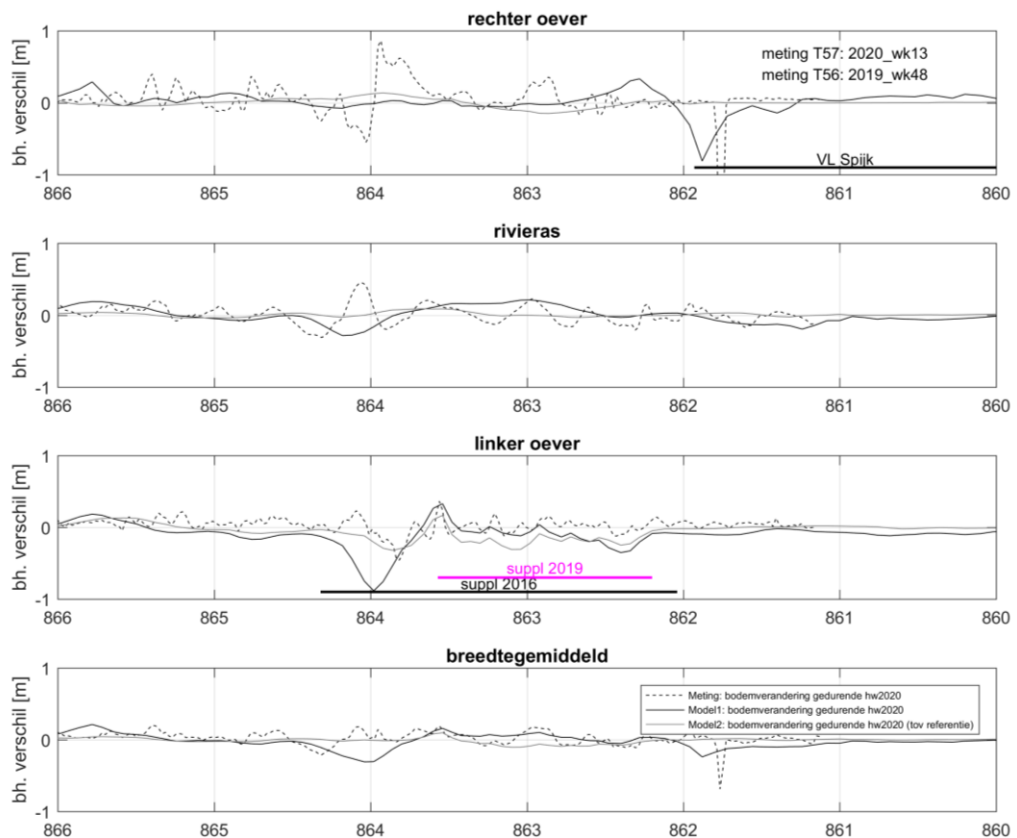
Figuur 86 Langdoorsnedes van de bodemverandering tijdens het hoogwater 2018. (bodempligging na hoogwater ten opzichte van voor hoogwater).



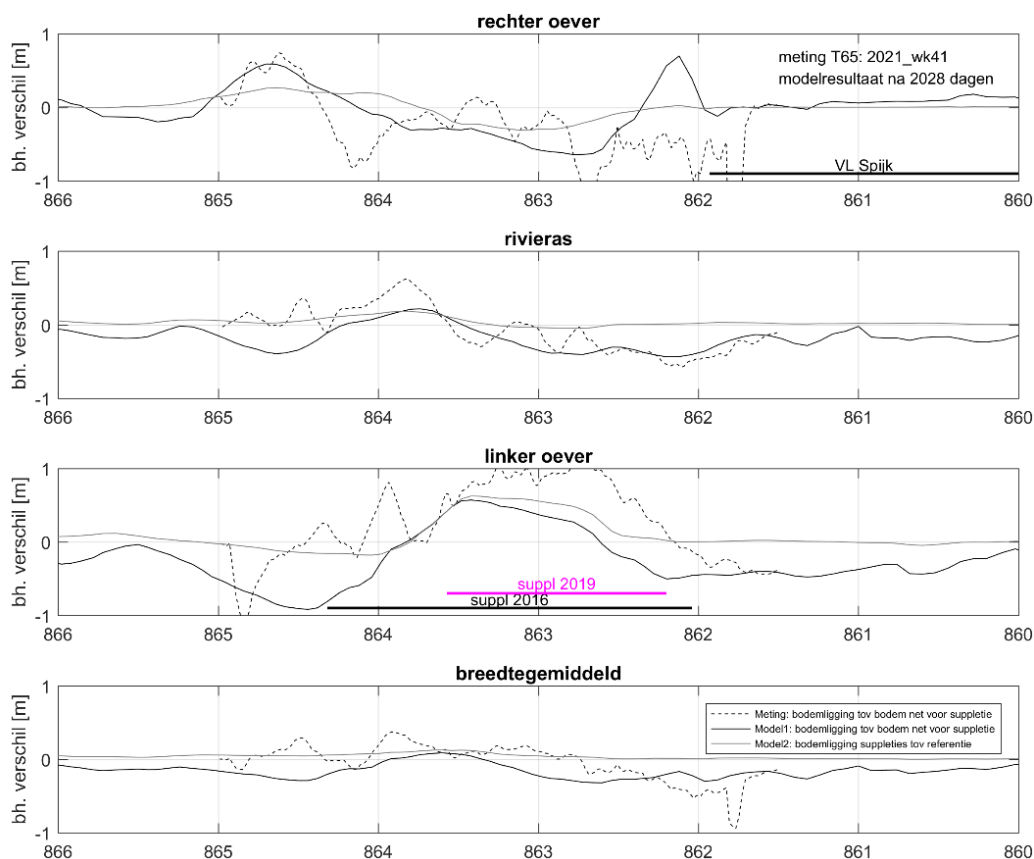
Figuur 87 Langdoorsnedes van de bodemverandering na aanleg van de 2019-suppletie. (bodempligging ten opzichte van bodempligging voor 2016-suppletie).



Figuur 88 Langsdoorsnedes van de bodemverandering na het hoogwater van 2020. (bodemligging ten opzichte van bodemligging voor 2016-suppletie).



Figuur 89 Langsdoorsnedes van de bodemverandering tijdens het hoogwater 2020. (bodemligging na hoogwater ten opzichte van voor hoogwater).



Figuur 90 Langsdoorsnede van de bodemverandering eind 2021 (laatst beschikbare meting). (bodemligging ten opzichte van bodemligging voor 2016-suppletie).

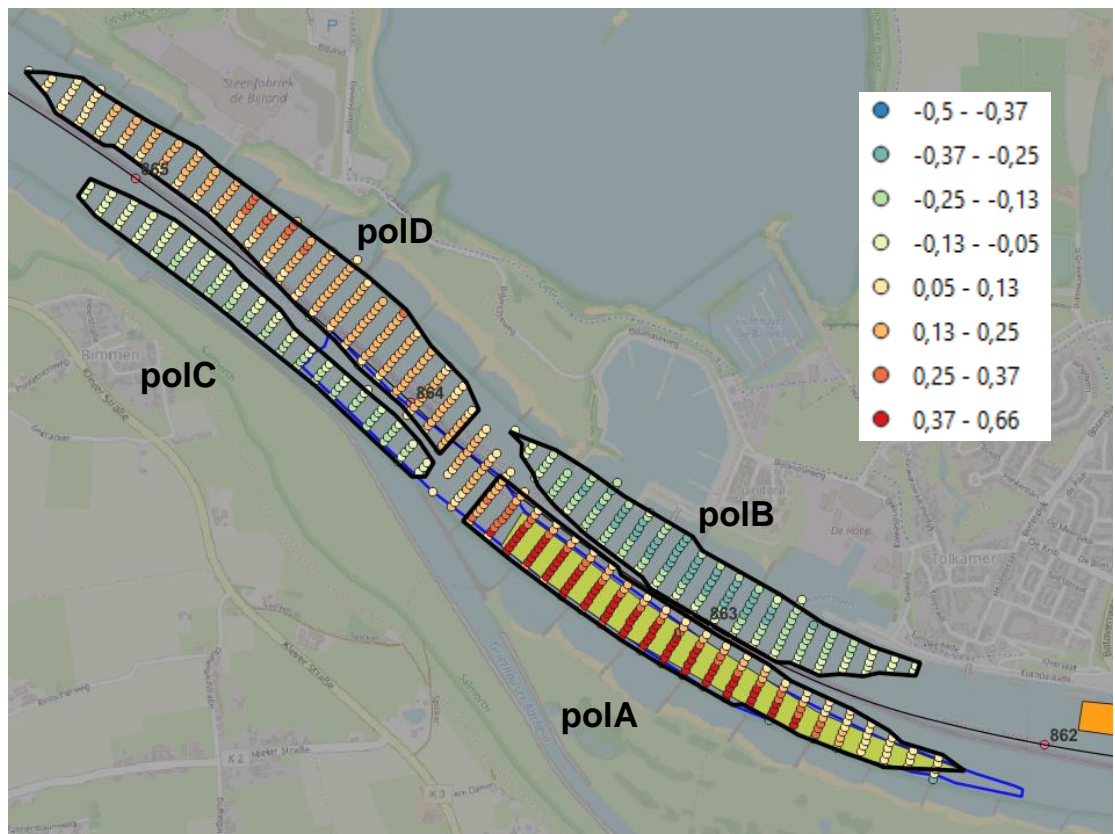
Vergelijking in vakken

De grootste relatieve bodemveranderingen treden in de hindcast-simulatie op ter plaatse van de suppletie (buitenbocht), in de binnenbocht daar direct naast, en benedenstrooms hiervan (Figuur 78). Om te analyseren in hoeverre de grootte en tijdschaal van bodemveranderingen overeenkomen met metingen zijn op deze locaties modelresultaten en metingen met elkaar vergeleken in vier vakken (Figuur 91). Binnen deze vakken vinden de karakteristieke bodemveranderingen ten gevolge van de suppleties plaats, deze zijn bepaald op basis van de ruimtelijke cumulatieve bodemveranderingen in de hindcast. Voor de vier vakken zijn per tijdstap de bodemveranderingen voor modelresultaat en meting bepaald, waarbij vergeleken is met het moment juist voor de eerste suppletie (Figuur 92).

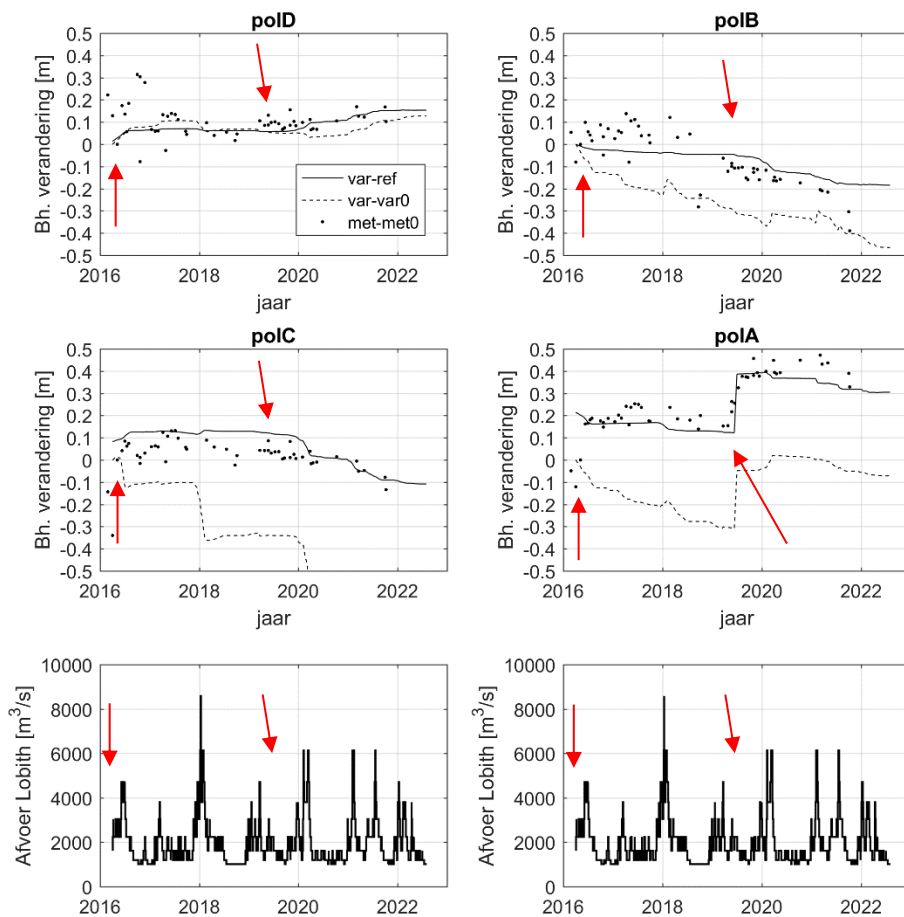
We constateren het volgende (Figuur 92):

- De bodemverandering t.g.v. de 2016-suppletie komt in het model snel tot stand (zwarte getrokken lijnen): direct na het eerste hoogwater. Vervolgens geeft het model nauwelijks bodemverandering tot aan de 2019-suppletie. Er is tot de suppletie van 2019 geen duidelijke relatie tussen de metingen en de modelresultaten. Dit komt mogelijk doordat de suppletiedikte relatief klein is ten opzichte van de spreiding in de metingen.
- Na de suppletie van 2019:
 - Komen de trends in bodemveranderingen (ten opzichte van de referentie) in de metingen redelijk overeen met de modelresultaten. De bodemveranderingen zijn ca. 10-20 cm in 2 jaar (en hangen samen met opgetreden hoogwaters).
 - Vooral in de modelresultaten zijn de effecten van hoogwaters goed te onderscheiden.

- Na juli 2021 zien we in het model bijna geen bodemverandering (ten opzichte van de referentieberekening) meer in de binnenbocht (polB), terwijl dat in de metingen wel het geval is. Dit komt waarschijnlijk door erosiekuilen die wel in de metingen zitten (paragrafen 4.4.4 en 4.4.5), maar niet in het model ontstaan.
- De bodemveranderingen zijn voor de 2019-suppleties groter en verlopen sneller dan de 2016-suppletie, zeker voor wat betreft de respons benedenstrooms (polC). Dat is logisch gezien het verschil in dikte van de suppletie; de 2019-suppletie was ongeveer hetzelfde volume, maar vond plaats over een kleiner gebied.
- Het geïsoleerde effect van de suppleties in het model (dus het bodemverschil met de referentieberekening) geeft een redelijke schatting van de invloed van de suppleties op de bodemligging. De berekende bodemveranderingen ten opzichte van de startbodem laten deels een ander gedrag zien dan de metingen, doordat de trends in bodemontwikkeling in het model niet overal overeenkomen met de gemeten trends. Dit geldt het sterkst voor polygoon C.



Figuur 91 Vier vakken waarbinnen bodemveranderingen in model en metingen zijn bepaald. De groene polygoon achter polA is de locatie van de 2019-suppletie. De blauwe lijn geeft de contour van de 2016-suppletie. De gekleurde bolletjes geven de totale bodemhoogteverandering ten opzichte van de referentie aan het einde van de hindcast-simulatie weer (na ongeveer 6 jaar).

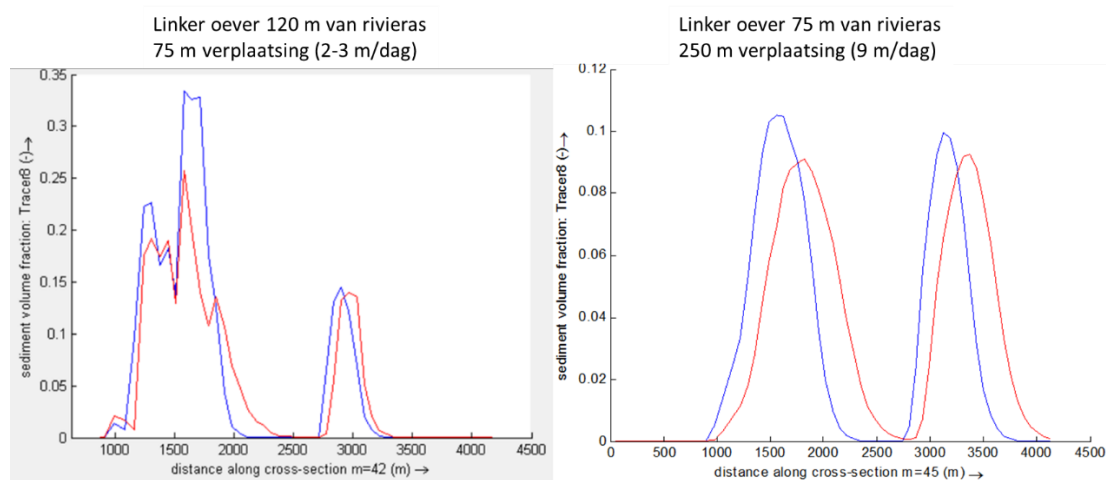


Figuur 92 Bodemveranderingen in 4 vakken uit Figuur 91 (bovenste 4) en onder de hydrograaf in de hindcast (onderste 2) t.b.v. interpretatie. De zwarte getrokken lijn geeft de relatieve bodemverandering in het model ten opzichte van de referentie; de gestreepte lijn geeft de bodemverandering in het model ten opzichte van de initiële bodemligging; de 'puntjes' geven de bodemverandering in metingen ten opzichte van juist voor de 2016-suppletie. De 2016-suppletie vindt in het model plaats direct bij de start van de berekeningen; de 2019-suppletie is in juni 2019. Beide momenten zijn weergegeven met rode pijlen.

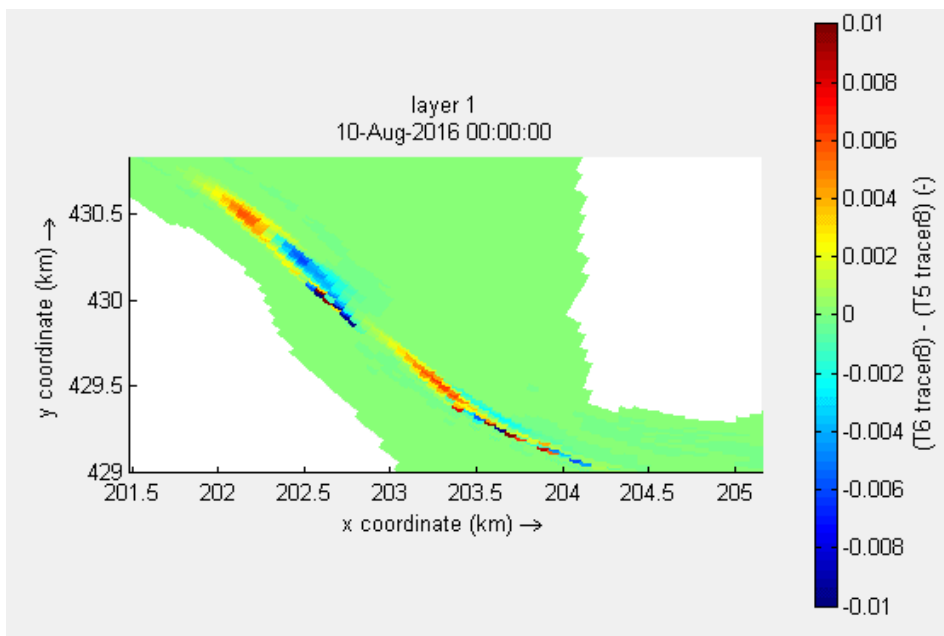
7.4.5 Vergelijking met gegevens Medusa

De suppletie van 2016 is in vak 1 en 3 uitgevoerd met graniet om de verplaatsing van de suppletie met een gammaspectrometer te kunnen volgen. Het gemeten signaal komt voor 99% uit de bovenste 30 cm en voor 90% uit de bovenste 15 cm (Koolstra, 2020b). Het gemeten signaal geeft dus geen volledig beeld van de hoeveelheid graniet in de bovenste 30 cm en daarnaast kan een deel van de suppletie in diepere bodemlagen terecht komen. Omdat de meting niet massabehoudend is, kijken we voor de modelprestatie naar de erosie- en sedimentatiepatronen en verplaatsingssnelheden zoals deze zijn beschreven in Koolstra (2020b). Voor het bepalen van de verplaatsingssnelheden heeft Koolstra (2020b) voor de metingen een breedtegemiddelde waarde bepaald (tussen normaallijnen). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de bovenstroomse granietsuppletie (vak 3), de grindsuppletie (vak 2) en de benedenstroomse granietsuppletie (vak 1)

Uit de metingen en het model volgen dezelfde patronen van verplaatsing. Tijdens het kleine hoogwater in de zomer van 2016 is er duidelijk verplaatsing van suppletiemateriaal naar benedenstreams. De metingen laten in deze zomer een verplaatsing van granietbult zien van 1 m/dag in vakken 1 en 3. In vak 2 gaat het tracerfront met 27 tot 30 m/dag. Het model laat in dezelfde periode (12 juli tot 9 augustus 2016) grote variatie in verplaatsing zien in breedterichting (Figuur 93). Aan de linker zijde van de rivier (waar de suppleties plaatsvinden), 75 m uit de rivieras, verplaatst het graniet in de 2016-suppletie drie keer zo snel als 120 m uit de rivieras, waarschijnlijk omdat de stroomsnelheden richting het midden van de rivier toenemen (Niesten et al., 2017). Daarnaast verplaatst de granietsuppletie in vak 3 (bovenstreams) zich sneller dan in vak 1 (Figuur 94). Het is niet onderzocht waarom deze verschillen ontstaan. Over de breedte varieert de verplaatsing van 2 tot 17 m/dag wat vele malen groter is dan de gemeten verplaatsing. Mogelijk zijn er verschillen in de verplaatsing doordat een verandering van de grindfractie zowel kan komen door een uitwisseling met diepere bodemlagen als een verplaatsing van het suppletiemateriaal. Daarnaast kan initieel de bodemontwikkeling verschillen tussen de meting en het modelresultaat door de manier waarop de suppletie in het model is geschematiseerd. Tijdens het hoogwater van 2018 komt de verplaatsing van grind en graniet in vak 3 veel beter overeen met de meting (7-11 m/dag). In de bodemhoogtemetingen is de verplaatsing van de suppletie echter niet te herkennen (Paragraaf 4.4.4). De overeenkomsten tussen het modelresultaat en de Medusametingen gedurende het 2018 hoogwater geeft vertrouwen in het model ten aanzien van de sedimentverplaatsing.



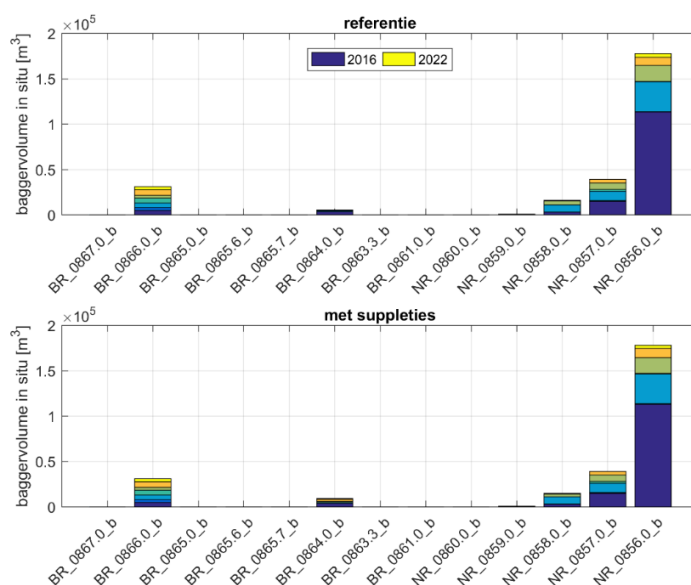
Figuur 93 De berekende volumefractie van het graniet (tracer8) over twee langsdoorsneden (links 120 m en rechts: 75 m van de rivieras) op basis van de hindcastberekening. Blauw = 12 juli, rood = 10 augustus 2016.



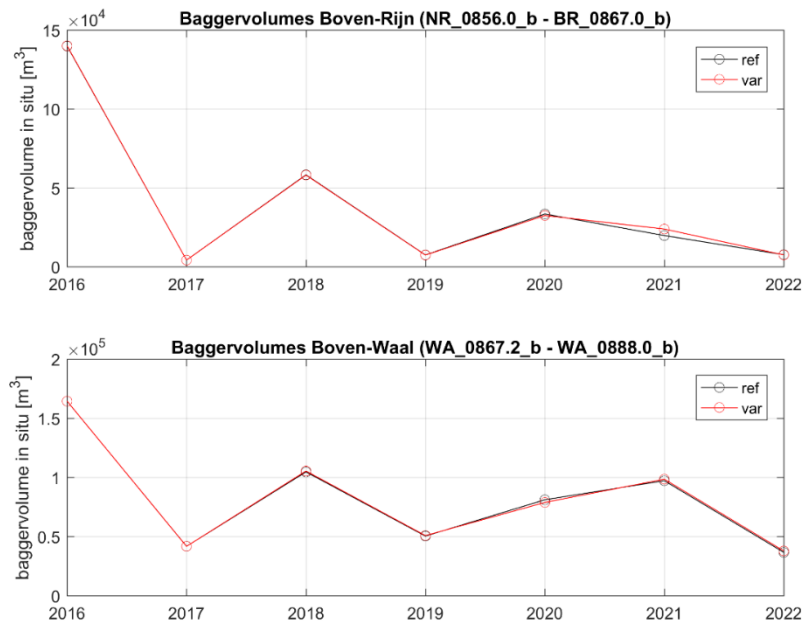
Figuur 94 De berekende verandering van de volumefractie van de tracer in de actieve laag in de zomer van 2016 (12 juli tot 10 augustus 2016) op basis van de hindcastberekening.

7.4.6 Baggervolumes

Figuur 95 en Figuur 96 geven de ontwikkeling van de berekende baggervolumes weer voor de hindcast-simulatie. Op de Nederrijn wordt rond rkm 856 in de berekeningen flink wat baggervolume berekend (zie ook paragraaf 7.2.4); op de Boven-Rijn zelf wordt in de nabijheid van de suppleties (rond rkm 863) in de berekeningen nauwelijks baggervolume berekend. Dit is in lijn met historische gegevens van geregistreerde baggervolumes (Becker et al., 2023). Het past tevens bij de observatie dat de Minst Gepeilde Diepte (MGD) vrijwel nooit op de Boven-Rijn wordt afgegeven (Becker et al., 2023) en dat er geen grote knelpunten zichtbaar zijn in en rond de vaargeul in de Waterdiepte kaarten van RWS tussen Lobith en de Pannerdensche Kop (Jans, 2018, zie Figuur 103). De in het model berekende baggervolumes net bovenstrooms van de Pannerdensche Kop (rkm 866-867) zijn toe te schrijven aan de ondiepte in de binnenbocht (zie paragraaf 0).



Figuur 95 Baggervolumes berekend in de hindcast. Boven: referentie, onder met suppleties. Er is geen significant verschil tussen beide simulaties in baggervolume.



Figuur 96 Baggervolumes berekend in de hindcast; ontwikkeling in de tijd. Boven: totaal baggervolume per jaar in de Boven-Rijn. Onder: totaal baggervolume per jaar in de Boven-Waal. Let op: de schaal van de y-as verschilt in beide grafieken.

7.4.7 Conclusie modelprestatie o.b.v. hindcast

Op basis van de hindcast-berekeningen is de modelprestatie bepaald. Aangezien de initiële bodemligging in het model niet overeenkomt met de metingen is hier voornamelijk gekeken naar erosie- en sedimentatiepatronen, trends in bodemontwikkeling en verplaatsingssnelheden. Zowel in de metingen als in het model vinden bodemveranderingen plaats op verschillende tijd en ruimtelijke schalen.

Kleine schaal (alles kleiner dan enkele gridcellen, ofwel tot de lengte van ca. een kribvak).

Op deze schaal laten de metingen veel meer bodemdynamiek zien dan de modelresultaten:

- Kleinschalige bodemvariëaties zoals duinen en de ruwheidseffecten daarvan worden niet expliciet gemodelleerd.
- Erosie rond kribben is niet of beperkt zichtbaar in het model.
- De riviergeometrie, de afvoerd discretisatie en de schematisatie van sedimenttransport en bodemlagen worden in te weinig detail meegenomen in het model om lokale bodemhoogtevariëaties volledig te beschrijven (e.g. doorbreken pleisterlagen, erosiekuilen, afvoeruitwisseling zomerbed en uiterwaard).

Middelgrootte schaal (tot enkele kilometers).

Op deze schaal beïnvloeden de uiterwaardgeometrie (e.g. geulen) en de suppletie de bodemverandering:

- Meerjarige ontwikkeling:
 - Erosie- en sedimentatiepatronen komen overeen
 - De metingen worden nog beïnvloed door de ontwikkeling naar een nieuw evenwicht als gevolg van de aanleg van de vaste laag bij Spijk (Sieben, 2017 en Paragraaf 4.4.2). In het model is dit effect niet meer zichtbaar doordat de initiële bodemligging volledig is ingespeeld.
 - erosie binnenbocht ter hoogte van suppletie

- erosie benedenstrooms van de suppletie (bij linker oever) en bij de andere oever sedimentatie
- Bodemveranderingen zijn in dezelfde ordegrootte (Figuur 92). De bodemveranderingen zijn het sterkst en verlopen het snelst voor de 2019-suppletie.
- De tijdschaal waarin de bodemveranderingen optreden rond de suppletie komen voor de 2019-suppletie redelijk goed overeen met metingen (10-20 cm over 2 jaar, vakgemiddeld). Voor de relatief kleinschalige 2016-suppletie (30 cm dikte over lang traject) wordt het maximale bodemeffect in het model eigenlijk direct na het 2016 hoogwater bereikt. In werkelijkheid gebeurt dit pas na het hoogwater van januari 2018.
- De 2019-suppletie verplaatst in de metingen minder snel dan in het model.
- Vergelijking met Medusa-metingen laat zien dat er initieel grote verschillen zijn tussen de gemeten en gemodelleerde verplaatsing van de 2016-suppletie (grind langzamer en graniet sneller ten opzichte van het model).
- Effecten van hoogwater
 - De effecten door de uitstroom vanuit de uiterwaard op de linker oever zijn zowel in het model als in de metingen zichtbaar.
 - Tijdens het hoogwater van 2018 is er een goede overeenkomst tussen Medusa metingen en modelresultaten voor zowel de verplaatsingssnelheden als erosie- en sedimentatiepatronen.
 - Na hoogwater 2020 laten de modelresultaten erosie zien benedenstrooms van de 2019-suppletie, maar dit is niet zichtbaar in de metingen.

Grootschalig (over de gehele tak)

Dit betreft vooral de grootschalige bodemerosie in het model. In de metingen is de bodem stabiel. Het is niet onderzocht in hoeverre de eroderende trend in het model de bodemontwikkeling en verplaatsingssnelheden beïnvloeden. In de presentatie van de resultaten kijken we daarom altijd naar verschillen ten opzichte van de referentie waardoor het effect van het grootschalige gedrag beperkt is (paragraaf 7.4.2).

Advies toepasbaarheid model voor effectbepaling suppleties:

- Het model is goed in staat om de patronen van bodemontwikkeling te voorspellen wanneer deze ten opzichte van het referentiemodel worden beschouwd.
- Gemodelleerde bodemveranderingen rond de suppletielocatie zijn in dezelfde ordegrootte als metingen. De relatieve bodemveranderingen zijn in de modelsimulaties het sterkst en verlopen het snelst voor de 2019-suppletie. De tijdschaal waarin de bodemveranderingen optreden komen voor de 2019-suppletie goed overeen met metingen (10-20 cm in 2 jaar, vakgemiddeld). Voor de 2016-suppletie zit er teveel “ruis” op de metingen om hier een conclusie over te kunnen trekken.
- De verplaatsing van de 2016-suppletie (tracer) wordt door het model anders ingeschat. Na de 2016-suppletie verplaatst het graniet in het model sneller, maar het grind langzamer dan in werkelijkheid. De verwachting is dat dit grotendeels een initieel effect is. De verplaatsing tijdens het 2018 hoogwater komt in de meting en berekening overeen. De 2019-suppletie is zonder tracer uitgevoerd, er kan dus niet beoordeeld worden hoe goed het model de verplaatsing van het suppletiemateriaal voorspelt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de verplaatsingssnelheid van de tracer sterk afhankelijk is van keuzes en aannames in het model (bodemmonster i.p.v. bakmonster voor 2019-suppletie, 2016-suppletie als nieuw sediment i.p.v. bodemeigen materiaal, moment van suppleren in model). Daarnaast heeft de vaste laag bij Spijk in werkelijkheid nog invloed op de bodemontwikkeling bij de suppleties maar in het model niet. Een gevoeligheidsanalyse kan meer inzicht geven in de oorzaak van de verschillen in verplaatsingssnelheden.

Gezien de berekende grootschalige bodemveranderingen die verschillen met metingen en de verschillen in tijdschalen, zijn de resultaten alleen bruikbaar voor de effectbepaling voor rivierfuncties als wordt gekeken naar relatieve verschillen en maximale (relatieve) effecten. Om de voorspelling van de absolute bodemligging en de morfodynamiek van suppleties te verbeteren is het advies om een aantal tekortkomingen in het referentiemodel aan te pakken.

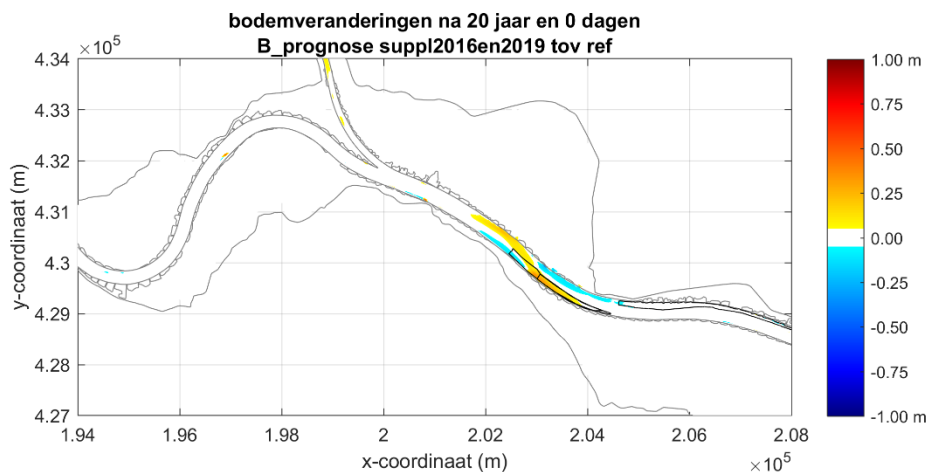
7.5 Prognose: gegevens t.b.v. effect suppleties op rivierfuncties

Dit hoofdstuk beschrijft (neven)effecten van de suppleties op basis van de prognose-berekeningen. Deze resultaten zijn in andere deelprojecten gebruikt voor het beoordelen van rivierfuncties (Becker et al., 2023). Dit hoofdstuk is dus bedoeld als toelichting en beschrijving van gemodelleerde (neven)effecten; voor de daadwerkelijke effectbeoordeling zie Becker et al. (2023).

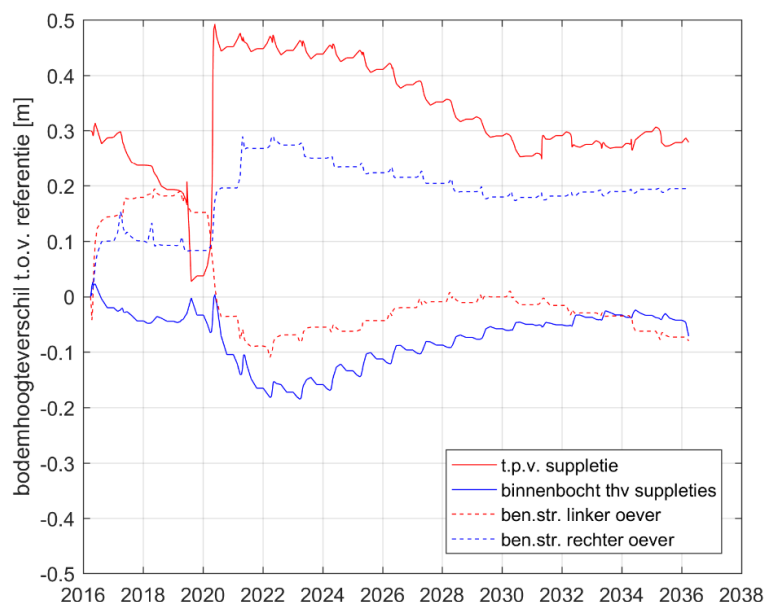
7.5.1 Bodemligging en verplaatsing suppletie materiaal lange termijn

Figuur 97 geeft de gesimuleerde relatieve bodemveranderingen ten gevolge van de suppleties in 2D weer. Het effect van de suppleties is alleen nog lokaal zichtbaar. Hoe deze bodemveranderingen zich in de tijd ontwikkelen is te zien in Figuur 98 en Figuur 99. We zien relatieve bodemverhoging ter hoogte van de suppleties en juist erosie in de binnenbocht. Benedenstrooms is het omgekeerde te zien. Figuur 99 toont hoe het effect van de suppleties (relatieve bodemverandering) zich voortplant door het systeem en hoe dit varieert op verschillende locaties in de dwarsdoorsnede. Vooral de 2019-suppletie 'verdwijnt' snel door relatief fijn sediment in het model (bakmonsters). De resultaten zijn plausibel. Wel zien we bovenstrooms van de vaste laag Spijk vrij grote 'spikes' in het bodemeffect (bv Figuur 99). Dit gedrag zien we vaker rond vaste lagen die via een afwijkend numeriek concept (ruwheid & sedimenttransport) in het model zijn opgenomen; deze 'verstoringen' hebben geen effect op het gemodelleerde relatieve effect van de suppleties.

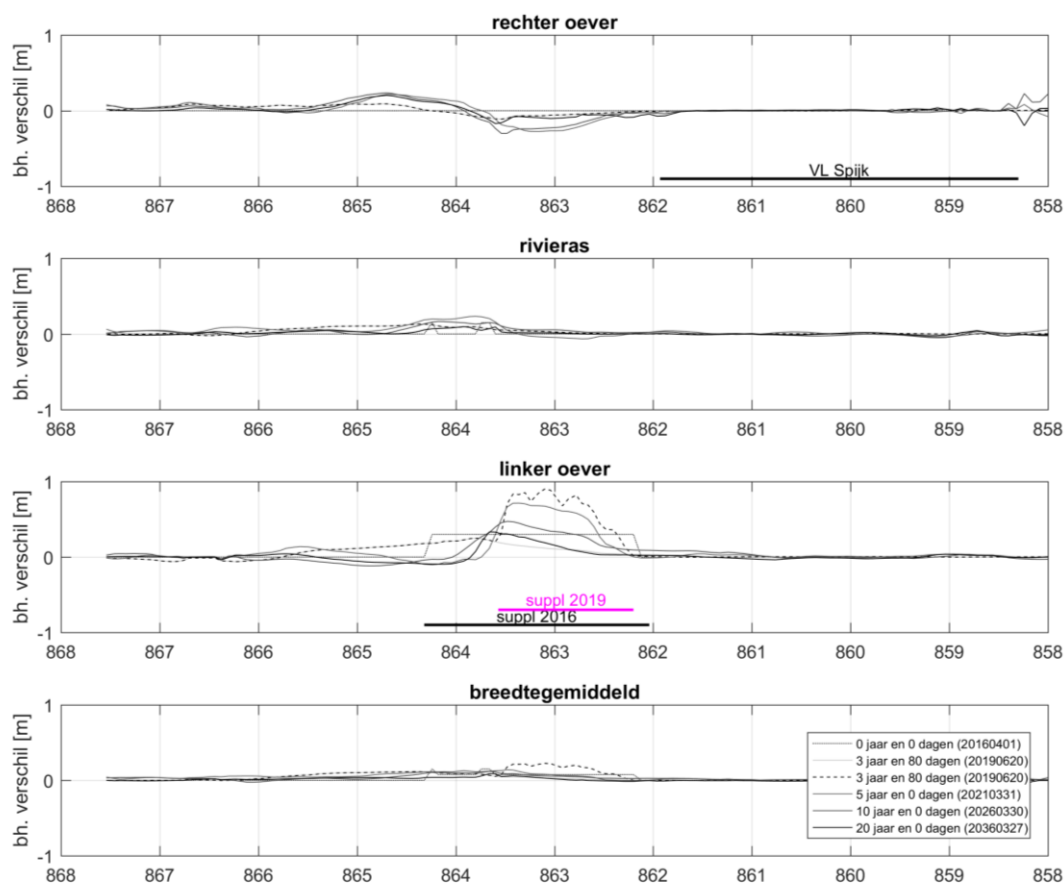
Omdat de suppleties plaatsvinden over relatief korte trajecten (t.o.v. typische lengte van de stuwkromme), niet regelmatig herhaald worden en de gesuppleerde volumes klein zijn ten opzichte van het totale jaartransport (grotfweg 10%) zijn geen effecten op de bodemligging benedenstrooms van het splitsingspunt te verwachten. Doordat er in een deel van het dwarsprofiel wordt gesuppleerd (diepe buitenbocht) verandert over een periode van 20 jaar lokaal het dwarsprofiel in brederichting ter plaatse van de suppleties, met een hogere bodemligging in de buitenbocht en een lagere bodemligging in de binnenbocht. Direct benedenstrooms gebeurt het tegenovergestelde.



Figuur 97 Bodemverandering na 20 jaar als gevolg van de suppleties ten opzichte van de referentie.

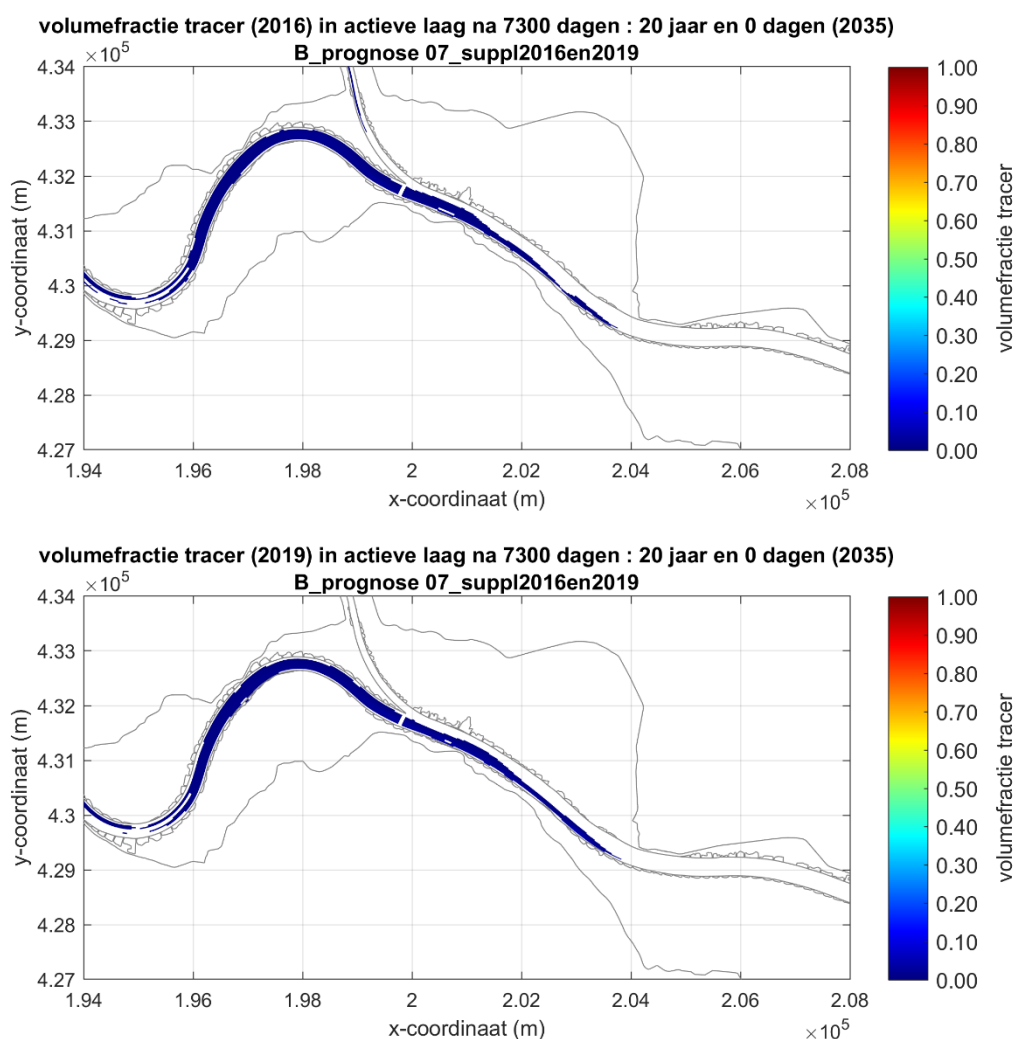


Figuur 98 Ontwikkeling bodemhoogte-effect in de tijd voor 4 locaties; getrokken lijnen ter hoogte van de suppletie (net benedenstrooms 2019-suppletiecontour); gestreepte lijnen wat verder benedenstrooms.



Figuur 99 Bodemverandering na 20 jaar op de rechter oever, rivieras en linker oever als gevolg van de suppleties ten opzichte van de referentie. Linker en rechter oever zijn ongeveer 120 m uit de as. In de prognose-berekening wordt na 3 jaar en 80 dagen de 2019-suppletie instantaan aangebracht (gestreepte lijn). Het verschil tussen de lichtgrijze en gestreepte lijn geeft daarmee de suppletiedikte weer. De 'driehoekjes' op de rivieras in de grijze lijn zitten op locaties waar de 2016-suppletie ook ter plaatse van de rivieras is.

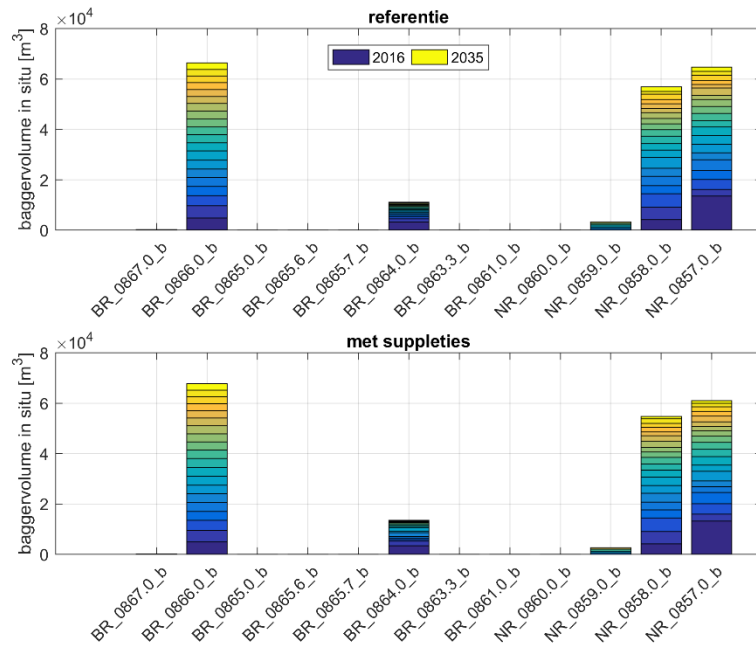
In de prognose-berekening is een deel van het 2016-suppletiemateriaal in het Pannerdensch Kanaal terecht gekomen (Figuur 100, boven); dit geldt niet voor het 2019-suppletiemateriaal (Figuur 100, onder), waar alles richting de Waal gaat. De volumefractie van de tracer is de fractie van het tracervolume in de actieve laag ten opzichte van het totale sedimentvolume in de actieve laag. Door de bodemerosie in het Pannerdensch Kanaal ligt de bodem hiervan veel lager dan de Waal (paragraaf 7.4.2). Dit zorgt bovenstrooms van de bifurcatie voor een dwarshelling waar sediment met een hogere dichtheid (graniet) meer door wordt beïnvloed dan sediment met een lagere dichtheid (grind). Mogelijk wordt hierdoor relatief meer graniet naar het Pannerdensch Kanaal getransporteerd. Dit kan verklaren waarom de 2016-suppletie met de dichtheid van graniet wel wordt teruggevonden in het Pannerdensch Kanaal en de 2019-suppletie met de dichtheid van grind niet. Deze hypothese is niet verder onderzocht.



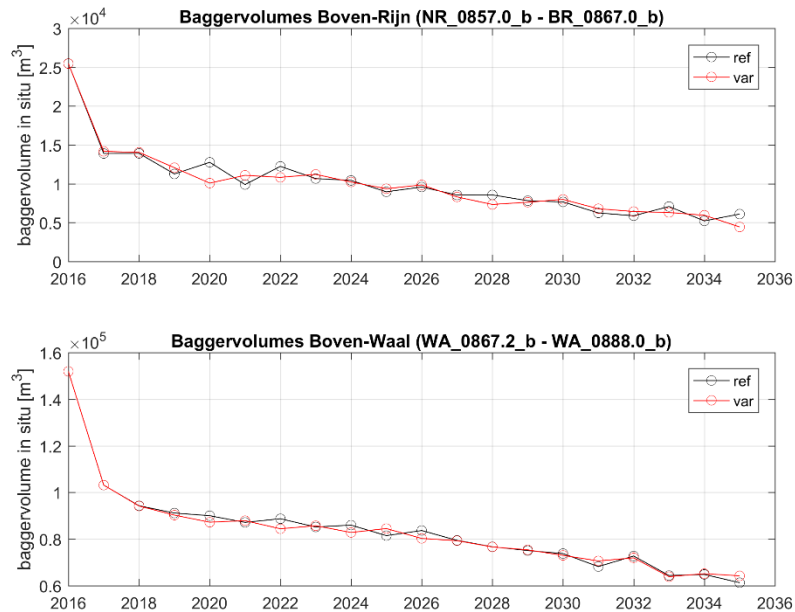
Figuur 100 De volumefractie (fractie van het tracervolume in de actieve laag ten opzichte van het totale sedimentvolume in de actieve laag) van het 2016-suppletiemateriaal (boven) en van het 2019-suppletiemateriaal na 20 jaar (prognoseberekening).

7.5.2 Baggervolumes

Figuur 101 en Figuur 102 geven de ontwikkeling van de berekende baggervolumes weer. Er is geen significant effect door suppleties waarneembaar in de Boven-Rijn en Boven-Waal.



Figuur 101 Baggervolumes berekend in de prognose. Boven: referentie, onder met suppleties. Er is geen significant verschil tussen beide simulaties in baggervolume.

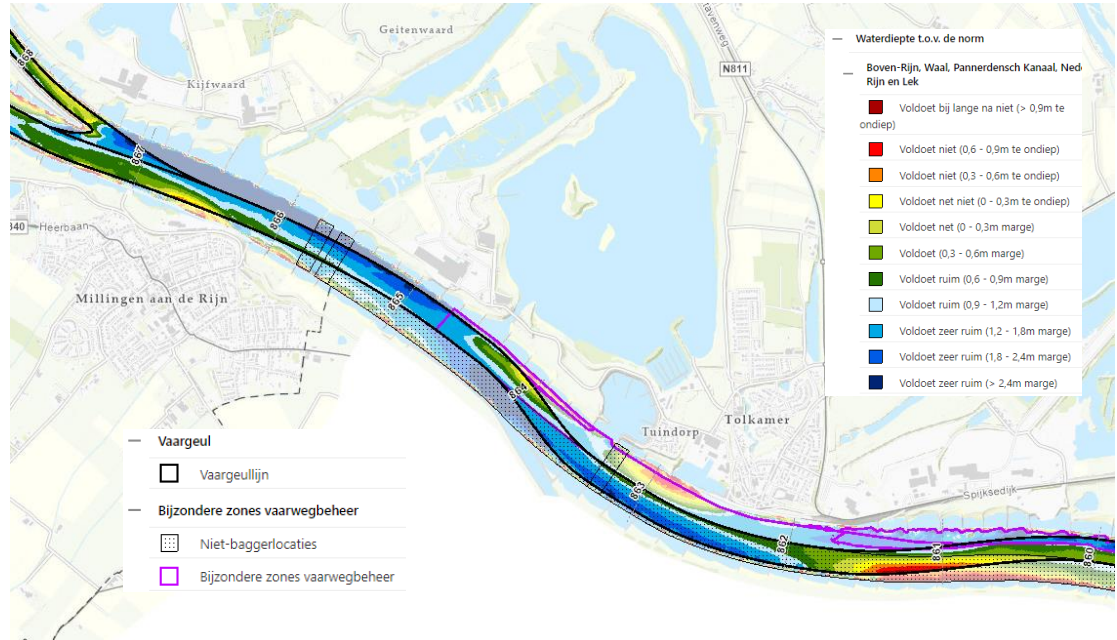


Figuur 102 Baggervolumes berekend in de prognose; ontwikkeling in de tijd. Boven: totaal baggervolume per jaar in de Boven-Rijn. Onder: totaal baggervolume per jaar in de Boven-Waal. Let op: de schaal van de y-as verschilt in beide grafieken.

7.5.3 Waterdiepte (in relatie tot de norm)

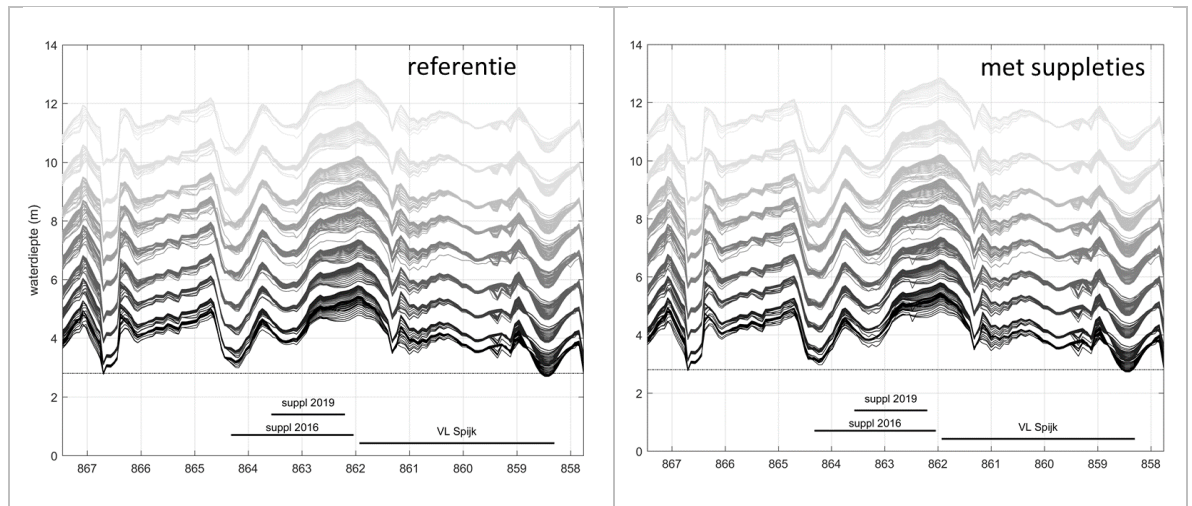
Voor het beoordelen van de functie scheepvaart mag de waterdiepte bij laagwater niet negatief beïnvloed worden. De waterdiepte dient te worden beoordeeld ten opzichte van de vigerende overeengekomen lage rivierwaterstand (OLR) die geldt bij een Boven-Rijnafvoer van 1020 m³/s. De waterdiepte bij OLA wordt berekend in Delft3D en elk jaar geüpdatet. Door verschillende modelaannames en uitgangspunten (paragraaf 7.4.2) is de waterdiepte berekend in Delft3D niet direct bruikbaar voor de beoordeling van deze rivierfunctie. Voor het beoordelen van de functie scheepvaart is – in overleg met het betreffende deelproject (Becker et al., 2023) – de volgende aanpak gevolgd:

- Alleen berekeningen zonder bagger/storten zijn beschouwd, aangezien in berekeningen met baggeren/storten ondieptes worden weggebaggerd.
- Huidige (scheepvaart)knelpunten kunnen worden afgeleid uit de Waterdieptekaarten RWS-ON (Jans, 2018), zie Figuur 103. Deze kaarten zijn gemaakt op basis van meerdere historische bodempeilingen van 1999 t/m 2012. De twee suppleties zitten dus niet in deze dataset. Bij het bepalen van de waterdiepte zijn de peilingen gecorrigeerd voor tijdelijke en lokale bodemvariaties, zoals duinen. Daarnaast is het effect van de vaste laag bij Spijk ook nog niet zichtbaar in de waterdieptekaart.
- Een eventueel effect op deze knelpunten, of het ontstaan van nieuwe, kan bepaald worden aan de hand van de volgende twee bewerkingen op modelresultaten:
 - Kleinste waterdiepte in de vaargeul:
 - Selectie punten in 'vaargeul 2018' (ligging uit Waterdieptekaarten, download geoweb)
 - Kleinste waterdiepte berekenen per dwarsraai
 - Maximale bodemstijging, t.b.v. koppeling met knelpunten:
 - Simulatie met suppleties minus simulatie referentie
 - Loop over alle tijdstappen in model, kaart met maximale berekende bodemverandering over periode 20 jaar. De interpretatie van deze diepte en het effect op de waterdiepte en scheepvaart wordt uitgewerkt in (Becker et al. 2023).

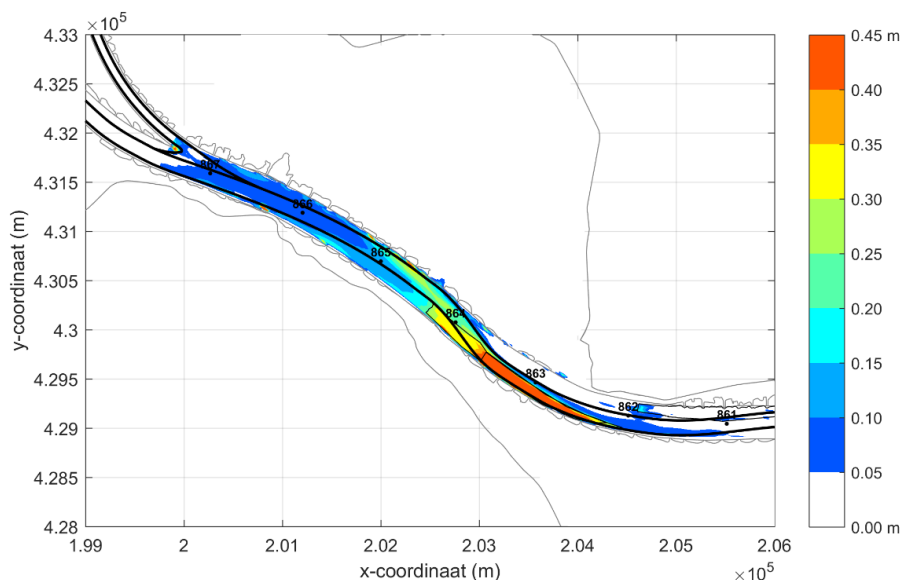


Figuur 103 Waterdieptekaarten RWS Oost-Nederland (Jans, 2018).

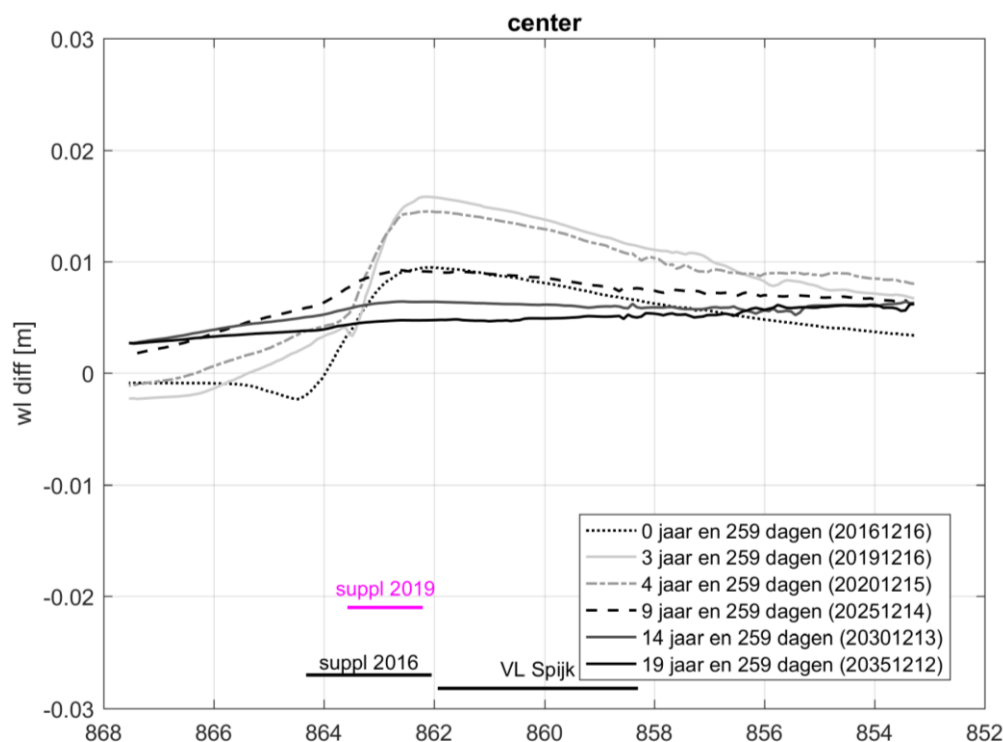
Figuur 104 geeft voor de referentie en situatie met suppleties de waterdiepte in alle stappen van de prognoseberekening weer. De link met de waterdiepteknelpunten in Figuur 103 is duidelijk zichtbaar. Vrijwel nergens wordt de norm onderschreden, en daar waar dat gebeurt (t.p.v. 858,4) is dat ook reeds het geval in de referentie. De maximale relatieve bodemstijging gedurende de berekeningen is weergegeven in Figuur 105. De ruimtelijke combinatie met de waterdieptekaart is gemaakt in Becker et al. (2023). Het effect van de suppleties op OLR is marginaal, met maximaal zo'n 1,5 cm verhoging van de laagwaterstand (Figuur 106). Merk op dat het effect op OLR toeneemt wanneer de tweede suppletie is geplaatst. De toename van OLR is klein t.o.v. de bodemverandering en is daarom buiten beschouwing gelaten. De waterdieptekaart bevat nog niet het effect van de vaste laag bij Spijk. Het evenwichtseffect van de aanleg van de vaste laag bij Spijk (Figuur 72) laat zien dat de bodemhoogteverandering ter hoogte van de suppletie tot 1 m groter is ten opzichte van de situatie zonder vaste laag.



Figuur 104 Kleinste waterdiepte per dwarsraai voor referentie (links) en suppleties (rechts). Zwart is de laagste doorgerekende Lobithafvoer ($1020 \text{ m}^3/\text{s}$), grijs de hoogste afvoer ($8592 \text{ m}^3/\text{s}$). De horizontale lijn geeft de normwaterdiepte bij OLA (2,8 m).



Figuur 105 Maximale bodemstijging ten gevolge van suppleties over een periode van 20 jaar.



Figuur 106 Berekend verschil in OLR met en zonder suppleties. De lichtgrijze lijn (20191216) is na de 2019-suppletie, wat de extra toename van OLR verklaart.

7.5.4 Stroombeeld

Het effect van de suppleties op het stroombeeld is nodig voor de rivierfuncties 'dwarsstroming' en 'kabels/leidingen'.

Dwarsstroming

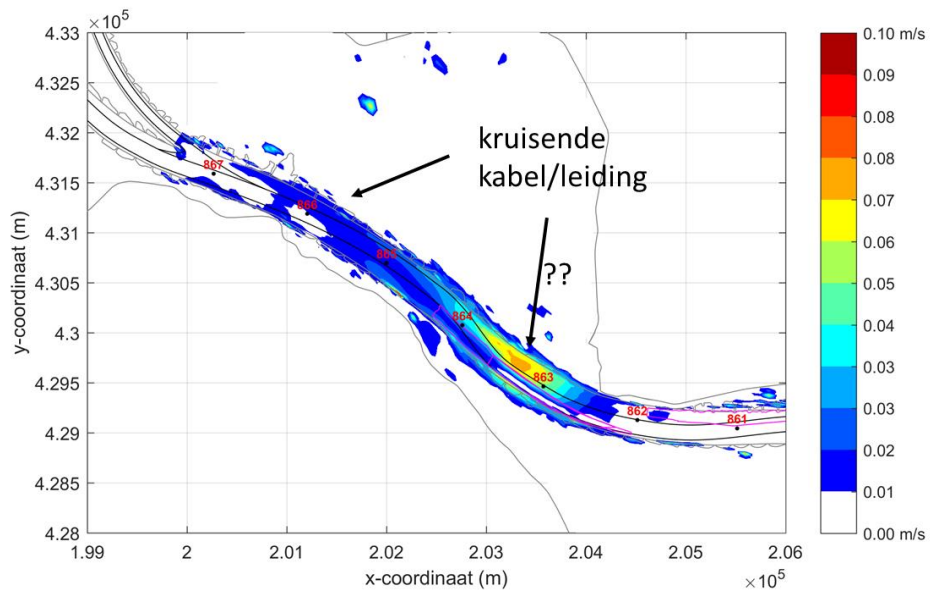
- Berekeningen zonder baggeren en terugstorten (grootste effect op bodemligging wanneer beheer niet goed wordt uitgevoerd)
- Alleen modeldomein 'br2', voor overige trajecten geen effect verwacht
- Deze resultaten zijn beschikbaar (gesteld) voor andere deelprojecten; daar is analyse uitgevoerd en gerapporteerd (Becker et al., 2023).

Stroombeeld (effect op stroomsnelheid en bodemschuifspanning)

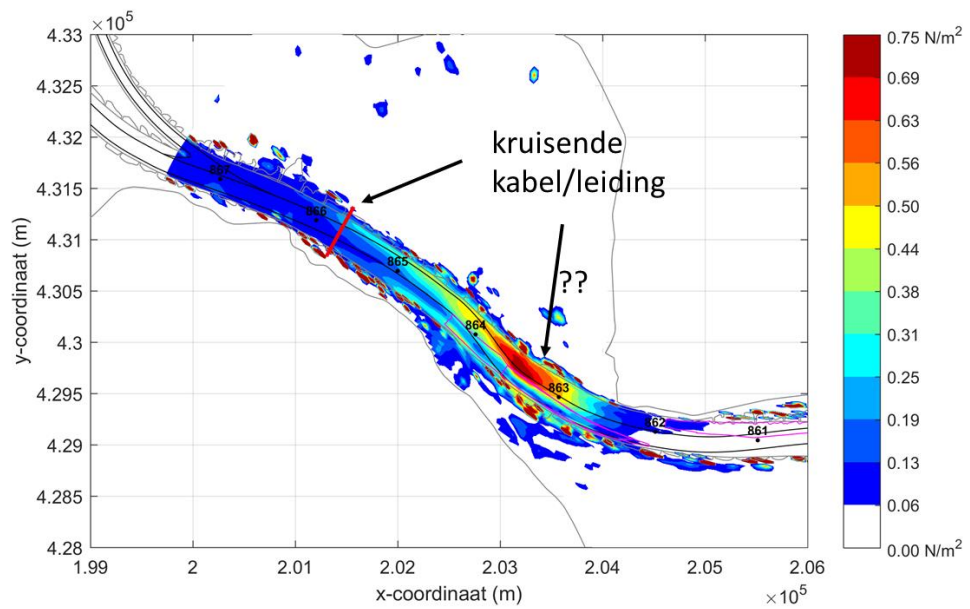
In overleg met het relevante deelproject zijn de volgende gegevens beschikbaar gesteld (steeds voor de gehele periode van 20 jaar in de prognoseberekening en relatief ten opzichte de referentie, dus de situatie met suppleties ten opzichte van de situatie zonder suppleties):

- Figuur 107: Maximale relatieve toename van de stroomsnelheid door suppleties
- Figuur 108: Maximale relatieve toename van de bodemschuifspanning door suppleties
- Figuur 109: Maximale relatieve erosie door suppleties

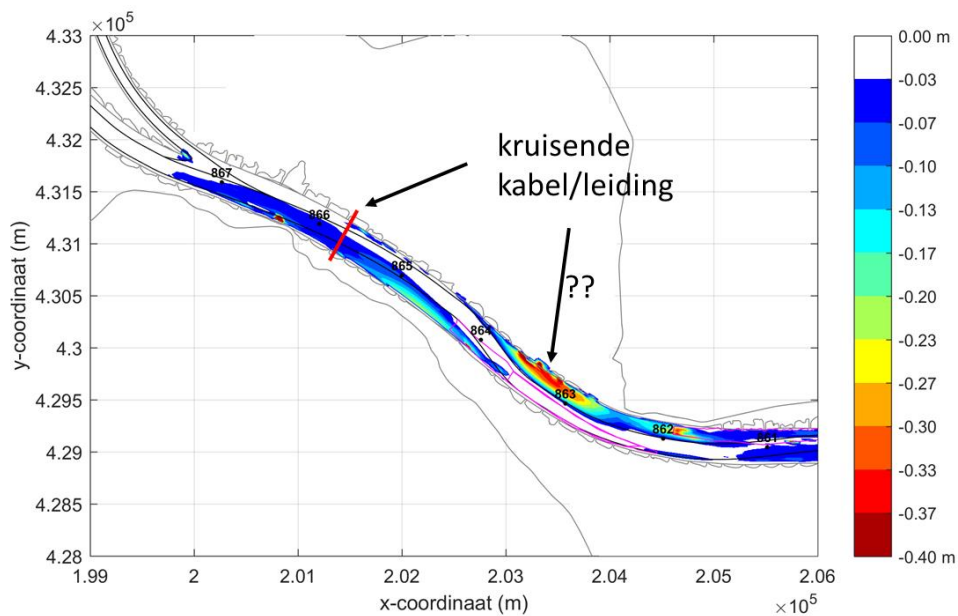
De stroomsnelheid en bodemschuifspanning nemen vooral toe in de binnenbocht ter hoogte van de suppleties en benedenstreams aan de rechter oever. Dit zijn ook locaties waar de grootste erosie ten gevolge van suppleties te verwachten is. Aan het einde van de vaste laag Spijk (dus bovenstreams van de suppleties) is ook wat erosie te zien, door stuwkromme-effecten.



Figuur 107 Maximale toename van de stroomsnelheid door suppleties.



Figuur 108 Maximale toename van de bodemschuifspanning door suppleties.



Figuur 109 Maximale erosie door suppleties ten opzichte van de referentie.

7.5.5 Verval Lobith/Pann. Kop

Figuur 56 geeft de ontwikkeling van het verval tussen Lobith en de Pannerdensche Kop weer. Hier valt op:

- Bij zowel de simulaties met als zonder suppleties neemt in absolute zin het verval af in de loop van de tijd. Dit komt mogelijk door een afname van de bodemerosie op de Boven-Waal.
- Het effect van elk van de suppleties op het verval is ongeveer 1 cm (suppletie 2016 in initiële bodem).
- De suppleties hebben nog opvallend lang een effect op het verval (ook al is deze klein).

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Geobserveerde dynamiek van de suppleties

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. Deze veroorzaakt een sedimentatiegolf die het suppletiegebied in loopt. Dat betekent dat de suppletie een reeds aanwezige trend in de bodem realiseert en dus niet meer volledig ageert als een verstoring van de bodemligging. Waarschijnlijk wordt de suppletie daardoor gedeeltelijk of geheel immobiel. 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. Dat is te zien aan het feit dat Koolstra (2020b) en Niesten et al. (2017) verschillende waarden (30 m/d en 13 m/d) afleiden voor dezelfde periode, het kleine hoogwater tijdens de aanleg van de eerste suppletie. 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. In de periode tussen de aanleg en begin 2018 (dus 1,5 jaar), met vooral lage afvoer gevolgd door het hoogwater 2018, is het tracerfront uit vak 3 volgens de metingen met 1,1 km verplaatst.

8.2 Geobserveerde invloed op bodemligging, -samenstelling en waterstanden

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.

De erosie naast de suppletie 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).

Op de Boven-Rijn, op het suppletietraject en benedenstrooms daarvan, veroorzaken hoogwaters een sterke dynamiek in de bodemligging. Bijvoorbeeld is in 2018 door het hoogwater een stuk van de eerste suppletie in de vorm van sedimentgolven naar benedenstrooms verplaatst. De amplitude daarvan is in de orde grootte van de dikte van de suppletie gebleven.

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 links van de as, als midden of rechts van de as). 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 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.

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. Vanwege de grote variatie in de waterstandsgegevens is dit getal afgeleid uit de modelberekeningen. Gebaseerd op deze en eerdere modelberekeningen (Becker, 2021) lijkt het waterstandseffect met name bepaald te worden door het volume van de suppletie. De dikte heeft ook invloed, maar minder.

De locatie van de ADM-meetpaal Lobith wordt beïnvloed door zowel de opstuwning van de waterstand als de verandering in de bodemligging veroorzaakt door de suppleties en de aanleg van de vaste laaf bij Spijk. Er wordt daarom aanbevolen om de Qf-relatie van de meetpaal regelmatig bij te werken.

8.3 Prognose toekomstige invloed van de suppleties

Het patroon van alternerende erosie en sedimentatie ontwikkelt zich stroomafwaarts. Dat wil zeggen dat het een plaatsvast patroon is, maar het wordt in de loop van de tijd steeds verder benedenstrooms zichtbaar. De snelheid daarvan wordt met name door het aantal en de grootte van de gepasseerde hoogwaters bepaald. De invloed van de suppletie zal daardoor dus de komende jaren langzaam verder benedenstrooms zichtbaar worden, hoewel het wel geleidelijk zal uitdempen. Omdat het patroon nog in ontwikkeling is en bepaald wordt door hoogwaters, kan de locatie en lengte van de erosie en sedimentatie niet met een eenvoudige vuistregel worden bepaald.

De modelberekeningen geven aan dat de bodemverandering door de suppletie maar langzaam uitdempt, in het model duurt de demping ruim 10 jaar. Vanwege de geringe snelheid van de geobserveerde demping in verhouding tot de lengte van de beschikbare datareeks (6 jaar) is niet te beoordelen hoe goed deze prognose is. Maar de verwachting is dat de suppleties nog zeer lang zichtbaar zullen zijn in de bodemligging.

De invloed van de suppleties op de waterstanden zal afnemen naarmate de invloed op de bodemligging uitdempt.

Het relatief grove gesuppleerde sediment is opgenomen in de actieve laag van de Boven Rijn zonder zichtbare vergroving van de bemonsterde toplaag. Tijdens hoge afvoeren kan dit grove sediment, dat vermoedelijk door verticale sorteringsprocessen dieper in de bedding is terechtgekomen, 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 in de toekomst.

8.4 Prestatie van het numerieke model

Er heeft geen validatie van de berekende absolute bodemligging plaatsgevonden (aanvullend op de modelkalibratie die echter al in 2005 is uitgevoerd). Wel is geanalyseerd in hoeverre het model de invloed van de suppleties op de bodemligging kan voorspellen. Het verschil tussen de berekeningen met en zonder suppletie laat het juiste patroon en de juiste orde grootte van de grootschaligere bodemveranderingen zien (het 2D-patroon). Dus kunnen de modelresultaten worden gebruikt om de invloed van de suppletie op de bodemligging en ook op waterdieptes te voorspellen. Wel berekent het model een snellere verplaatsing van de suppletie“bult” dan uit de metingen blijkt. Kleinschaligere effecten in de bodemligging, zoals bodemvormen en kleinere migrerende sedimentgolven, en bepaalde processen, zoals de impact van scheepvaart, gelimiteerde sediment-menging en het openbreken van grovere sedimentlagen en daardoor ontstaan van erosiekuilen, kan het model niet voorspellen vanwege de redelijk grove roosterresolutie en omdat complexe processen vereenvoudigd zijn opgenomen in het model.

Specifiek voor de analyse naar veranderingen in de waterdieptes is de berekende invloed van de suppletie (verandering in bodemligging) op de actuele gemeten bodemligging gesuperponeerd. Absolute waterdieptes uit het model kunnen niet gebruikt worden, omdat de initiële bodemligging in het model niet overeenkomt met de daadwerkelijke bodemligging en het model niet alle lokale trends in de bodemontwikkeling goed voorspelt.

De berekende verplaatsing van het tracer materiaal komt wat betreft het patroon goed overeen met de Medusa-metingen. De berekende verplaatsingssnelheden komen voor het eerste jaar niet goed overeen met de door Koolstra (2020b) bepaalde waarden, de granietbult beweegt in het model sneller (1 m/dag in meting en 2-17 m/dag in het model) en het tracerfront beweegt zich in het model langzamer (ongeveer 2 keer langzamer) dan uit de metingen is afgeleid. Mogelijk is dit voornamelijk een initieel effect. Tijdens het hoogwater van 2018 worden daarentegen goede verplaatsingssnelheden berekend (7-11 m/dag).

Het berekende waterstandsverhang is al in Niesten et al. (2017) beoordeeld aan de hand van een vergelijking van gemeten en berekende verhanglijnen. Het waterstandsverhang op het Pannerdensch Kanaal wordt door het model duidelijk te groot berekend, waardoor de absolute waterstanden op de Boven-Rijn ook te groot worden (orde 30 cm bij lage tot gemiddelde afvoeren). Het waterstandsverhang op de Boven-Rijn wordt echter goed voorspeld. Het model kan daarom gebruikt worden om de invloed van de suppletie op het verhang tussen meetstations Lobith en Pannerdensch Kanaal en daarmee de invloed op de waterstanden te schatten.

De berekende stroomsnelheden zijn al door Niesten et al. (2017) vergeleken met ADCP-metingen en vertoonden in de hoofdgeul van de Boven-Rijn goede overeenkomst. Het model wordt daarom geschikt bevonden voor een beoordeling van de bodemschuifspanningen in het kader van de analyse naar de invloed van de suppleties op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen. De details van die analyse worden beschreven in Becker et al. (2023).

In lijn met historische gegevens van geregistreerde baggervolumes vindt in de modelberekeningen nauwelijks vaargeulonderhoud plaats op de Boven-Rijn. Dit wordt in meer detail beschreven in Becker et al. (2023).

8.5 Aanbevelingen voor toekomstige suppleties op de Boven-Rijn en andere riviertakken

Bij de keuze van een geschikte locatie voor een suppletie moet er rekening worden gehouden met de verwachte reactie van de bodemligging. In het geval van een asymmetrische suppletie aan één kant van de rivier is dit een 2D-patroon van alternerende banken. De amplitudes daarvan zijn te relateren aan de dikte van de suppleties, waarbij de sedimentatie aan de overkant benedenstrooms van de suppletie van eenzelfde orde dikte is als de suppletie zelf, en de erosie naast en benedenstrooms van de suppletie minder sterk is. 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. De lengte van de suppletie bepaalt op welke locatie de sedimentatiezone van het 2D-patroon ontstaat en kan dus worden gebruikt om problemen met de sedimentatie te voorkomen.

De lokale dynamiek van 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.

Ook kunnen er in het toekomstige suppletiegebied grootschaligere trends in de ontwikkeling van de bodemligging aanwezig zijn die de geschiktheid van de suppletielocatie kunnen 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 veroorzaakt de vaste laag op de Boven-Rijn een vergelijkbaar 2D patroon van alternerende banken als bij asymmetrische suppletie. In dit geval betekent dat een bodemverhoging ter plaatse van het stortgebied en een erosietrend stroomafwaarts van de vaste laag; een gebied met fijn erosiegevoelig materiaal onder een grovere toplaag, waardoor diepe erosiekuilen zijn ontstaan.

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.

In geval van toekomstige vergelijkbare suppleties in de Boven Rijn kan ervan worden uitgegaan dat toepassing van een relatief grof mengsel (dat wil zeggen, een "grind suppletie"), waarin de zandfractie grotendeels ontbreekt, niet zal leiden tot een vergroving van de toplaag van de bedding doordat sorteringsprocessen in de bedding zorgen voor een herstel van de oorspronkelijke samenstelling (o.a. in combinatie met aanbod van zand van bovenstrooms). Dit is echter vooral van toepassing voor suppleties met een interval, volume en locatie dat vergelijkbaar is met de suppleties in 2016 en 2019. Het grove sediment zal echter wel worden opgenomen in de bedding, en zal dan bij grotere volumes beschikbaar komen voor sedimenttransporten. Daarentegen betekent dit dan ook, dat voor een gewenste vergroving van de toplaag er een aanzienlijke hoeveelheid grof sediment moet worden gesuppleerd op deze locatie voordat het leidt tot een zichtbare vergroving (zichtbaar in

de toplaag die wordt bemonsterd). In geval van een suppletie met fijn sediment (een “zand suppletie”) op dit traject wordt verwacht dat de invloed op de bedding duidelijker waarneembaar zal zijn, omdat de verticale sorteringsprocessen van dit mobiele materiaal in de ‘actieve laag’ niet zullen leiden tot vergroving.

Voorschrijven van een bandbreedte rond de gemiddelde zeefkromme voor de samenstelling van een suppletie kan leiden tot een structureel te grof of te fijn mengsel, dat past bij de meest grove of meest fijne monsters in de omgeving. Voor een suppletie voor bodemstabilisatie door aanvullen van een tekort aan sedimenttransport-aanvoer, zou een mengsel moeten worden gebruikt dat aansluit bij de samenstelling van het bodemtransport. Dat betekent dat bij het voorschrijven van suppletie-materiaal minimaal zowel het percentage zand, als de gemiddelde diameter van de zandfractie en van de grindfractie moet worden gespecificeerd (met een bandbreedte die nog proefondervindelijk moet worden ontwikkeld). Daarbij moet worden uitgegaan van een gemiddelde samenstelling van meerdere monsters op het suppletietraject.

8.6 Aanbevelingen voor verdere kennisontwikkeling over suppleties, ook op andere riviertakken

Om meer inzicht te krijgen in de sorteringsprocessen die ertoe leiden dat het relatief grove suppletiemateriaal niet of maar zeer korte tijd zichtbaar is in de bodemmonsters, wordt aanbevolen ter plaatse van de suppleties op de Boven-Rijn en benedenstreams van de suppleties een aantal boringen van de bodem uit te voeren. Daarmee kan de verticale structuur van de actieve laag worden bestudeerd, wat met de normale bemonstering niet mogelijk is. Als er in de toekomst suppleties op de meer benedenstroomse Rijntakken gepland worden, zoals de Waal, wordt aanbevolen om deze weer uitgebreid te monitoren. 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 sedimentgolven) kan bij fijner sediment afwijken. Vooral de regelmatige bodempeilingen in het invloedgebied hebben voor 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 wordt aanbevolen om in elk geval in het eerste jaar vaker te peilen, om te kunnen controleren of er initieel en daarna ook bij lagere afvoeren een invloed van de suppletie te zien is. De frequentie van de peilingen in het vervolg kan daarna worden afgestemd op de inzichten uit het eerste jaar.

9 Literatuurverwijzingen

- Becker, A. (2017): Advies uitvoering en monitoring 2e suppletie Bovenrijn. Deltares-rapport 11200877-000-ZWS-0003, oktober 2017.
- Becker, A. (2020): Tweede suppletie Boven-Rijn: tussenevaluatie hoogwater 2020. Deltares-memo 11205234-010-ZWS-0001, 17 december 2020.
- Becker, A. (2022): Tweede suppletie Boven-Rijn: tussenevaluatie 2021. Deltares-memo 11207908-000-ZWS-0001, 27 januari 2022.
- Becker, A. (2021). Slim suppleren Boven-Waal. Deltares-rapport 11206792-014-ZWS-0001, 21 december 2021.
- Becker, A., E. Mosselman, R. van der Wijk, R. van der Mark (2023): Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn. Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties. Deltares-rapport, nog niet gepubliceerd.
- Blom, A. (2003): A vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes. PhD thesis, Universiteit Twente, Nederland.
- Bokkes, B.J. en W. Peters (2015): Klanteisenspecificatie (KES) 2.0: Suppletie & Monitoring Project: Sedimentsuppletie Boven-Rijn Programma Groot Variabel Onderhoud Nat Dienst Oost-Nederland. 24 februari 2015.
- De Jong, J. (2017): Beoordeling en specificatie kwaliteit foto's rivierbed tbv beeld-interpretatie. Deltares-memo 1210650-000-ZWS-0019, 27 februari 2017.
- De Jong, J. en W. Ottevanger (2020): Analyse van de bodemhoogte Rijntakken van 1999 tot 2018. Deltares-memo 11202744-003-ZWS-0001, 2 april 2020.
- Gölz, E., Theis, H., Trompeter, U. (2006) Tracerversuch Iffezheim. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG) and Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg (WSA). Report BFG-1530. Koblenz/Freiburg, Germany.
- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001a): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensche Kop: Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport NITG 01-166-B, Nov. 2001.
- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001b): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Bovenrijn / Niederrhein: Interpretatie van meetresultaten. Eindrapport NITG 01-167-B, Nov. 2001.
- Gruijters, S.H.L.L (2003) Kartering Ondergrond IJsselkop: Fase 3: Eindrapport. TNO-rapport NITG 03-120-B. Oktober 2003. Huismans, Y. (2014): Sedimentklassificatie met behulp van beeldherkenning. Deltares-memo 1207770-000-ZWS-0002, 6 februari 2014.
- IJmker, E. S. Quartel, A. Sieben, J. Wensink, W. Peters (2018): Advies 2de Sedimentsuppletie Boven-Rijn 2019. Memo RWS Oost-Nederland, 9 januari 2018.
- Jans, L. (2018) Toelichting WaterdiepteKaarten Rijntakken RWS ON; versie 2018.1. Zie ook: https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_WaterdiepteKaarten_Rijntakken.Webviewer

- Kleinbans, M. (2005) Dune-phase fluvial transport and deposition model of gravelly sand. *Fluvial Sedimentology VII. Spec. Publs int. Ass. Sediment.* (2005), 35, 75–97.
- 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
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat Oost-Nederland (2013): Verklaring van overdracht Variabel Onderhoud Nat. Eindconcept van 1 augustus 2013.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat Programma's, Projecten en Onderhoud (2018): Vraagspecificatie Eisen. Het engineeren en uitvoeren van een sedimentsuppletie in de Boven-Rijn in 2019 Versie 1.0, 22-05-2018.
- Niessen, I., W. Ottevanger, A. Becker (2017): Riviersuppleties in de Rijntakken. Conclusies 1e suppletie Boven-Rijn en advies voortzetting monitoring. Deltares-rapport 11200877-000-ZWS-0005, september 2017.
- Paarberg, A.J., Omer, A.Y.A., Yossef, M.F.M. (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal. Delft3D simulations. HKV-rapport PR4153.10; Deltares-rapport 11204644. September 2021.
- Rubin, D.M. en C.L. Carter (2006): *Cross-Bedding, Bedforms, and Paleocurrents. Concepts in Sedimentology and Paleontology*, No. 1, 2nd Edition. SEPM • society for sedimentary geology.
- RWS Dienst Oost-Nederland (2015): Klanteisenspecificatie (KES) 2.0: Suppletie & Monitoring. Project: Sedimentsuppletie Boven-Rijn. 24 februari 2015.
- Sambrook Smith, G.H., A.P. Nicholas, R.I. Ferguson (1997): Measuring and defining bimodal sediments: Problems and implications. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 5, p.1179-1185, May 1997.
- Sieben, A. (2016): Bepaling waterstandseffect suppletie Boven-Rijn, Arjan Sieben, RWS-WVL. d.d. 03-10-2016.
- Sieben, A. (2017): Overzicht ten behoeve van morfodynamiek Boven-Rijn, project Suppletie Boven-Rijn, Arjan Sieben, RWS-WVL, d.d.09-03-2017.
- Sieben, A. (2018): Kort overzicht bodemveranderingen suppletiegebied, periode Nov 2017-Jan 2018. Memo, 8/6/2018.
- Sieben, A. (2013): Monitoring sediment nourishment Boven-Rijn. Powerpoint presentatie.
- Sieben, A. (2009): Sediment management in the Dutch Rhine Branches. *Journal of River Basin Management*, Vol. 7 No. 1, 2009.
- Sieben, A. (2022): e-mail communicatie, d.d. 16/8/2022
- Sieben, A. (2013): Informatiebehoefte en raming monitoring sedimentsuppletie Bovenrijn. Memo Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. 11 april 2013.
- Sloff, K. (2019): Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Deltares rapport 11203738-005, December 2019.

Sloff, K. (2022) Verkenning invloed scheepvaart op morfologie en impact daarvan op modeltoepassingen.
Deltares rapport 11206792-013, KPP Rivierkunde, April 2022.

Tuijnder, A. (2018): Analyse hoogwaterveiligheid sedimentsuppletie Boven-Rijn. Eindrapport. Arcadis, 15 juni 2018.

Waterloopkundig Laboratorium (1965): Geleidelijke sluiting VI, Invloed vorm en gradering op de stabiliteit van stortsteen.

A Monitoringsplan

B Beschikbare gegevens

B.1 Bodempeilingen

Tabel 7 Beschikbare bodempeilingen (momenten). Alleen de jaarlijkse peilingen en de peilingen in het kader van de suppletiepijot zijn weergegeven, niet de beheerpeilingen, omdat deze niet zijn gebruikt in deze studie.

| jaar | week | | jaar | week | | jaar | week |
|------|------|--|------|------|--|------|------|
| 1999 | 23 | | 2016 | 31 | | 2019 | 21 |
| 2000 | 23 | | 2016 | 40 | | 2019 | 24 |
| 2001 | 49 | | 2016 | 43 | | 2019 | 28 |
| 2002 | 49 | | 2016 | 43 | | 2019 | 32 |
| 2003 | 49 | | 2016 | 48 | | 2019 | 36 |
| 2004 | 50 | | 2017 | 2 | | 2019 | 38 |
| 2005 | 49 | | 2017 | 6 | | 2019 | 44 |
| 2006 | 49 | | 2017 | 9 | | 2019 | 44 |
| 2007 | 49 | | 2017 | 14 | | 2019 | 47 |
| 2009 | 50 | | 2017 | 17 | | 2019 | 50 |
| 2011 | 23 | | 2017 | 19 | | 2020 | 5 |
| 2012 | 19 | | 2017 | 23 | | 2020 | 13 |
| 2013 | 12 | | 2017 | 27 | | 2020 | 14 |
| 2013 | 41 | | 2017 | 30 | | 2020 | 16 |
| 2014 | 24 | | 2017 | 38 | | 2020 | 20 |
| 2014 | 41 | | 2017 | 39 | | 2020 | 41 |
| 2015 | 12 | | 2018 | 8 | | 2021 | 10 |
| 2015 | 45 | | 2018 | 16 | | 2021 | 12 |
| 2016 | 9 | | 2018 | 24 | | 2021 | 18 |
| 2016 | 14 | | 2018 | 48 | | 2021 | 40 |
| 2016 | 19 | | 2018 | 40 | | 2021 | 41 |
| 2016 | 24 | | 2019 | 12 | | | |
| 2016 | 27 | | 2019 | 17 | | | |
| 2016 | 29 | | 2019 | 21 | | | |

C Analyse radiometrische metingen (Koolstra, 2020b)

In Koolstra (2020b) zijn de radiometrische metingen (Medusa) in samenhang met de bodemveranderingen geanalyseerd. Tabel 8 laat zien welke perioden daarbij zijn beschouwd. Tabel 9 beschrijft het resultaat van de analyse. De figuren ter onderbouwing van de analyse volgen in Tabel 10. Voor details wordt verwezen naar het rapport van Koolstra (2020b).

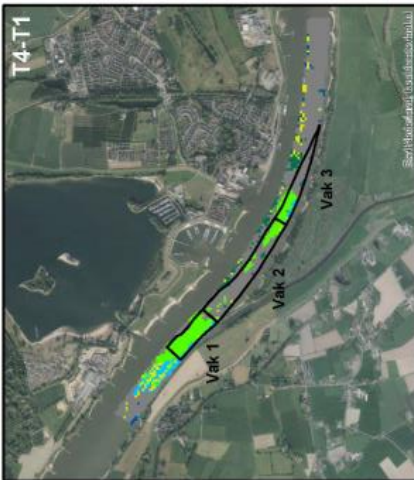
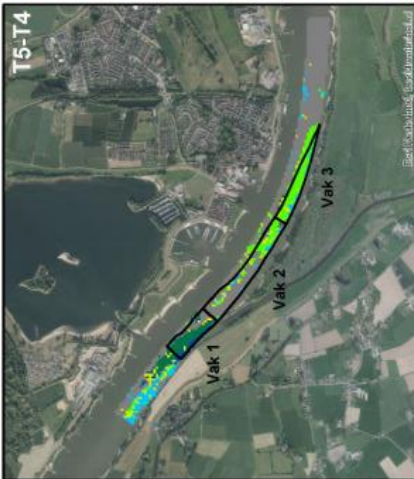
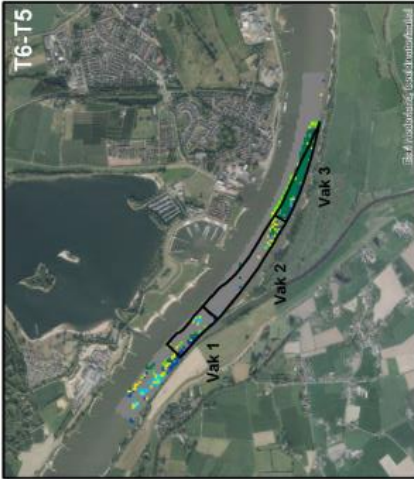
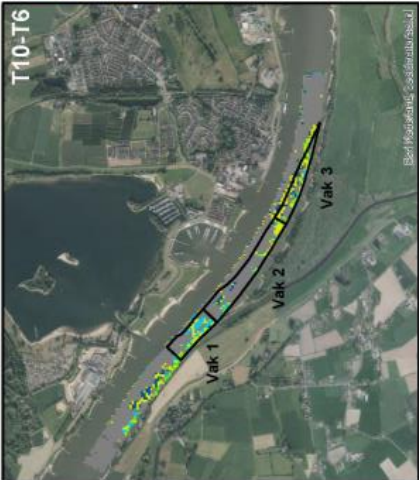
Tabel 8 Onderzochte tijdsperioden met beschrijving (uit Koolstra, 2020b).

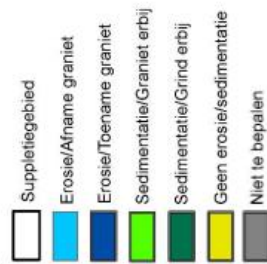
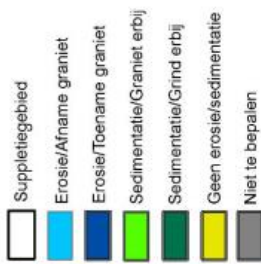
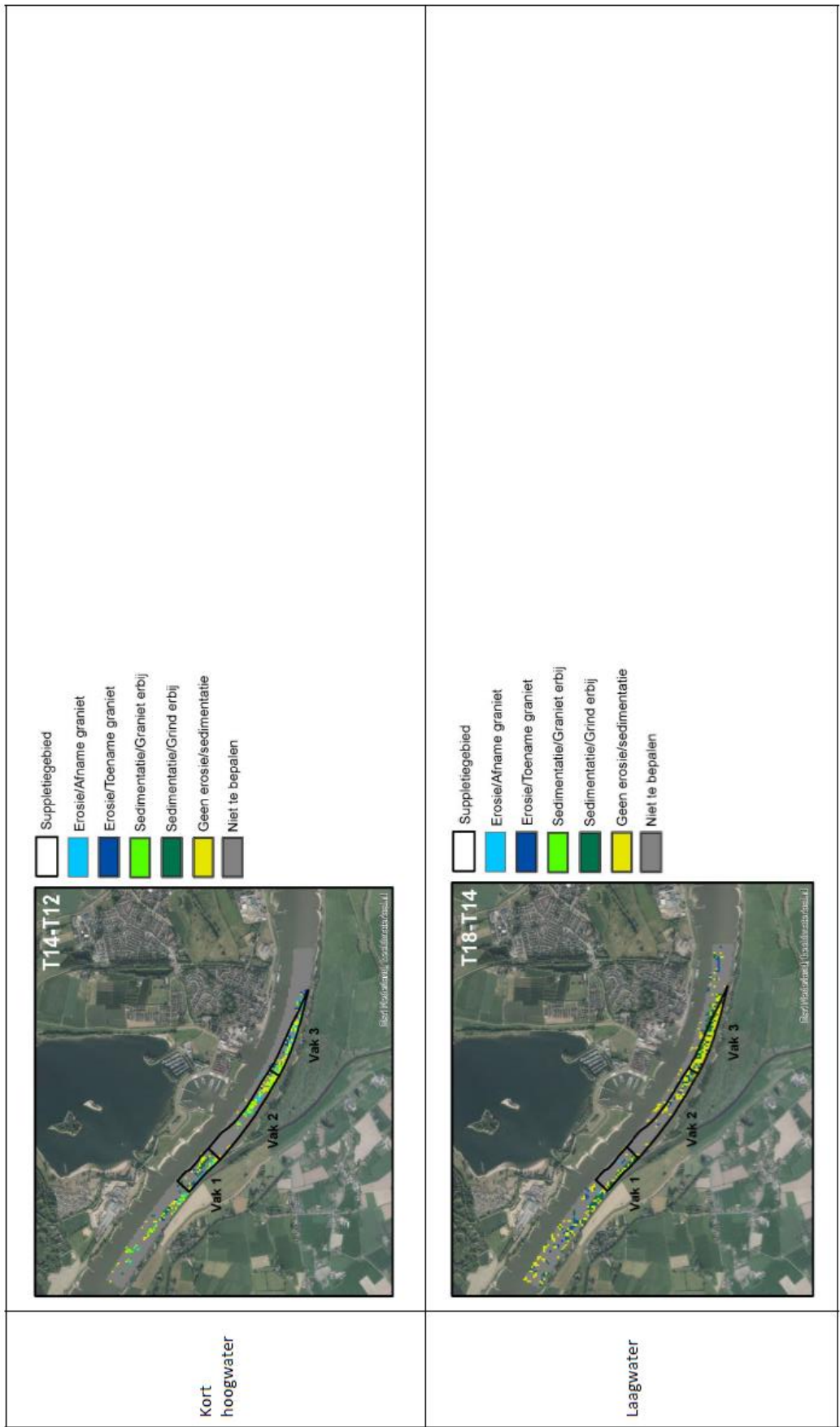
| Meting | Aantal dagen tussen metingen | Periode |
|---------|------------------------------|--|
| T4-T1 | 89 | Aanleg suppletie (onderbroken door kort hoogwater) |
| T5-T4 | 28 | |
| T6-T5 | 28 | |
| T10-T6 | 133 | Laagwater |
| T14-T12 | 56 | Kort hoogwater |
| T18-T14 | 203 | Laagwater |
| T19-T18 | 98 | Hoogwater |
| T20-T19 | 148 | Afnemend water |

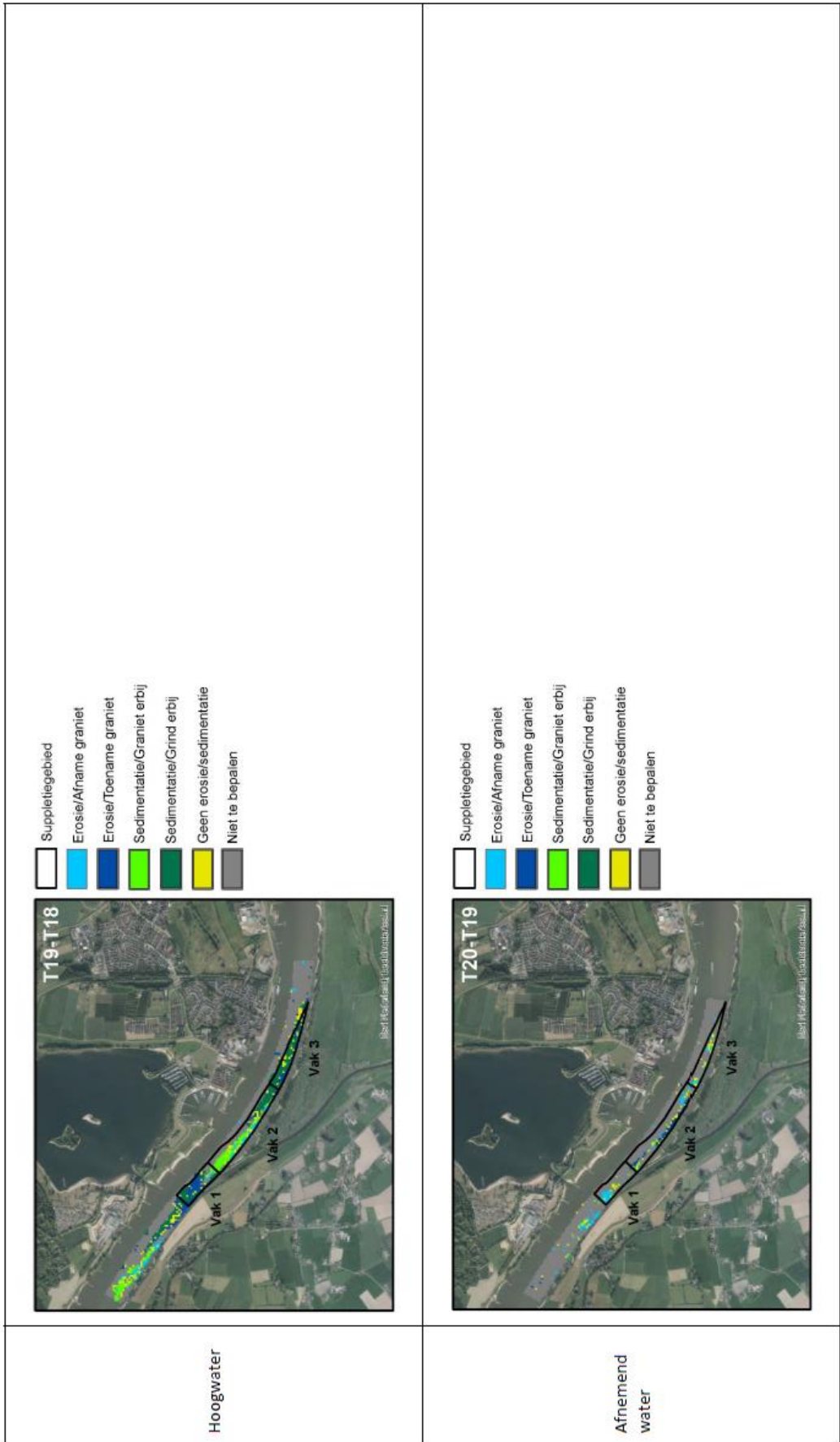
Tabel 9 Beschrijving van de uitgelichte erosie/sedimentatie kaarten van de kenmerkende tijdsperiodes (uit Koolstra, 2020b).

| Periode | Meting | Beschrijving |
|---------------------|--------------------|---|
| Aanleg suppletie | T4-T1 | Een deel van het graniet uit vak 1 beweegt stroomafwaarts. In vak 3 is duidelijk te zien tot waar het graniet is gesuppleerd i.v.m. een korte onderbreking van de suppletie door hoogwater. Een deel van het graniet uit vak 3 verplaatst zich naar vak 2. De erosie/afname graniet (lichtblauw) voorbij vak 1 wordt met name veroorzaakt doordat de waarden van de bodempeilingen zich net iets boven de grens van de onzekerheidsmarge bevinden. |
| | T5-T4 ² | Grind uit vak 2 verplaatst zich stroomafwaarts naar vak 1 en daar voorbij, waar vervolgens het graniet afneemt door erosie, en vermenging van grind en graniet optreedt. Graniet uit vak 3 verplaatst zich stroomafwaarts naar vak 2. |
| | T6-T5 ² | In vak 1, en daar voorbij, is er zowel enige toename als een afname van graniet te zien als gevolg van erosie, en ontstaat er enige vermenging van graniet en grind. Vak 3 wordt helemaal gevuld met een nieuwe toevloed van grind. Het grind is hierbij over een lengte van 750 m (in 28 dagen is dat 27 m/dag) verplaatst. |
| Laagwater | T10-T6 | In vak 1 is enige afname van graniet als gevolg van erosie te zien. Stroomafwaarts van vak 1 ontstaat enige sedimentatie van zowel graniet als grind, maar ook vermenging van graniet en grind. In vak 3, en een deel van vak 2, ontstaat vermenging van graniet en grind. |
| Kort hoogwater | T14-T12 | Door een korte periode van hoogwater ontstaat er enige vermenging van graniet en grind in vak 3, een deel van vak 2, en een klein deel van vak 1 en daar voorbij. Een klein deel van het graniet uit vak 3 verplaatst zich naar vak 2. In vak 1 ontstaat enige sedimentatie van grind afkomstig uit vak 2. Stroomafwaarts van vak 1 sedimenteert graniet in het ondiepe deel van de rivier. |
| Laagwater | T18-T14 | In het hele traject, maar met name in vak 3, ontstaat er vermenging van graniet en grind. |
| Hoogwater | T19-T18 | Door hoogwater is al 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. Het natuurlijke grind in vak 3 verplaatst met een snelheid van 11 m/dag over deze periode (1100 m/98 dg=11 m/dag). Vak 3-graniet verplaatst met 7 m/dag (700 m/98 dg = 7 m/dag) in vak 2 (hierbij is de T5-T4 contour als uitgangspunt genomen). |
| Afnemend water | T20-T19 | In vak 1, en daar voorbij, is enige afname van graniet als gevolg van erosie te zien. In vak 2 is een kleine toename van graniet te zien als gevolg van erosie van een laag grind boven het graniet, en door vermenging van graniet en grind. |

Tabel 10 Overzicht van de uitgelichte erosie/sedimentatie kaarten van de kenmerkende tijdsperiodes. Bodemveranderingen zonder verandering in granietfractie worden hier niet getoond (uit Koolstra, 2020b).

| Periode | Erosie/Sedimentatie van graniet en grind. |
|-----------------------------|---|
| <p>Aanleg suppletie</p> | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>T4-T1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>T5-T4</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>T6-T5</p> </div> </div> <p>Tussen T1 en T4 is in vak 1 en voor een deel in vak 3 graniet gesuppleerd. Tussen T5 en T4 is in nog voor een deel in vak 3 graniet gesuppleerd. De "sedimentatie" is hier het gevolg van suppleren.</p> |
| <p>Laagwater</p> | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="938 1227 1358 1704">  <p>T10-T6</p> </div> <div data-bbox="938 981 1182 1218"> <ul style="list-style-type: none"> Suppletiegebied Erosie/Afname graniet Erosie/Toename graniet Sedimentatie/Grانيت erbij Sedimentatie/Grind erbij Geen erosie/sedimentatie Niet te bepalen </div> </div> |

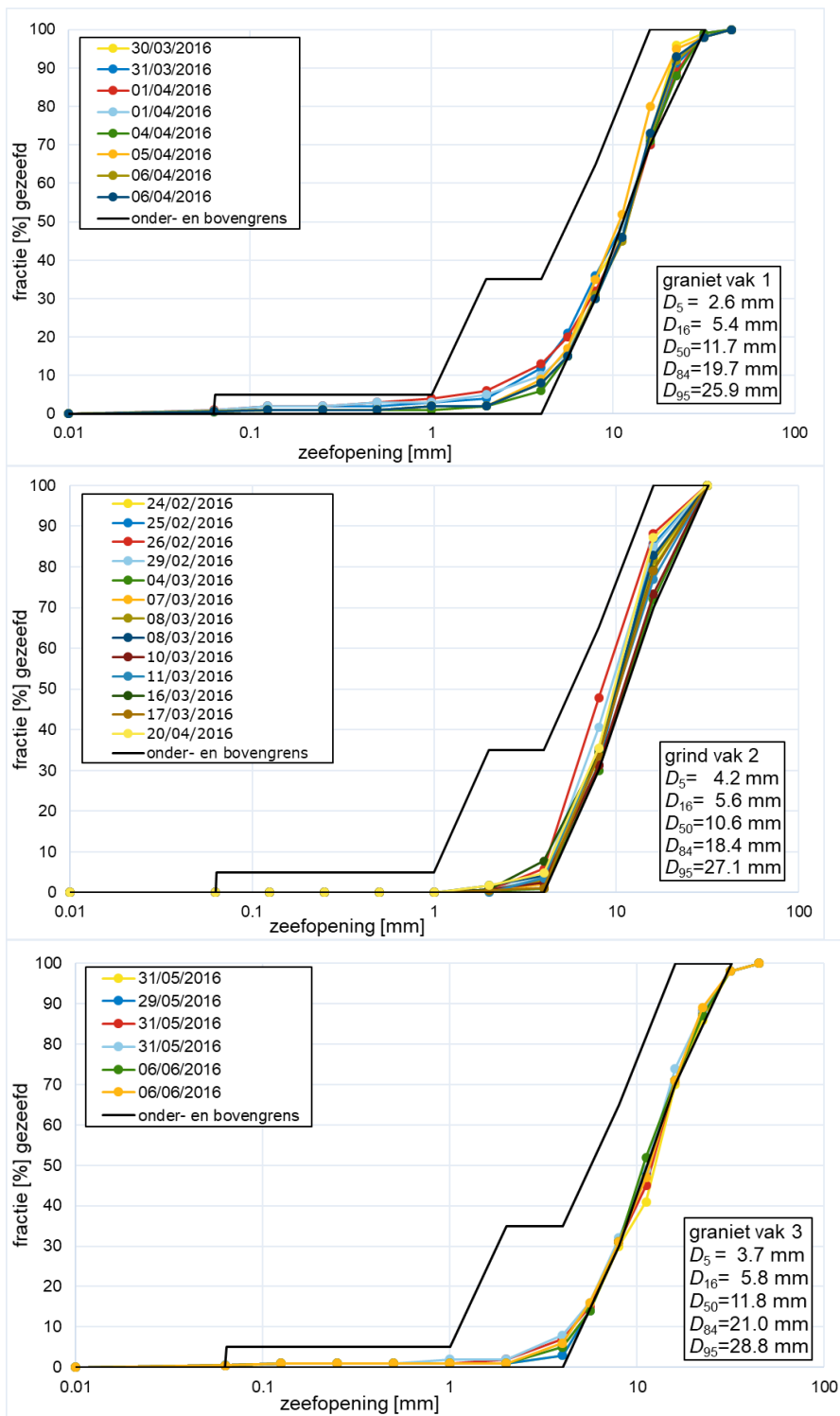


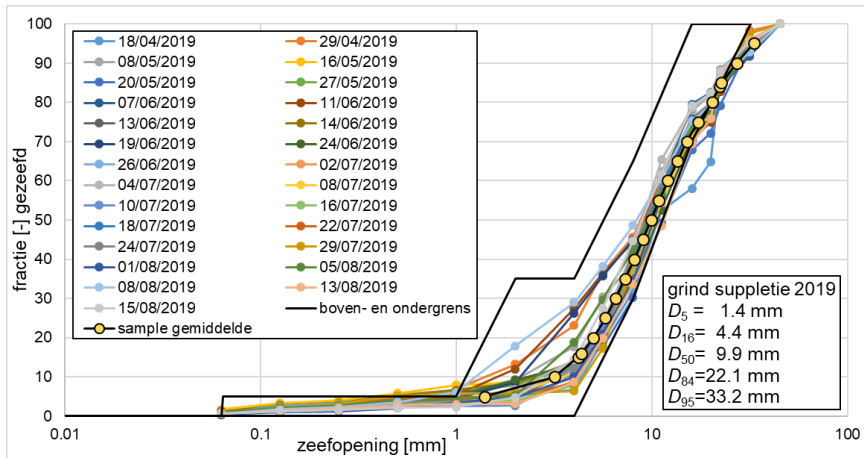


D Bodemsamenstelling

D.1 Figuren samenstelling van de suppleties (bakmonsters)

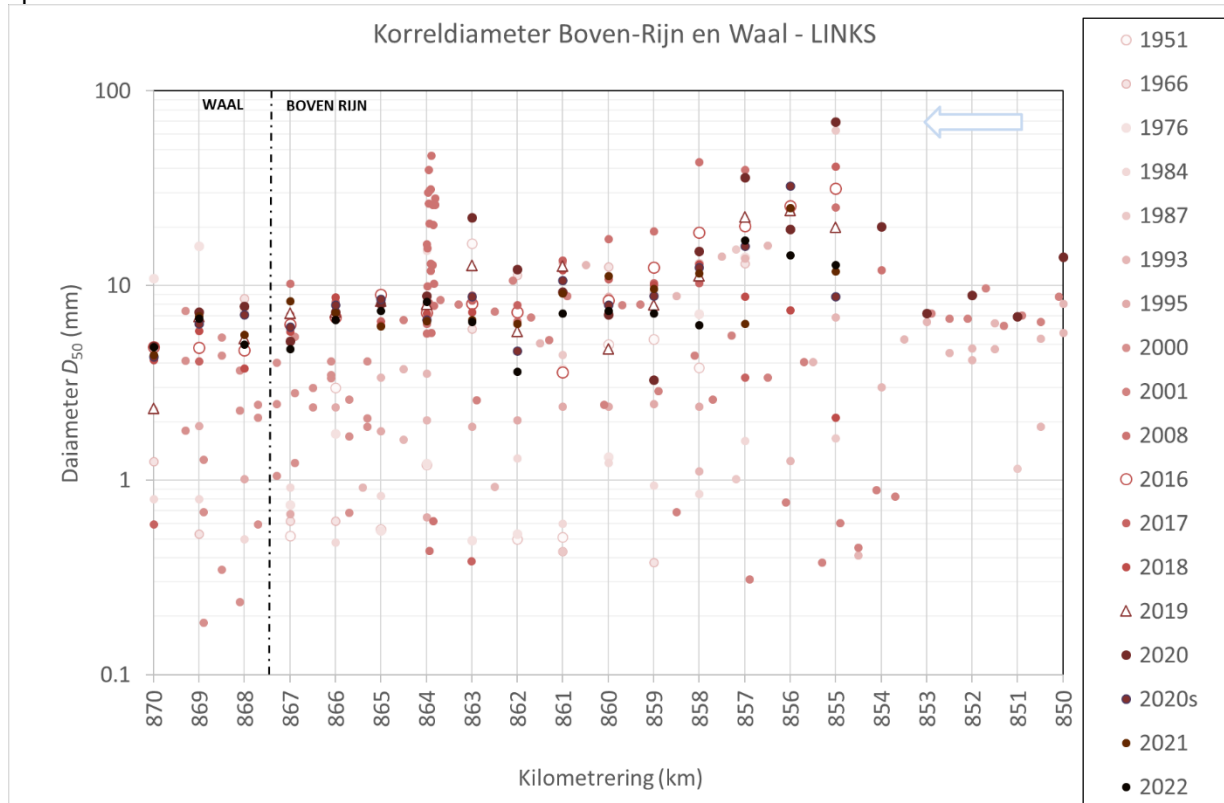
D.1.1 1^e suppletie 2016



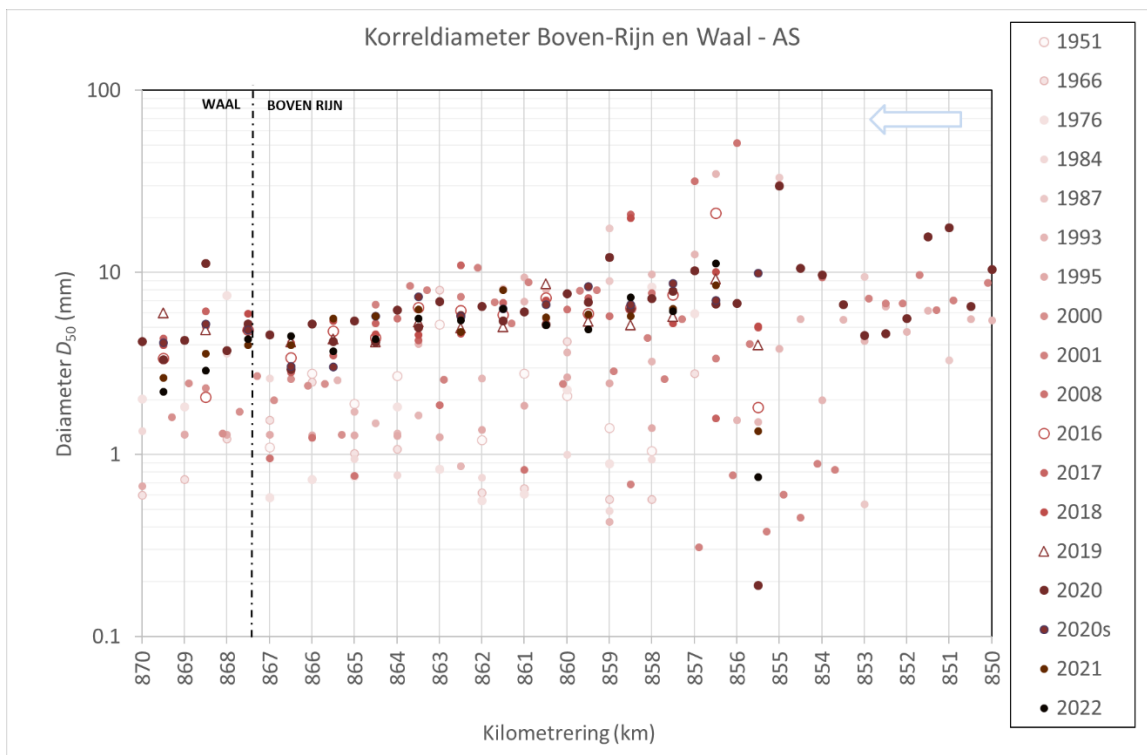


D.2 Figuren bodemsamenstelling

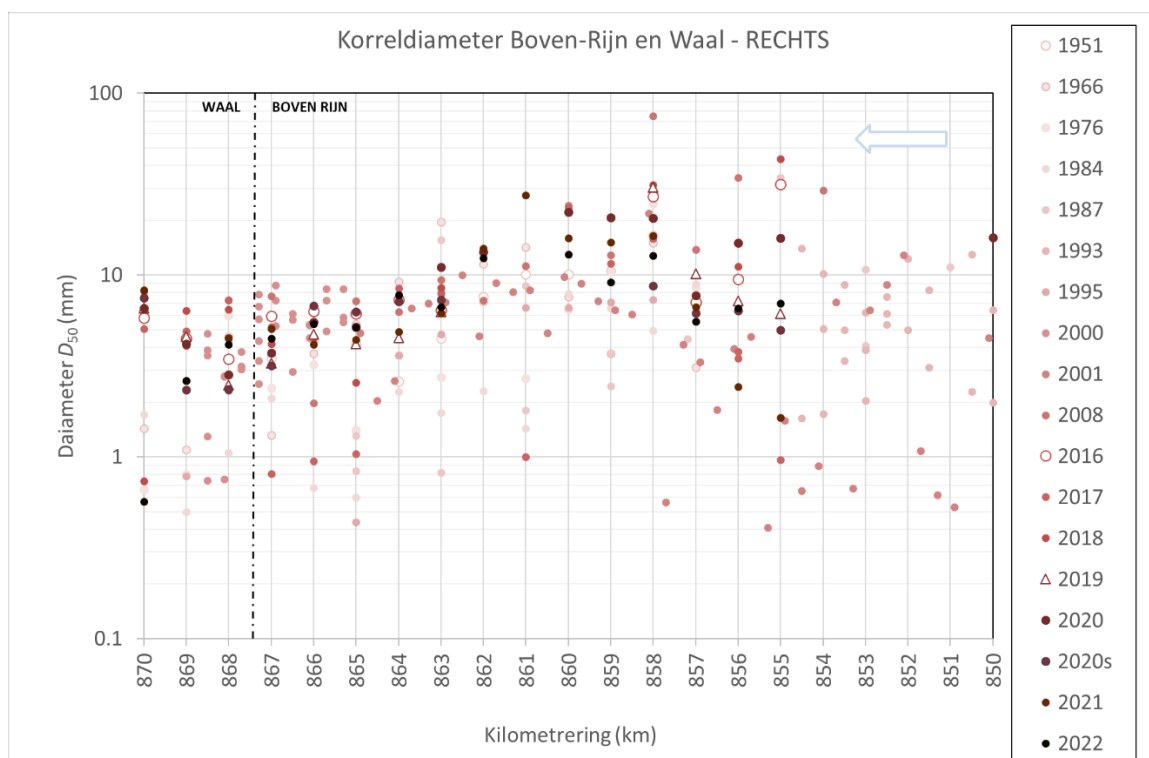
De volgende figuren tonen een historisch overzicht van alle beschikbare mediane korrel diameters voor de periode 1951 tot 2022 voor de Boven Rijn. De variaties in de tijd zijn aanzienlijk. Daarbij moet worden opgemerkt dat de verticale schaal van de figuren (de diameter) logaritmisch is. Daardoor lijken de variaties in de grove diameters minder groot dan in werkelijkheid. De diameters in de periode 2016-2022 liggen over het algemeen wat hoger dan in de periode ervoor. Dit duidt op een vergroving van de bedding ten opzichte van waarnemingen voor het jaar 2000. Het is onzeker in welke mate lokale veranderingen (insnijding, verandering condities), invloeden van bovenstrooms (vergroving Niederrhein), meetmethoden (gebruik van verschillende happers) of andere processen hier een rol bij spelen.



Figuur 110 Mediane korrel diameter links van de as, periode 1951 – 2022 (stroming is van rechts naar links, verticale as is logaritmisch).

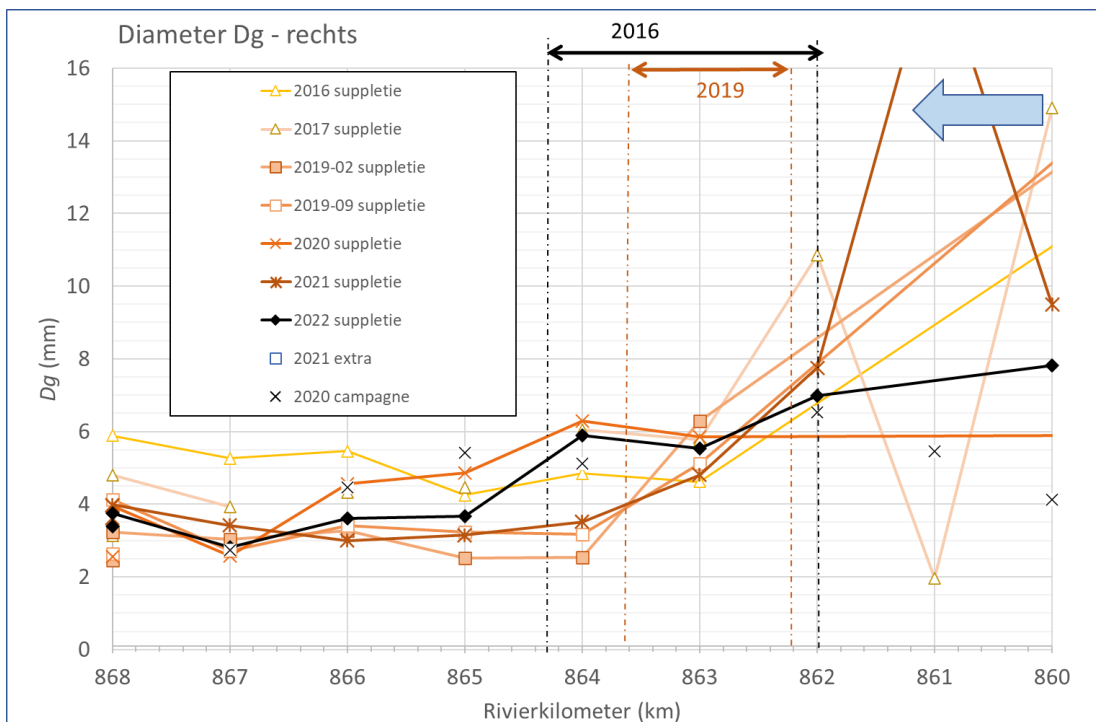


Figuur 111 Mediane korrel diameter op de rivieras, periode 1951 – 2022 (stroming is van rechts naar links, verticale as is logaritmisch).

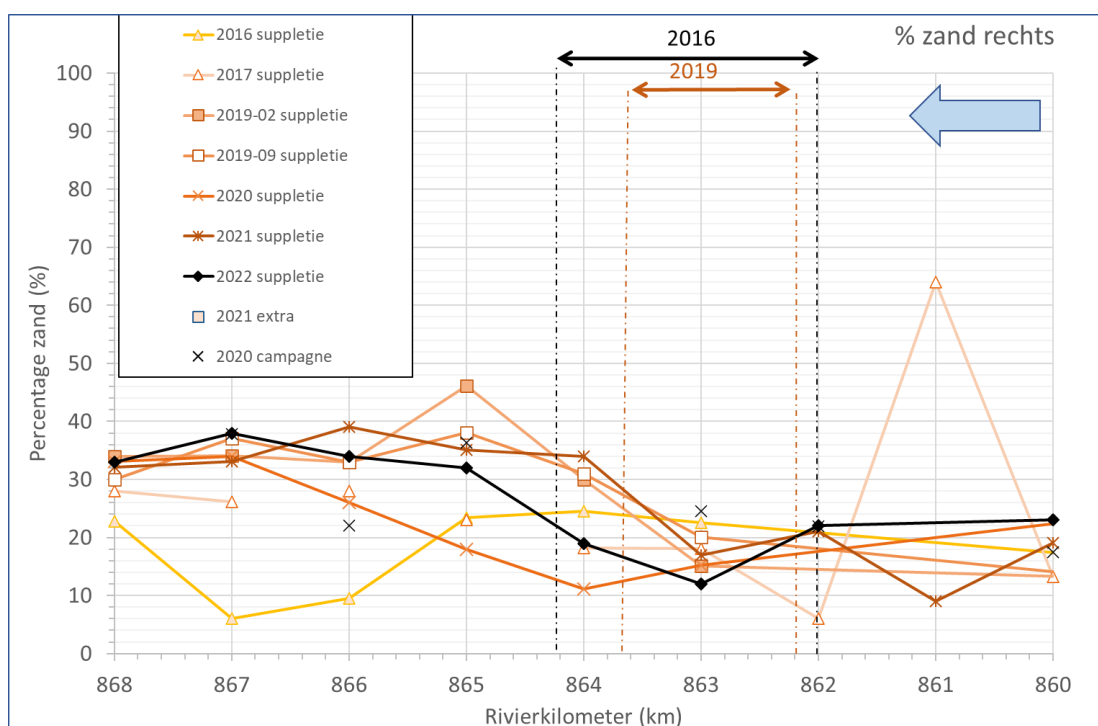


Figuur 112 Mediane korrel diameter rechts van rivieras, periode 1951 – 2022 (stroming is van rechts naar links, verticale as is logaritmisch).

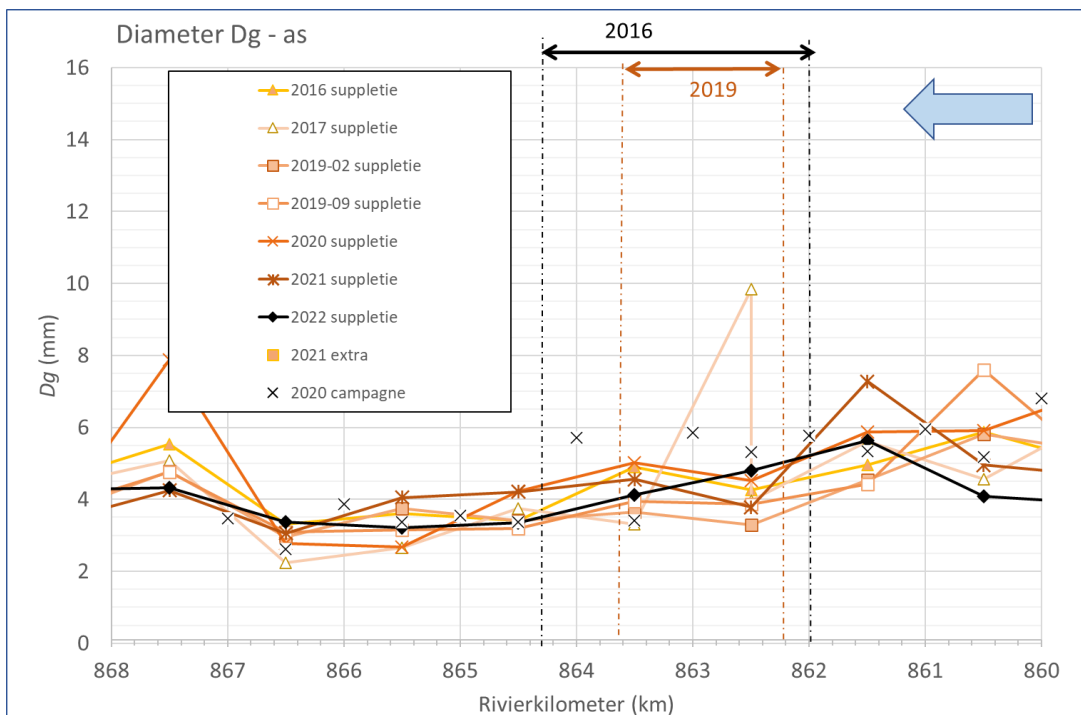
De volgende figuren tonen de gemiddelde diameter D_g en de zandpercentages van de bedding rond de suppletie locatie. De figuren van de linkerzijde zijn gepresenteerd in de hoofdttekst.



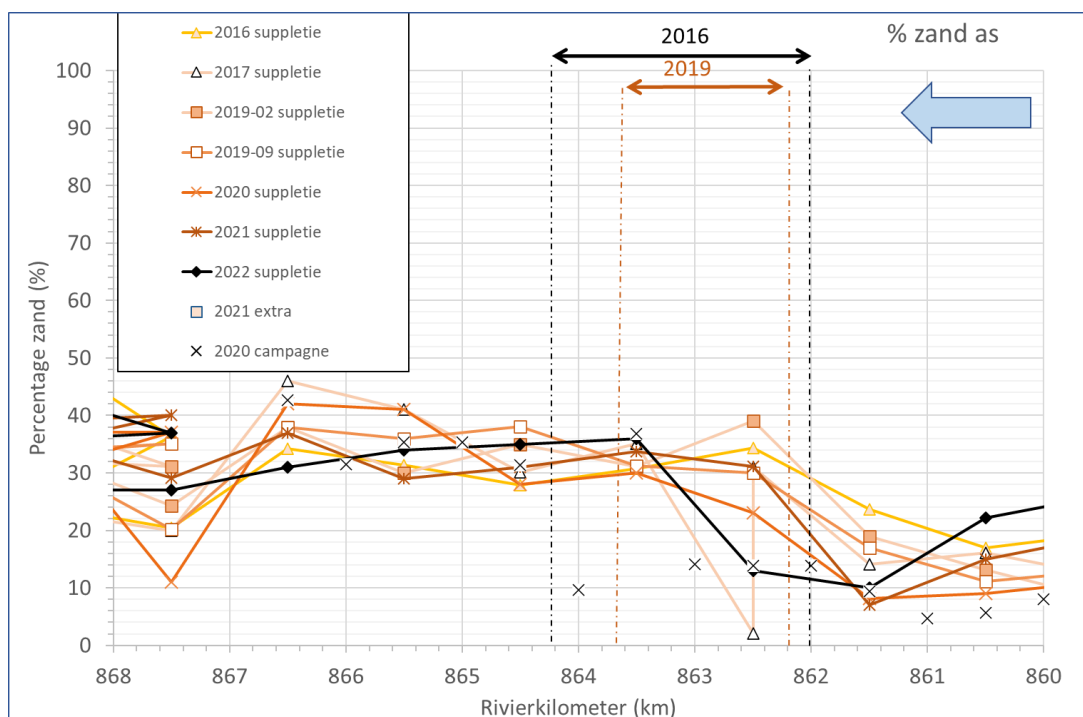
Figuur 113 Diameter Dg op 70 m rechts van de rivieras. Let op: de monsters op km 861 zijn ter hoogte van de vaste laag Spijk.



Figuur 114 Zandfractie op 70 m rechts van de rivieras. Let op: de monsters op km 861 zijn ter hoogte van de vaste laag Spijk.

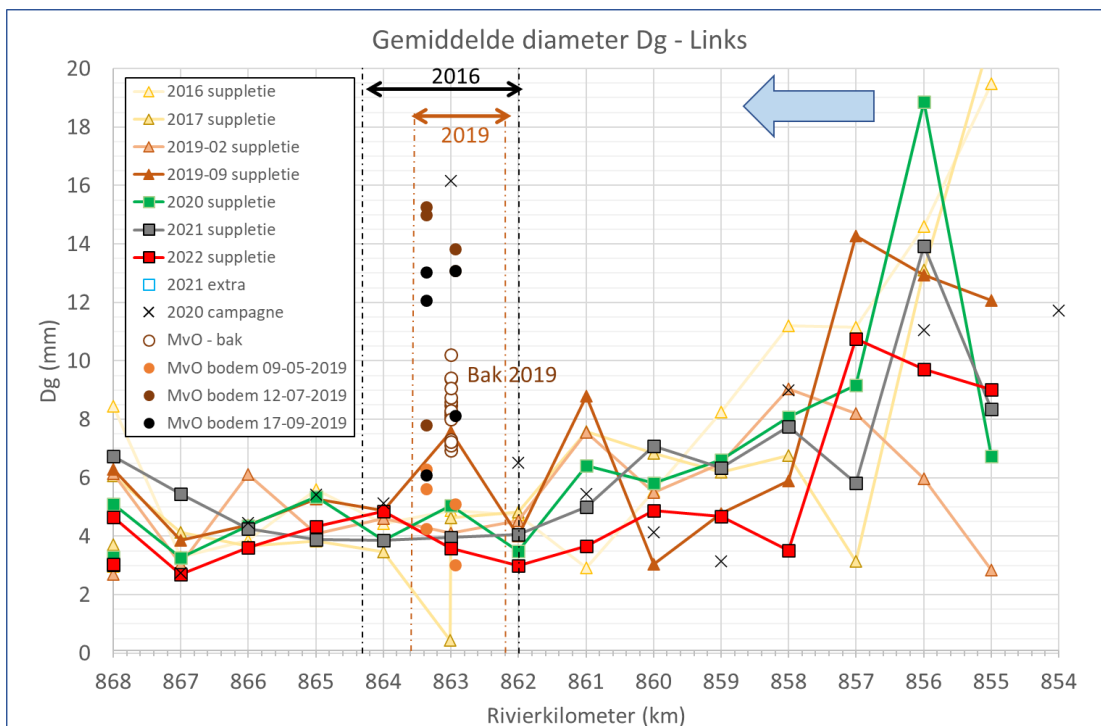


Figuur 115 Diameter Dg op de rivieras.

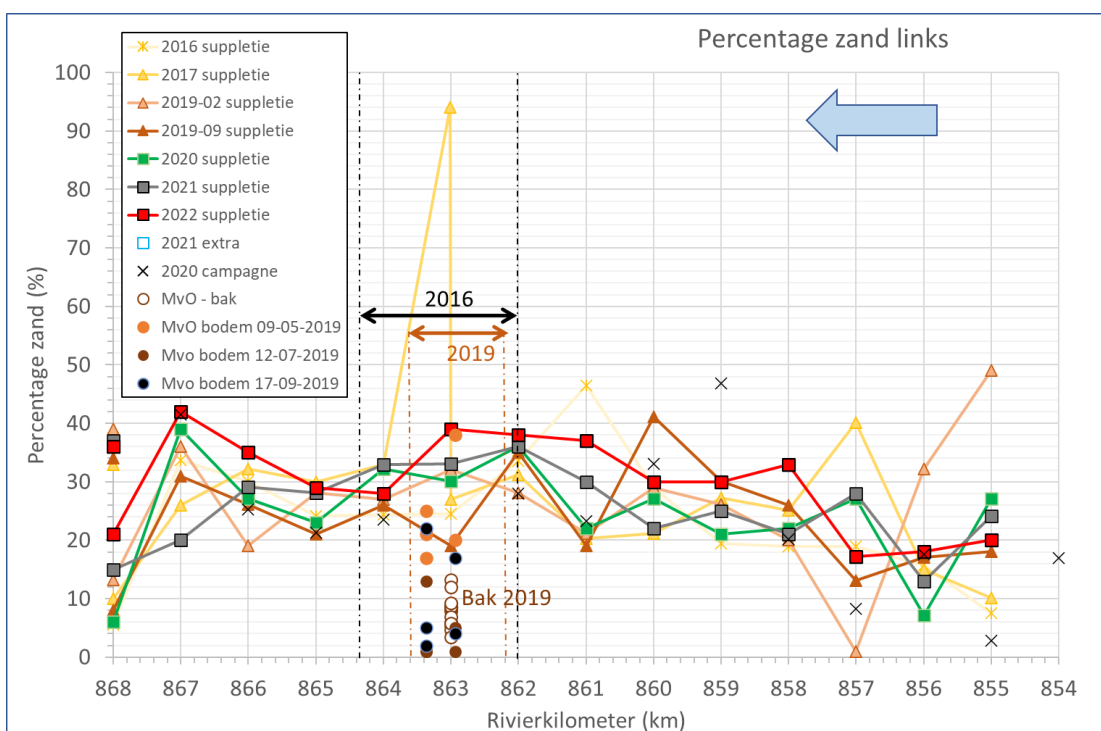


Figuur 116 Zandfractie op de rivieras.

Onderstaande figuren tonen de gemiddelde diameters en zandfractie langs de linkerzijde, met de suppletielocatie, en het traject stroomopwaarts (vanaf km 855).



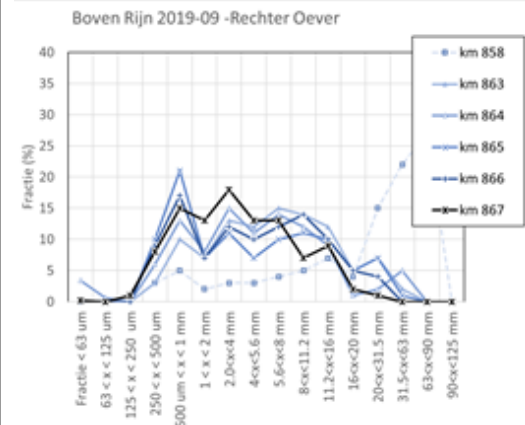
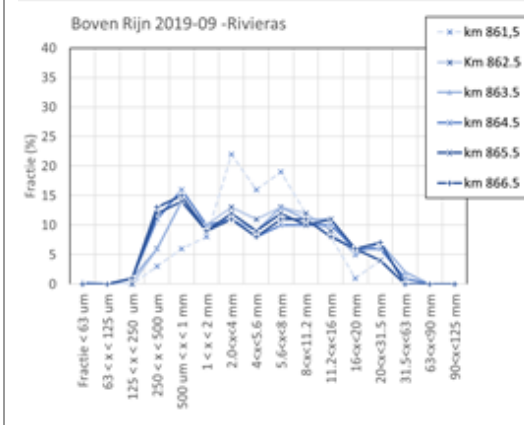
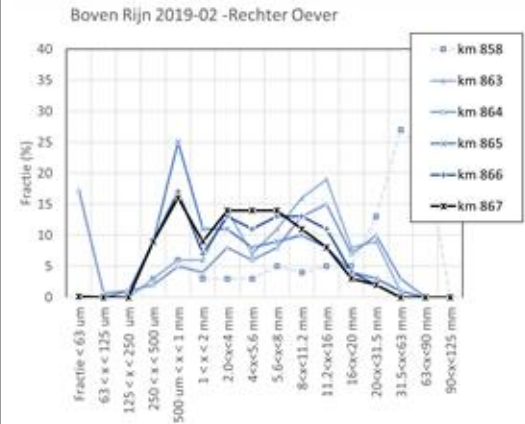
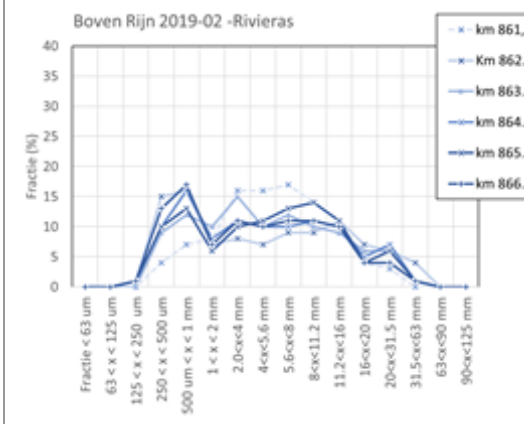
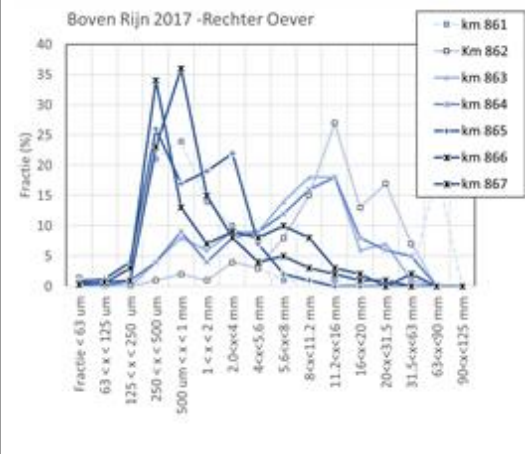
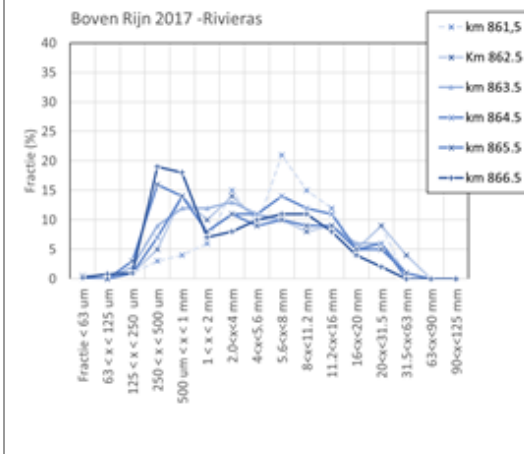
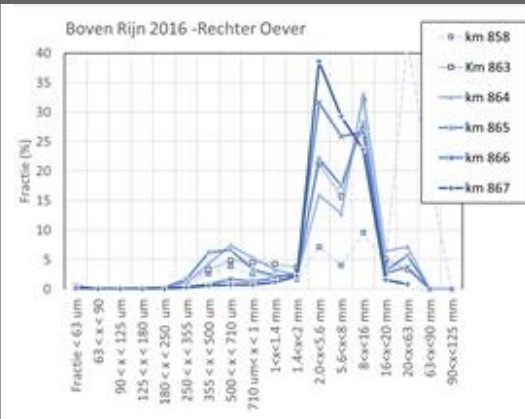
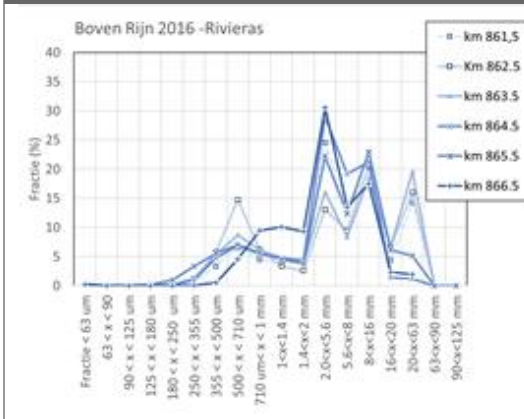
Figuur 117 Diameter Dg op 70 m links van de rivieras, inclusief stroomopwaarts traject (en met de bemonsteringen voor de suppletie 2019).



Figuur 118 Zandfractie links van de rivieras, inclusief stroomopwaarts traject.

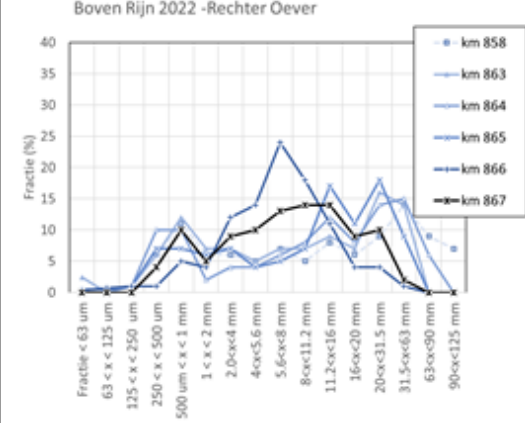
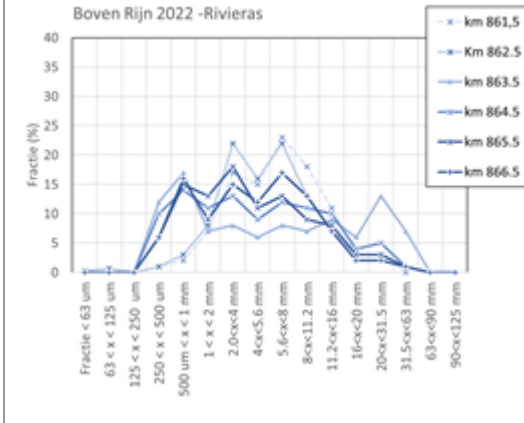
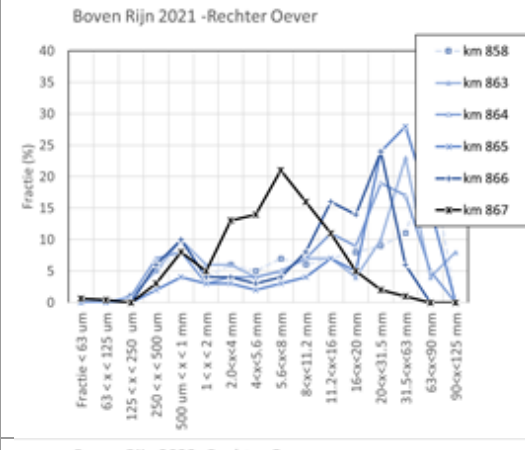
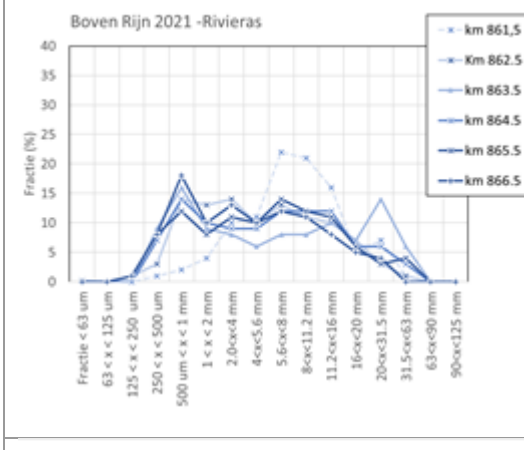
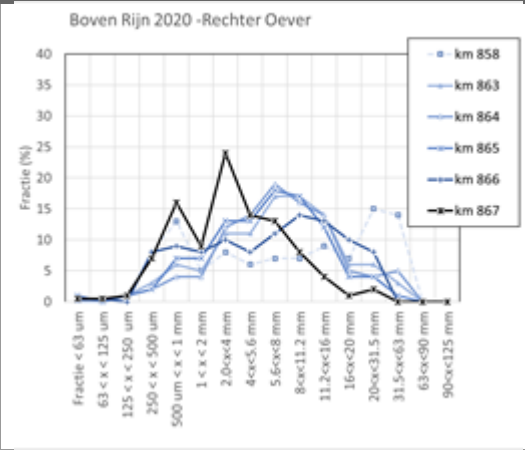
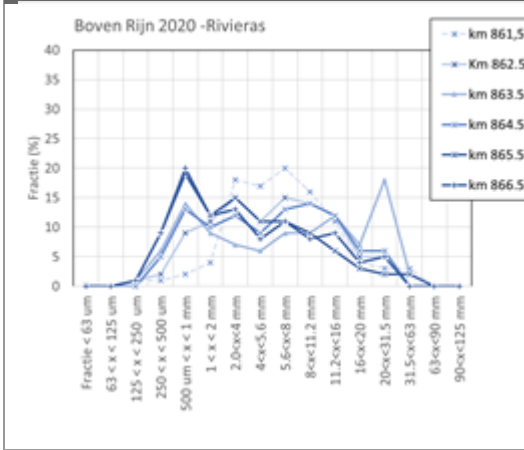
Korrelverdeling rivieras

Korrelverdeling rechter oever

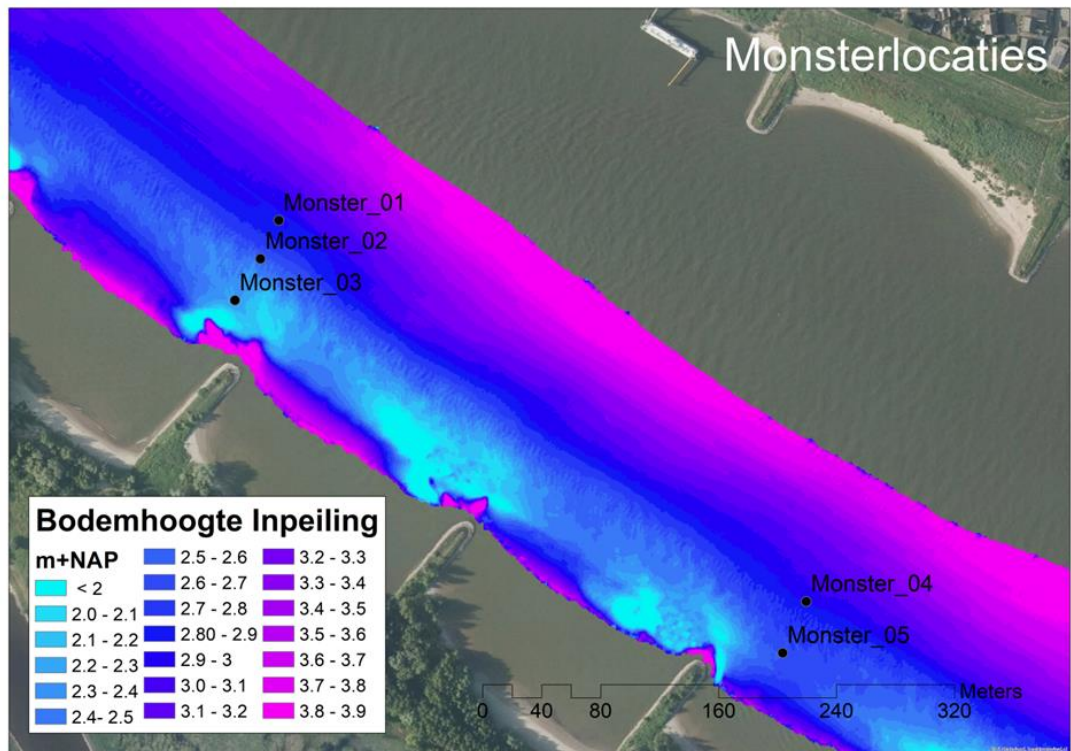


Korrelverdeling rivieras

Korrelverdeling rechter oever



D.3 Figuur locaties van bemonstering



Figuur 119 Locaties bemonstering door Martens en van Oord (Lokin en Barneveld, 2019). Merk op dat getoonde inpeiling alleen de buitenbocht beslaat (alle hier getoonde monsters liggen dus in de buitenbocht).



Figuur 120 Locaties bemonsteringen door Rijkswaterstaat, zoals gebruik voor de analyses in dit rapport.

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