

Systeemmaatregelen beleidskeuze rivier-bodemligging Rijntakken

Uitwerking van oplossingsrichtingen

HKV LIJN IN WATER

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Rijkswaterstaat (WVL)

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Systeemmaatregelen beleidskeuze rivier-bodemligging Rijntakken

HKV LIJN IN WATER

Uitwerking van oplossingsrichtingen

Eindrapport

Auteurs

Bescherming persoonlijk levenssfeer

PR5219.10

juli 2025

Samenvatting

De doorgaande en ongelijkmatige bodemerosie van het zomerbed van de Rijntakken schaadt verschillende rivierfuncties. De effecten op de scheepvaart, afvoerverdeling en natuur zullen bovendien alleen maar groter worden door klimaatveranderingen. Het aanpakken van de rivierbodemerosie is dus van maatschappelijk groot belang en daarom één van de belangrijkste uitdagingen in het rivierenprogramma Ruimte voor de Rivier 2.0. In het Programma Onder de Omgevingswet (hierna: PoW) Integraal Riviermanagement (IRM) is besloten om de rivierbodemerosie te stoppen of zelfs om te keren en de afvoerverdeling bij laagwater over de splitsingspunten te beïnvloeden. Het doel van voorliggend onderzoek is om inzicht te krijgen in de effectiviteit van verschillende maatregelpakketten om de bodemerosie tegen te gaan en bij laagwater meer afvoer naar Pannerdensch Kanaal en IJssel te sturen, alsmede een verkenning van de maakbaarheid, het effect op de rivierfuncties (hoogwaterveiligheid, bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid en natuur/ecologie) en een globale kosteninschatting.

In dit onderzoek zijn – naast niets doen waarbij de bodemerosie en het scheeftrekken van de afvoerverdeling doorzet (MP1) – drie onderscheidende maatregelpakketten onderzocht. Maatregelpakket 2 (MP2) bestaat uit sedimentsuppleties met de mobiele fracties van gebiedseigen materiaal in de eroderende trajecten van de Boven-Waal en Boven-/Midden-IJssel. Maatregelpakket 3 (MP3) gaat uit van het meergeulenconcept door toepassing van langsdammen en oevergeulen op het Waaltraject van de Pannerdense Kop tot aan de bestaande langsdammen bij Tiel. Maatregelpakket 4 (MP4) zoekt ten slotte naar maximale synergie door een groene variant van het meergeulenconcept in de vorm van een keten van nevengeulen in uiterwaarden te combineren met ruimtelijke maatregelen op de IJssel. De onderzochte maatregelen op de IJssel zijn de heraansluiting van het Zwarte Schaar en zomerbedverbreding in de Boven-IJssel. De uitgevoerde berekeningen en analyses laten zien dat zowel met suppleties als met het meergeulenconcept de bodemerosie in de Waal lijkt te kunnen worden gestopt en de laagwaterafvoer naar de IJssel kan worden vergroot. Met de onderzochte maatregelen kan dus invulling worden gegeven aan het nieuwe rivierbodembeleid: stoppen van de rivierbodemerosie en vergroten van de IJsselafvoer bij laagwater.

Het verspreid suppleren (MP2) leidt tot een snelle aanpassing (verhoging) van de rivierbodemligging. Om de bodemerosie effectief tegen te gaan is het suppletievolume variabel in de tijd en gebaseerd op de opgetreden erosie. Het benodigde suppletievolume is ~150.000 m^3/jaar voor de Waal en ~20.000 m^3/jaar voor de IJssel. Sedimentsuppleties vormen een adaptieve maatregel omdat op ieder gewenst moment de maatregel bijgesteld kan worden om in te spelen op onverwachte effecten of toekomstige natuurlijke processen. MP2 scoort op vier beschouwde rivierfuncties licht positief of neutraal wat betekent dat er weinig synergie is met andere rivierfuncties. Dat komt vooral doordat deze maatregel de afvoerverdeling en laagwaterstanden nauwelijks beïnvloedt. Het vaargeulonderhoud zal ook toenemen. Daarnaast is langjarig voldoende extern sediment noodzakelijk (sedimentbeschikbaarheid is in dit onderzoek niet beschouwd). Een toekomstige verdere detailleringsslag moet focussen op de sedimentsamenstelling (e.g. een aangepast mengsel bij de vaste lagen) en slim vaargeulonderhoud (e.g. hergebruik van suppletiemateriaal). De samenstelling van het suppletiemateriaal is daarbij een regelknop voor de effectiviteit van het stoppen van de erosie en de 2D effecten (dwarshelling).

Door toepassing van het meergeulenconcept op de Waal (MP3) kan de bodemerosie worden gestopt. De maatregel is zodanig gedimensioneerd dat de sedimenttransportgradiënt in de Waal zoveel mogelijk wordt geëlimineerd én er meer afvoer naar de IJssel gaat bij lage afvoer. Er zijn twee varianten opgesteld. Eén met 40m versmalling over de hele Waal voor maximale waterstandsopzet en één waarbij de versmalling op de Midden-Waal is gereduceerd naar 20m. Er zijn in beide varianten grote (80-100 m brede en diepe) oevergeulen nodig op de Midden-Waal om de transportgradiënt op de Waal te elimineren. De inpasbaarheid binnen het bestaande buitendijkse gebied kan hier dan ook moeilijk of niet haalbaar zijn. Op de Boven-Waal zijn er minder grote oevergeulen nodig. Om sterke lokale morfologische dynamiek zoveel mogelijk te voorkomen moeten de overgangen tussen twee langsdammen zo goed mogelijk gestroomlijnd zijn. Verdere aandachtspunten voor vervolgonderzoek zijn (i) het verder benedenstrooms van Tiel doorzetten van het meergeulenconcept, (ii) het voorkomen van transportgradiënten binnen één langsdam en (iii) het voorkomen van sedimentatie in oevergeulen. Grootschalige rivierverruiming zoals onderzocht in MP3 met het meergeulenconcept verkleint op de verruimde takken de bodemschuifspanning bij afvoeren met veel transport, wat het risico op het doorbreken van pleisterlagen verkleint.

MP4 combineert een groene variant van het meergeulenconcept op de Waal, waar oevergeulen worden vervangen door nevengeulen, met maatregelen op de Boven-IJssel. Een zomerbedverbreding van ongeveer 20 m tussen km 879 en 890 op de Boven-IJssel leidt tot sedimentatie in de Boven-IJssel en heeft een positief effect op de afvoerverdeling. De maatregel versterkt echter ook de erosie in het Pannerdensch Kanaal en de Midden-IJssel. Hier zijn aanvullende (verruimende) maatregelen nodig om deze impact te verkleinen. Het aansluiten van het Zwarte Schaar heeft juist een stabiliserend bodemeffect op het Pannerdensch Kanaal en de Midden-IJssel. Hiervoor is wel een extra regelwerk nodig die de waterstandverhoging bij lage afvoeren (wat de IJsselafvoer zou verkleinen) zoveel mogelijk beperkt.

Het meergeulenconcept is minder adaptief is dan suppleren, omdat een fysieke aanlegmaatregel nodig is. De maatregel heeft echter wel regelbereik via o.a. de instroomdrempels bij voldoende overdimensionering van de verruiming (= oevergeul). Ook biedt het meergeulenconcept meerwaarde voor de vier beschouwde rivierfuncties. De groene variant met nevengeulen biedt vanuit het oogpunt van rivierbodemstabilisatie geen meerwaarde ten opzichte van de grijze variant met oevergeulen, maar maakt optimaal gebruik van de herinrichting voor o.a. natuurdoelen. Wel dient opgemerkt te worden dat nevengeulen, doordat ze verder de uiterwaard in liggen dan oevergeulen, ook wat langer zijn. Omdat diepe nevengeulen ongewenst zijn, zullen de nevengeulen dan (waarschijnlijk fors) breder worden dan de oevergeulen uit MP3, denk aan 200-300m. Dat is ruimer dan de oorspronkelijke schetsbeelden uit het WNF plan. Dit vergt vervolgonderzoek naar de inpasbaarheid en de maakbaarheid van het plan Ruimte voor Levende Rivieren van het WNF. Zomerbedverbreding op de Boven-IJssel levert uitbreiding van het areaal uiterwaardnatuur en meer dynamische (afgegraven) oevers.

De investeringskosten van het meergeulenconcept op de Waal zijn grof geschat op 1 miljard euro. Voor de groene variant met nevengeulen is de schatting ongeveer 2,4 miljard euro. De investeringskosten van de maatregelen op de IJssel zijn geschat op 20 miljoen euro (zomerbedverbreding) en 60 miljoen euro (heraansluiting Zwarte Schaar). De jaarlijkse kosten zijn voor MP1 geschat op 2,5 miljoen euro (vaargeulonderhoud) en voor MP2-MP4 is de bandbreedte voor onderhoud ca. 9 tot 12 miljoen euro per jaar.

Het in dit onderzoek verder verbeterde en toegepaste referentiemodel is goed in staat de bodemontwikkeling in de verschillende Rijntakken te reproduceren, maar door gevoeligheid van het systeem voor modelkeuzes dient vooral naar relatieve effecten gekeken te worden.

Er is aanvullend onderzoek nodig om de voorspelcapaciteit van het morfologische model verder te verbeteren en gevoeligheden voor onzekerheden in afvoeromstandigheden, bodemsamenstellingsontwikkelingen en modelparameters te onderzoeken. Implementatie van het meergeulenconcept zal altijd plaatsvinden in combinatie met sedimentsuppleties, in de eerste plaats om de doorgaande bodemerosie tijdens de aanlegfase en transitiefase naar een nieuw evenwicht op te vangen. Voor zowel MP3 als MP4 geldt dus dat extra sedimentmanagement in de vorm van suppleties en baggerwerkzaamheden een essentieel onderdeel is van de oplossingsrichting. De exacte invulling daarvan moet nog in een vervolgstudie worden verkend.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel van dit project	2
1.3	Raakvlakken met eerdere studies, laagwater en hoogwater	3
1.4	Scope-afbakening	3
1.5	Leeswijzer	3
2	Systeembeschrijving	5
2.1	Bodemtrends	5
2.2	Sedimenttransportgradiënt	7
3	Referentiemodel	11
3.1	Modelschematisatie	11
3.2	Referentieberekening: hydrodynamica	13
3.3	Referentieberekening: morfodynamiek	14
3.4	Fit-for-purpose	20
4	Maatregelpakketten	23
4.1	Inleiding: globale omschrijving maatregelpakketten	23
4.2	MP2: Suppleties	25
4.3	MP3: Meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen Waal	29
4.4	MP4: Maximale synergie	33
5	Morfologische ontwikkeling	39
5.1	Langetermijnontwikkeling Rijntakken voor elk van de pakketten	39
5.2	MP2: Suppleties	43
5.3	MP3: meergeulenconcept Waal	49
5.4	MP4: Maximale synergie	55
6	Effectbepaling rivierfuncties	61
6.1	Zoetwaterbeschikbaarheid: waterstanden en afvoer IJssel bij laagwater	62
6.2	Hoogwaterveiligheid	64
6.3	Waterkwaliteit/natuur	65
6.4	Bevaarbaarheid	67
6.5	Kosten en uitvoerbaarheid	69
7	Synthese	73
7.1	Concepten en werking van maatregelen	73

7.2 Onzekerheden 79

8 Conclusies en aanbevelingen 83
8.1 Conclusies 83
8.2 Aanbevelingen en onderzoeksvragen 85

9 Referenties 89

Bijlagen 91
A Modelschematisatie 93
B D-Hydro-analyse 95
C Overzicht uitgevoerde iteraties schematisatie meergeulenconcept 97
D Ruimtelijke spreiding vaargeulonderhoud referentie 99
E Initieel hydraulisch effect MP4 101
F Gegevens effectbepaling rivierfuncties 103

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De doorgaande en ongelijkmatige bodemerosie van het zomerbed van de Rijntakken schaadt verschillende rivierfuncties. De effecten op de scheepvaart, afvoerverdeling en natuur zullen bovendien alleen maar groter worden door klimaatveranderingen omdat extremen toenemen. Het aanpakken van de rivierbodemerosie is dus van maatschappelijk groot belang en daarom één van de belangrijkste uitdagingen in het rivierenprogramma Integraal Riviermanagement (IRM), thans Ruimte voor de Rivier 2.0 (RvdR 2.0). In de PoW IRM is (in 2024) tot doel gesteld om (i) de rivierbodemerosie te stoppen of zelfs om te keren en (ii) toe te werken naar een gewenste afvoerverdeling over de splitsingspunten bij laagwater[1]. Daarvoor is een combinatie van sedimentmanagement en grootschalige structurele maatregelen in de Rijntakken nodig.

Dit onderzoek richt zich op maatregelen in het splitsingspuntengebied en de erosieve delen van de Rijntakken (blauw en groen in Figuur 1.1). Voor effecten van deze maatregelen op de andere functies wordt daarnaast ook naar de sedimenterende en gestuwde delen gekeken.

Het project is uitgevoerd in nauwe samenwerking met een kerngroep bestaande uit Bescherming persoonlijk leve van Rijkswaterstaat, en Bescherming persoonlijk levenssfeer van Deltares.

[1] Deze gewenste afvoerverdeling wordt geformuleerd door DPZW (Deltaprogramma Zoetwater), waarbij zorgvuldige afwegingen nodig zijn tussen de verschillende functies zoals scheepvaart, aanvoer naar het IJsselmeer, de regenton van Noord Nederland, en het tegengaan van zoutindringing.



Figuur 1.1 Het projectgebied (blauw en groen) met een doorwerking op functies (rood en oranje).

1.2 Doel van dit project

Het doel van deze opdracht is om inzicht te krijgen in de effectiviteit van verschillende maatregelpakketten om de bodemerosie tegen te gaan inclusief de maakbaarheid, effect op rivierfuncties (hoogwaterveiligheid, bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid en natuur/ecologie) en de kosten.

Hiervoor zijn vier maatregelenpakketten gedefinieerd:

- MP1: Niets doen.
- MP2: Sedimentmanagement in de vorm van suppleties.
- MP3: Meergeulenconcept in de vorm van grootschalige aanleg van langsdammen en oevergeulen op de Waal.
- MP4: Maximale synergie: zoveel mogelijk ruimtelijke maatregelen op de riviertakken, waarbij synergie wordt gezocht met waterkwaliteit & ecologie en afvoerverdeling (hoog- en laagwater).

De maatregelpakketten worden in hoofdstuk 4 nader toegelicht.

1.3 Raakvlakken met eerdere studies, laagwater en hoogwater

Dit onderzoek heeft raakvlakken met de volgende afgeronde en lopende onderzoeken en initiatieven:

1. Het onderzoek dat kijkt naar de afvoerverdeling over de splitsingspunten Rijntakken bij lage afvoeren, dat zich richt op de maakbaarheid van de gewenste afvoerverdeling bij laagwater.
2. Het onderzoek naar de waterverdeling bij hoge afvoeren: wat is voor de lange termijn de maatschappelijk meest gewenste afvoerverdeling over de Rijntakken bij hoge afvoeren? Voor vijf verschillende scenario's voor de verdeling van de extra afvoer boven 16.000 m^3/s over de Waal en de IJssel is verkend hoe deze verdeling kan worden gerealiseerd.
3. De verbetering en actualisatie van het Delft3D morfologisch model in 2024 (Sloff et al, 2024) t.b.v. toepassing binnen RvdR 2.0.
4. Het Grensregio-project (GRP), waarin het Delft3D model is toegepast voor de Rijn in het grensgebied van Duitsland en Nederland t.b.v. een verbeterde bevaarbaarheid. In dit project wordt hetzelfde model gebruikt als toegepast in voorliggend project maar is er sprake van een geografisch andere scope en een afwijkende hydrograaf t.o.v. onderhavige studie. Bovendien worden dezelfde typen maatregelpakketten beschouwd. Aangezien beide projecten gelijk oplopen worden elkaars modelopzet, resultaten en inzichten gebruikt.
5. De visie Ruimte voor Levende Rivieren van het WNF (https://www.levenderivieren.nl/). Deze visie is meegenomen als inspiratie van de groene variant van het meergeulenconcept in dit onderzoek.

1.4 Scope-afbakening

- Dit onderzoek richt zich op de maakbaarheid van de rivierbodemligging in de Rijntakken door het bepalen van de potentie van verschillende onderscheidende maatregelpakketten. Er wordt in deze opdracht niet getrechterd naar een voorkeurspakket.
- De maatregelen worden op hoofdlijnen ingepast, ontworpen en geanalyseerd. Een gedetailleerd ontwerp van bijvoorbeeld de dwarsdoorsnede van een nevengeul valt buiten de scope.
- De morfologische berekeningen zijn voor 20 jaar uitgevoerd (zichtjaar 2050). Eerdere projecten hebben laten zien dat dit voldoende is om de morfologische ontwikkeling door maatregelen op systeemniveau te bepalen.
- Voor de effectbepaling op hoofdfuncties zijn in principe geen aanvullende numerieke modellen toegepast. De beoordeling vindt plaats op basis van beschikbare informatie, expertkennis en vuistregels.
- Beheer en onderhoud van (oever)geulen is geschat op basis van de sedimentatie in de modelberekeningen en aangevuld met expertkennis.

De studie is gericht op het komen tot beslisinformatie voor vervolgstappen binnen RvdR2.0.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een morfologische beschrijving van het Rijntakkensysteem. In hoofdstuk 3 wordt het Delft3D model beschreven dat voor het project is gebruikt. Ook zijn de rekenresultaten toegelicht. De maatregelpakketten die zijn beschouwd worden in hoofdstuk 4 toegelicht, de uitgangspunten worden gegeven en beschreven wordt hoe de maatregelen in Delft3D zijn geschematiseerd.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de uitgevoerde morfologische berekeningen getoond en toegelicht in termen van bodemontwikkeling, afvoerverdeling over de splitsingspunten en het verwachte sedimentbeheer. In Hoofdstuk 6 beoordelen we de effecten van de maatregelpakketten op de rivierfuncties waterbeschikbaarheid, hoogwater, waterkwaliteit/natuur en bevaarbaarheid. Ook wordt een grove kostenschatting gegeven. In hoofdstuk 7 plaatsen we de resultaten in context en het rapport wordt afgesloten met de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 8.

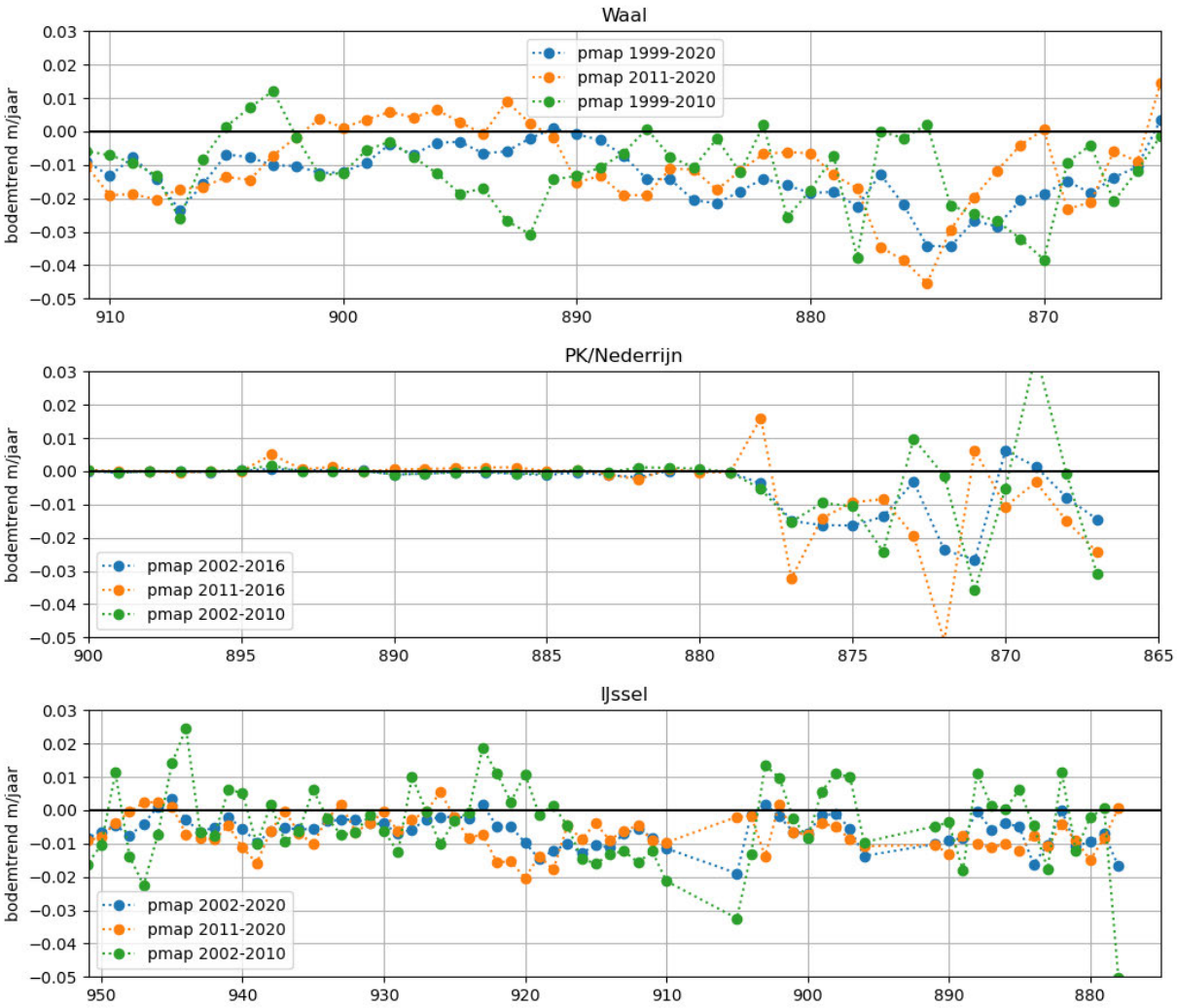
2 Systeembeschrijving

De morfologische ontwikkeling van de Rijntakken wordt nog beïnvloed door maatregelen die in de afgelopen eeuwen zijn genomen (Ylla Arbós et al., 2023). Als onderdeel van de riviernormalisatie zijn de riviertakken bijvoorbeeld ingekort (bochtafsnijding), is het zomerbed versmald en vastgelegd (kribben) en zijn er vaste lagen aangelegd (bochten bij Erlecom, Nijmegen en St. Andries in de Waal). Daarnaast beïnvloeden de stuwen in de Nederrijn de waterstanden en afvoerverdeling en daarmee de bodemontwikkeling van de splitsingspunten.

2.1 Bodemtrends

Vanaf 1999 zijn van de Rijntakken jaarlijkse multibeampeilingen beschikbaar. Dit is relatief een korte periode. Deze metingen zijn geaggregeerd naar hectometervakken op basis waarvan bodemtrends kunnen worden bepaald. Figuur 2.1 geeft deze trends weer per rivierkilometer (rkm) en laat zien dat deze trends variabel zijn in de tijd. De trends worden bepaald door de opgetreden afvoeren, uitgevoerde maatregelen, rivierbeheer en veranderingen in de afvoer- en sedimentverdeling bij de splitsingspunten in deze periode. In de beschouwde periode zijn kribben verlaagd in de Midden- en Beneden-Waal en zijn drie langsdammen met oevergeulen aangelegd in de Waal bij Tiel. Daarnaast heeft het opgetreden afvoerverloop invloed op de bodemtrends (Sloff, 2019). Zeker in combinatie met klimaatverandering kan dit tot een versnelling van de bodemerosie leiden (Ylla Arbós et al., 2023). Tabel 2.1 geeft de (door RWS Oost-Nederland op basis van PMAP[2]-data) vastgestelde trends per riviertraject, die als basis worden gehanteerd bij RvdR2.0 en in dit onderzoek. Dit zijn waargenomen trends op basis van de beschikbare (historische) meetgegevens en zijn dus geen voorspelling van toekomstige trends.

[2] RWS Oost-Nederland aggregeert multibeampeilingen van de rivierbodem tot (onder andere) een gemiddelde bodemhoogte per hectometervak van het zomerbed. Om robuuste trends te kunnen bepalen is het noodzakelijk dat – zeker langs de oevers – in ieder vak de dekkingsgraad gelijk is. In de zogenaamde PMAP-methode wordt hier zorg voor gedragen door data systematisch op te werken alvorens de aggregatie per hectometervak uit te voeren.



Figuur 2.1 Trend in bodemverandering op basis van PMAP-gegevens met daarbij verschillende tijdsvensters waarover deze zijn vastgesteld.

Tabel 2.1 Bodemtrends op trajectniveau gebaseerd op de bodemtrend tussen 2004-2023 (negatief is erosie). De lokale erosie bij de vaste lagen en de zomerbedverdieping in de IJssel zijn hierin niet meegenomen (Bron: PMAPv20240618, RWS ON)

Morfologische trajectindeling		Van (rkm)	Tot (rkm)	Vastgestelde trend (cm/jaar)
1. Splitsingspuntengebied				
	1.1 Bovenrijn	857.7	867.0	0,29
	1.2 Boven-Waal	867.0	887.0	-1,58
	1.3 Pannerdensch Kanaal	867.0	878.3	-0,99
	1.4 Boven-IJssel	878.3	925.0	-0,90
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3	891.5	0,00
2. Waal-Merwede				
	2.1 Midden-Waal	887.0	911.5	-0,57
	2.2 Beneden-Waal	911.5	932.4	0,39
	2.3 Getijden-Waal	932.4	952.7	0,55
3. Nederrijn-Lek				
	3.1 Midden-Nederrijn	891.5	922.3	0,35
	3.2 Beneden-Nederrijn	922.3	946.9	0,39

	Morfologische trajectindeling	Van (rkm)	Tot (rkm)	Vastgestelde trend (cm/jaar)
	3.3 Lek	946.9	967.2	0,42
4. IJssel				
	4.1 Midden-IJssel	925.0	965.0	-0,18
	4.2 Beneden-IJssel	965.0	1006.0	0,11

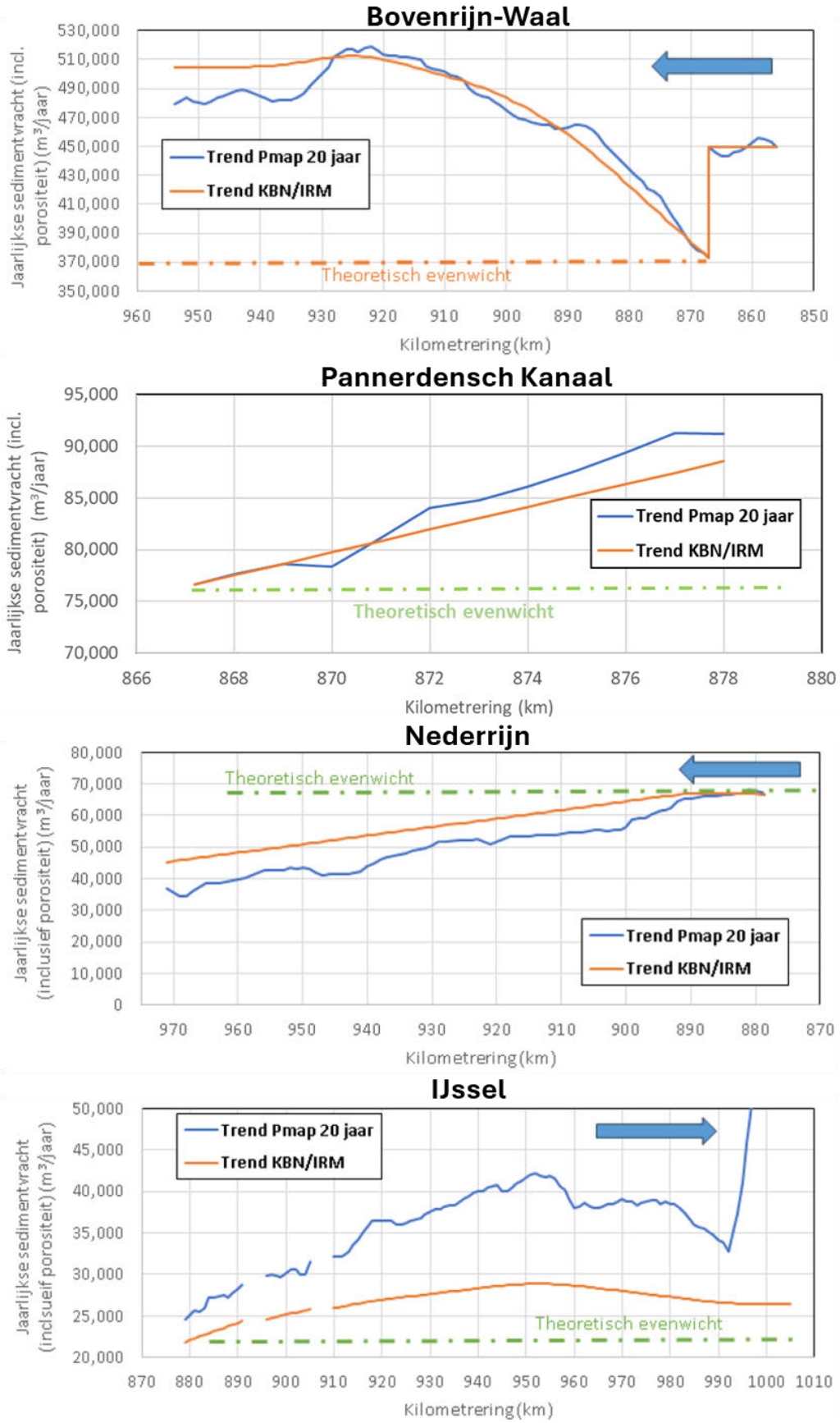
2.2 Sedimenttransportgradiënt

Op basis van waargenomen grootschalige bodemveranderingen is de sedimenttransportgradiënt geschat (Sloff et al. 2024). Hierbij is de verandering in bodemhoogte in de tijd gelijk aan een verandering in sedimenttransport per eenheid van lengte van de rivier (de sedimenttransportgradiënt), d.w.z. de Exner-vergelijking. Figuur 2.2 geeft dit weer voor de Rijntakken. Alleen de gradiënt in sedimenttransport kan op basis van bodempeilingen worden bepaald. De absolute waarde van het sedimenttransport volgt uit Frings et al. (2015) en bevat een relatief grote onzekerheid. Bij het opstellen van het recent geactualiseerde Delft3D-model van de Rijntakken lag daarom de focus op de reproductie van deze gradiënt (Sloff et al. 2024). Bij het theoretisch evenwicht is het sedimenttransport over een tak constant. Het realiseren van een stabiele bodemligging kan dus worden bereikt door het elimineren van de sedimenttransportgradiënten.

Toelichting per tak:

- Bovenrijn (tot rkm 868): De bodemligging in de Bovenrijn is redelijk stabiel tussen 1999-2018. Recentere metingen laten echter wel een bodemerosie zien (Tabel 2.1). Het bodemmateriaal is relatief grof (D_{50} is ca. 10 mm), en de grofste fracties (>8 mm) komen pas bij hogere afvoeren (> Qlobith = 2200 m^3/s) in beweging. De sedimenttoevoer wordt daarnaast bepaald door sedimentpulsen die door bovenstroomse erosiegaten door het systeem lopen (Becker, 2023). Om te voorkomen dat deze erosiegaten ontstaan en fijnere onderlagen aansnijden is het wenselijk om ook in dit traject de erosiviteit te beperken. De bijbehorende maatregelen worden verkend binnen het (thans parallel lopende) Grensregio-project.
- Waal: Op de Waal is een transportgradiënt van ongeveer 150.000 m^3/jaar (m^3 inclusief poriën) aanwezig. Deze gradiënt zorgt voor de grote erosie in de Boven- en Midden-Waal (Tabel 2.1). Op het traject dat start benedenstrooms van de vaste laag bij St. Andries treedt aanzanding op wat duidt op een afname in het sedimenttransport. Uit de Waal werd tot 2019 jaarlijks ongeveer 90.000 m^3 onttrokken benedenstrooms van St. Andries (Kosters et al., 2024) voor sedimentwinning. Dat vertekent het beeld dat uit de metingen komt. De werkelijke afname van het sedimenttransport in de Beneden-Waal is hierdoor waarschijnlijk nog een stuk hoger.
- Pannerdensch Kanaal: In het Pannerdensch Kanaal is er een duidelijke netto positieve gradiënt in sedimenttransport die leidt tot erosie in het Pannerdensch Kanaal. Het netto transport in deze tak wordt sterk beïnvloed door sedimenttoevoer uit de Bovenrijn en de waterstand op de IJsselkop. Deze waterstand wordt grotendeels bepaald door de stuwen in de Nederrijn en bij hoge afvoeren door de smalle Boven-IJssel. De erosie wordt dus grotendeels veroorzaakt door de andere takken en in beperkte mate door de geometrie van het Pannerdensch Kanaal zelf.

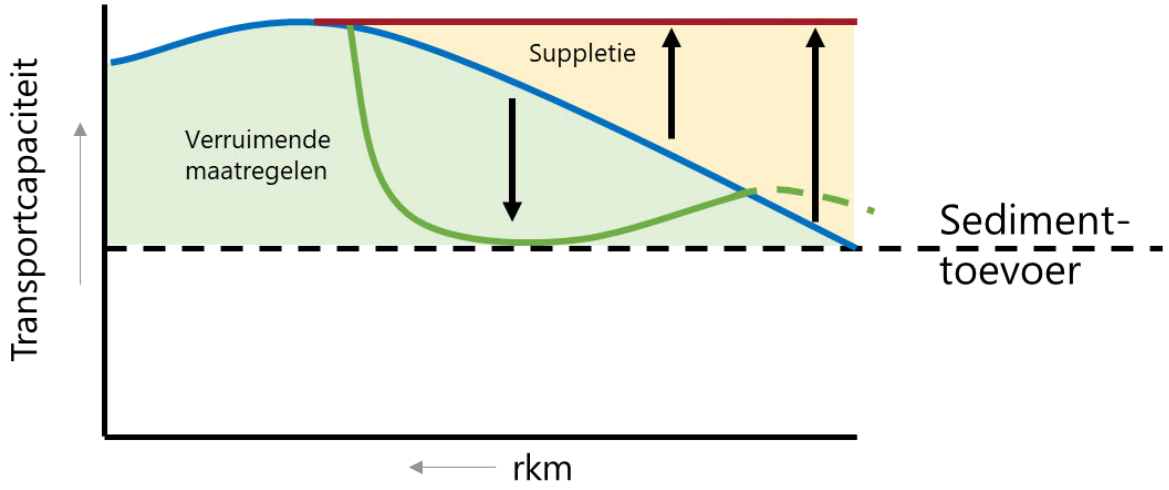
- Nederrijn: De waargenomen bodemligging in de Boven-Nederrijn is stabiel en bevat daarom geen gradiënt in sedimenttransport. In de Midden- en Beneden-Nederrijn treedt sedimentatie op.
- IJssel: In de Boven-IJssel is een erosietrend vergelijkbaar met het Pannerdensch Kanaal zichtbaar. Deze erosieve trend loopt door tot ongeveer rkm 945. In de Beneden-IJssel is sprake van een sedimentatietrend.



Figuur 2.2 Sedimenttransportgradiënten voor de Rijntakken bepaald op basis van bodemveranderingen tussen 1999-2018 (Bron: Sloff et al. 2024).

De waargenomen sedimenttransportgradiënt geeft inzicht in de opgave om de bodemerosie te stoppen. Door de gradiënt over een riviertak te elimineren wordt in theorie het morfologisch evenwicht bereikt. In die situatie is op elke dwarsraai in de rivier het sedimenttransport gelijk, en stemt daarmee overeen met de bovenstroomse toevoer van sediment. Aanvullend geldt voor alle trajecten rond het splitsingspuntengebied dat deze niet homogeen trendmatig veranderen, maar ook incidenteel vanwege doorbrekende pleisterlagen met zandige ondergrond. Dat betekent dat transportgradiënten afgeleid uit bodemtrends niet geheel representatief zijn voor alle dynamiek; daarom is afname van de hydraulische belasting (bodemschuifspanningen) in deze trajecten een essentieel aanvullend criterium voor een stabiele bodem, naast eliminatie van de transportgradiënt.

In essentie onderscheiden we in dit onderzoek twee typen maatregelen om de sedimenttransportgradiënt te beïnvloeden: sedimentsuppletie met (extern) materiaal en een aanpassing in het dwarsprofiel van de rivier. De invloed van deze maatregelen op de sedimenttransportcapaciteit is geïllustreerd in Figuur 2.3. Een suppletiemaatregel is gericht op het gelijktrekken van de sedimenttransporten op een eroderend traject door het verhogen van de sedimenttoevoer zodat deze in balans is met de sedimenttransportcapaciteit. Een verruimende maatregel zoals het meergeulenconcept (langsdammen met oevergeulen langs het zomerbed of nevengeulen door de uiterwaarden) is juist gericht op het verlagen van de sedimenttransportcapacteit (door reductie bodemschuifspanning) zodat sediment afvoer in balans is met de sedimenttoevoer.



Figuur 2.3 Conceptueel effect van suppleties en rivierverruiming op transportcapaciteit.

3 Referentiemodel

Het uitgangspunt voor dit onderzoek is het Delft3D-model dat voor IRM is opgezet (Sloff et al., 2024). Net als in het parallel opgestarte Grensregioproject is het modelleren van stroming en sedimenttransport in de grensregio en rond het splitsingspunt cruciaal. Daarom is in het Duitse deel van het model en rond het splitsingspuntengebied de modelgeometrie geactualiseerd met bodemmetingen en geometrie, en zijn de randvoorwaarden opnieuw vastgesteld (zie paragraaf 3.1). In de opstartfase van voorliggend onderzoek is een aantal tekortkomingen geconstateerd aan het referentiemodel, zowel op lokaal als op trajectniveau. Deze tekortkomingen zijn in nauwe samenwerking met het Grensregioproject zo goed mogelijk verbeterd door wijzigingen in de zomerbedruwheid en sedimenttransportrelaties door te voeren. Deze verbeteringen beschrijven we op hoofdlijnen samen met de hydraulische en morfologische modelresultaten van het referentiemodel (paragraaf 3.2 en 3.3). Een uitgebreide modelkalibratie is nadrukkelijk geen onderdeel van dit onderzoek, wat betekent dat niet in alle takken de gemeten bodemtrends accuraat wordt gereproduceerd. De bruikbaarheid en toepasbaarheid van het morfologisch model voor voorliggend onderzoek – de zogenaamde “Fit-For-Purpose” – beschrijven we in paragraaf 3.4.

3.1 Modelschematisatie

3.1.1 Geometrie

Het uitgangspunt voor het Delft3D model is *j18_5-v2* wat representatief is voor de geometrie in 2018 (Sloff et al. 2024). De volgende aanvullende geometrische aanpassingen zijn meegenomen:

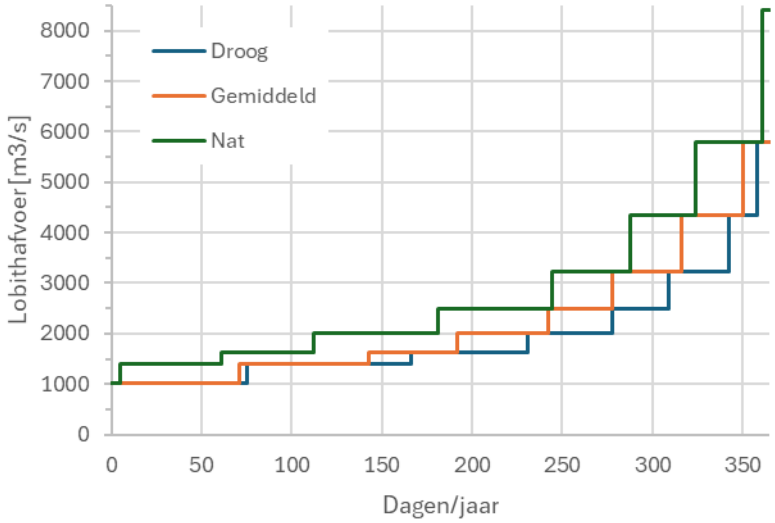
- Update van de bodemligging van het zomerbed: 2020 voor het Nederlandse deel en 2021 voor het Duitse deel inclusief de Nederlandse kant van de Bovenrijn tot aan Pannerdense Kop. De verlaging van de vaste laag Nijmegen uit 2021 is meegenomen (uit peiling 2022).
- Gebiedsaanpassingen zoals:
  - Actualisatie kribben in Duitse deel van de Rijn.
  - Dijkverlegging bij Emmerich.
  - Overnachtingshaven Spijk.
  - Krib- en oeververlaging Pannerdensch Kanaal.
  - Meinerswijk.
- Vaste lagen Duitsland, in de Duitse Rijn net bovenstrooms van de grens zijn er vaste lagen aangelegd door zeer grof materiaal te storten. Dit is als een niet-erodeerbare laag opgenomen in het model.

Bijlage A.1 beschrijft de geometrische aanpassingen in meer detail. Deze zijn deels in Baseline uitgevoerd, wat heeft geleid tot Baseline-boom ‘dvr_grensregio_ref’. Vervolgens zijn handmatige aanpassingen toegevoegd, bijvoorbeeld in het Duitse deel dat buiten de contouren van de Baseline-database valt. Het resulterende Delft3D-4-model is delft3d_4-rijn-2025-v1.

3.1.2 Randvoorwaarden

Voor de morfologische berekeningen met Delft3D is het nodig om discrete afvoerstappen te definiëren. Deze aanpak maakt het namelijk mogelijk om met een relatief hoge morfologische versnellingsfactor te rekenen wat de rekentijd van de morfologische berekeningen beperkt. De hoogte van de afvoeren is overgenomen uit het Grensregio-project zodat ook de resultaten vergelijkbaar zijn.

Op basis van de KNMI-'23 klimaatscenario's zijn Lobithafvoeren bepaald (Deltares, 2023). Per klimaatscenario is een afvoerreeks van 240 jaar beschikbaar (8 ensembles van elk 30 jaar). Voor langjarige morfologische berekeningen is het gangbaar om een representatieve hydrograaf van 1 jaar te herhalen. Voor het morfologisch model is dus (per scenario) één representatieve afvoerduurlijn nodig; de variatie van jaar-tot-jaar wordt dan niet meegenomen. Sloff en Becker (2024) hebben op basis van klimaatscenario 2050Hd (hoge globale temperatuurstijging en droog in 2050) een representatieve afvoerduurlijn afgeleid horende bij het 20, 50 en 80-percentiel voor respectievelijk een droog, gemiddeld en nat-afvoerscenario (Figuur 3.1). Tabel 3.1 geeft de bijbehorende afvoerstappen en duren. In dit onderzoek is alleen gerekend met de gemiddelde afvoerduurlijn.



Figuur 3.1 De gemiddelde afvoerduurlijn horende bij een droog, gemiddeld en nat scenario gebaseerd op het 2050Hd KNMI-2023 scenario (Sloff en Becker, 2024).

Tabel 3.1 Afvoerstappen met bijbehorende duren voor een droog, gemiddeld en nat scenario gebaseerd op het 2050Hd KNMI-2023 scenario (Sloff en Becker, 2024).

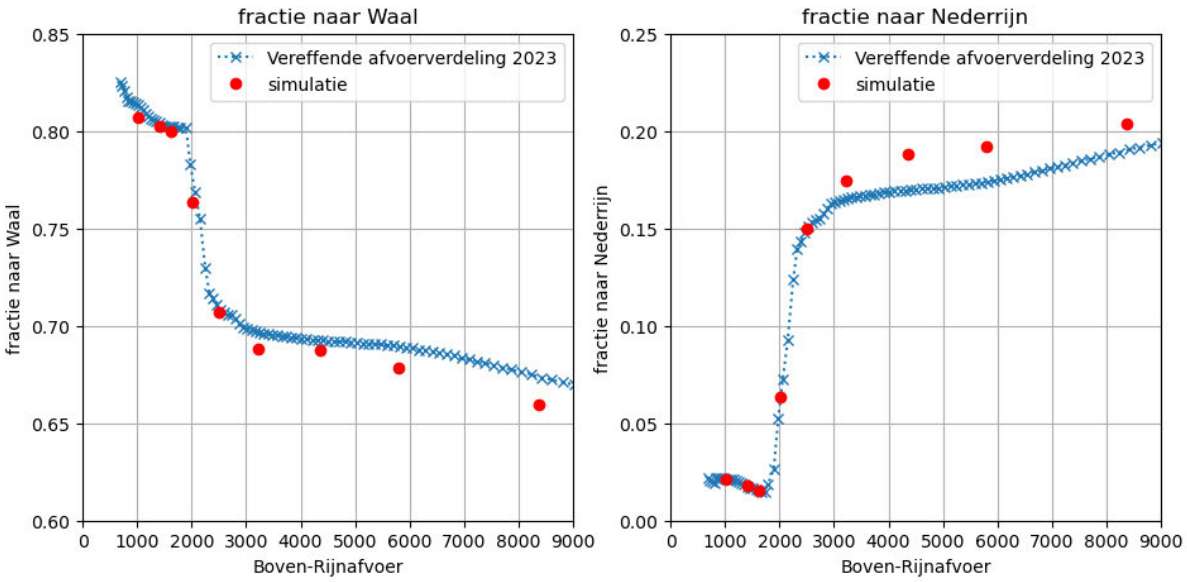
Afvoerstap (m^3/s)	Droog (d)	Gemiddeld (d)	Nat (d)
1020	75	71	5
1400	91	72	56
1630	65	49	51
2020	47	50	69
2500	31	36	63
3220	33	38	44
4350	16	34	36
5800	7	15	37
8400	0	0	4

Door de aanpassingen in afvoerniveaus zijn ook de lateralen en andere randvoorwaarden aangepast. Deze aanpassingen zijn in detail beschreven in Bijlage A.2. De belangrijkste aanpassingen zijn:

- Benedenstroomse randvoorwaarden:
  - de benedenstroomse waterstand op de Waal, IJssel en (bij hoge afvoeren) Nederrijn is op basis van de betrekkingslijnen geüpdatet.
  - In de Nederrijn wordt bij lage afvoeren (<2500 m^3/s) de waterstand vervangen door een afvoeronttrekking. Deze is aan de hand van de vereffende afvoerverdeling (2023) vastgesteld.
- De grootste lateralen op de IJssel zijn aangepast (Oude IJssel en Twentekanaal). De bijbehorende afvoeren zijn afgeleid op basis van de j18_v5 WAQUA-schematisatie.
- De nevengeul Lent stroomt bij lage afvoeren mee via duikers. Deze afvoer is als onttrekking en lozing opgelegd.
- De ruwheid in Sloff et al. (2024) is in het zomerbed C=50 $m^{0,5}/s$. De nieuwe hydrograaf heeft echter laten zien dat dit tot verkeerde sedimenttransporten en bodemtrends kan leiden. Deltares heeft, om hiervoor te corrigeren, de Chézy-waarde op enkele trajecten van de Waal en het Pannerdensch kanaal aangepast zodat deze ruimtelijk varieert in overeenstemming met ruimtelijke variatie in duinhoogtes. De ripple factor in de transportformule is op dezelfde trajecten ruimtelijk variabel gemaakt en de sedimenttransporten bij het splitsingspunt zijn opnieuw gekalibreerd (pers. comm. Kees Sloff).
- De methodiek voor vaargeulonderhoud en het waterstandsreferentievlak zijn overgenomen uit het Grensregio-project. Grootschalige maatregelen zoals zomerbedversmalling door langsdammen en sedimentsuppleties beïnvloeden het waterstandsreferentievlak, zowel initieel als op de korte en lange termijn. In de praktijk wordt het waterstandsreferentievlak echter om de 10 jaar opnieuw vastgesteld op basis van laagwaterafvoerstatistiek en een actuele bodemligging. Het doel van voorliggende onderzoek is om, op de lange termijn, de zomerbedbodemligging zo veel mogelijk stabiel te houden wat betekent dat de verandering van het waterstandsreferentievlak op de lange termijn ook beperkt zal zijn. Daarom is in overleg met RWS besloten om het waterstandsreferentievlak in de berekeningen niet te updaten tussen de maatregelpakketten en in de tijd.
- Zandwinning op de Beneden-Waal is niet meegenomen omdat deze voor het grootste deel plaatsvindt buiten het modeldomein (benedenstrooms van 953) en de stroming en sedimenttransport in het gebied met maatregelen niet beïnvloedt.

3.2 Referentieberekening: hydrodynamica

Bij de opzet van het morfologische model is de keuze gemaakt om een in tijd constante ruwheid op te leggen (Sloff et al. 2024) omdat de ruwheid grote invloed heeft op het sedimenttransport in de rivier. Belangrijk is echter dat de afvoerverdeling bij de splitsingspunten de juiste trends laat zien omdat dit bepalend is voor het sedimenttransport in de takken en omdat het beïnvloeden van de afvoerverdeling één van de doelen is van de geplande maatregelen binnen het onderzoek laagwaterverdeling. Bij afvoeren tot 2500 m^3/s Lobith wordt er als benedenstroomse randvoorwaarde een afvoer opgelegd bij de Nederrijn en komt het model goed overeen met de metingen (Figuur 3.2). Daarboven wordt gebruik gemaakt van een Qh-relatie. Gezien de keuze van een relatief simpele ruwheidsformulering van het zomerbed komt de afvoerverdeling over Waal, Nederrijn en daarmee ook de IJssel, goed overeen met de metingen.



Figuur 3.2 Afvoerverdeling bij de splitsingspunten op basis van de vereffende afvoerverdeling 2023 en het referentiemodel.

3.3 Referentieberekening: morfodynamiek

Voor de morfologische berekening is het model eerst morfologisch ingespeeld. Dit is nodig omdat de kleinschalige fluctuaties en temporele variabiliteit van de in het model ingevoerde gemeten bodemligging en korrelgrootteverdeling niet aansluiten op de gladdere ruimtelijk en tijdgemiddelde morfologische oplossingen voor bodemligging en samenstelling die het model berekent en waarvoor het model bedoeld is. Dergelijke fluctuaties zouden leiden tot verstoringen in de modelresultaten. Door morfologisch in te spelen dempen de effecten van deze verstoringen uit. In deze paragraaf beschrijven we de morfologische veranderingen van het referentiemodel met een gemiddelde hydrograaf (Figuur 3.1) na deze inspeelprocedure.

Figuur 3.3 geeft de bodemtrends per riviertraject weer op basis van historische metingen, zoals benoemd in hoofdstuk 2, en de voorspelde bodemtrend voor een toekomstig klimaat (gemiddelde hydrograaf) met het referentiemodel. De eerste stap is om de gemeten trends te vergelijken met de gemodelleerde trends. Dit geeft inzicht in de betrouwbaarheid van het model. In de meeste trajecten komt de initiële bodemtrend goed overeen met de historische bodemtrend wat vertrouwen geeft in het functioneren van het model. Hieronder gaan we per tak in op de verschillen. In de volgende paragraaf geven we vervolgens een reflectie in termen van bruikbaarheid van het model voor dit onderzoek. Een belangrijke oorzaak voor verschillen is dat de afvoerhydrograaf horende bij de historische trend niet vergelijkbaar is met de hydrograaf voor het toekomstig klimaat. De historische trend is in werkelijkheid niet constant omdat deze varieert met het werkelijke afvoerverloop en wijzigingen in de geometrie van de rivier en bodemsamenstelling (zie paragraaf 2.1).

Figuur 3.4 geeft per tak de ruimtelijke variatie in sedimenttransport weer volgend uit het referentiemodel. Een toename in sedimenttransport leidt tot bodemerosie en een afname tot sedimentatie in de riviertak. Dit is een dynamisch proces dat continu varieert in tijd en ruimte door feedbackprocessen tussen (gradiënten in) het sedimenttransport, bodemveranderingen en bodemsamenstellingen (door erosie vergroft de bodem, waardoor het sedimenttransport afneemt).

In de Waal is een duidelijke verplaatsing te zien van de sedimenttransportgradiënt in benedenstroomse richting. Dit betekent dat het sterkst eroderende gebied ook in benedenstroomse richting verplaatst. Hetzelfde gebeurt in de Boven-IJssel.

Verdere observaties uit de modelberekening per riviertak:

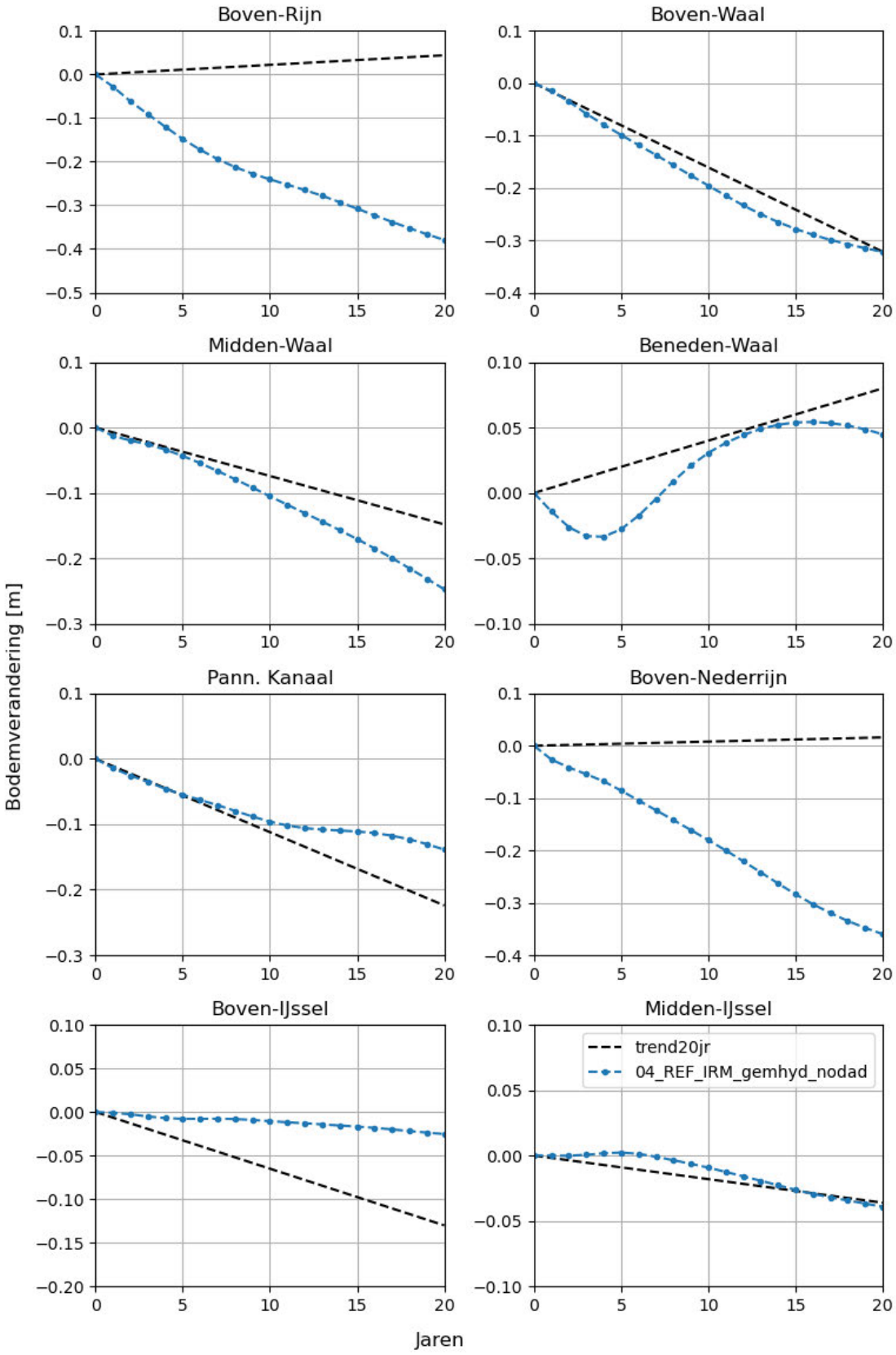
- Bovenrijn: in het model treedt grote bodemerosie op die in werkelijkheid niet is waargenomen. In de modelberekeningen voor dit onderzoek is een ripple factor van 0,9 toegepast voor de Duitse Niederrhein (domein br0), terwijl deze een waarde 1,0 moet hebben zoals in de Bovenrijn (br2)[3]. Er komt daardoor minder sediment aan van de Niederrhein (br0), wat leidt tot een erosiegolf in domein br2, dus de Bovenrijn. Daarnaast zijn de door de Duitsers geplande suppleties met een jaarlijks volume van circa 20.000 m^3 in de Niederrhein tussen Rees en Emmerich niet in het RvR-model meegenomen[4]. Omdat de transportcapaciteit van de Bovenrijn wel klopt, is de uitstroom van sediment uit de Bovenrijn wel in overeenstemming met de juiste waarden. Pas als de erosiegolf de Pannerdense Kop bereikt kan het effect van deze verstoring leiden tot een afname van sedimentaanvoer op de benedenstroomse trajecten[5].
  Bovenstaande twee aspecten (te veel erosie Bovenrijn en niet meenemen suppleties in Duitsland) hebben naar verwachting beperkt effect op de takken benedenstrooms van het splitsingspunt, omdat het tekort aan aangevoerd sediment wordt opgevangen door extra erosie op de Bovenrijn. Verwachting is dat dit op de beschouwde tijdschaal van de berekeningen slechts tot beperkte onderschatting van de sedimenttoevoer naar benedenstroomse trajecten leidt. De sedimentaanvoer naar Waal en Pannerdensch Kanaal nemen in het referentiemodel echter wel af in de tijd. Het is onduidelijk in welke mate dit het gevolg is van het arriveren van de erosiegolf die wordt opgewekt door onderschatte sedimentaanvoer uit de Niederrhein, of een ander modeloorzaak heeft, of dat dit in werkelijkheid ook zal gebeuren. Geadviseerd wordt om dit in een vervolgonderzoek nader te bekijken.
- Boven-Waal: de bodemontwikkeling in de Boven-Waal wordt in grote mate bepaald door de sedimenttoevoer (grootte en samenstelling). In het model verandert de dwarshelling van de Boven-Waal (Figuur 3.6) en treedt er vergroving van de bodem op (Figuur 3.7). Initieel is de erosiesnelheid in de Boven-Waal groter en deze neemt af in de tijd. De vergroving draagt waarschijnlijk bij aan deze afname van de erosiesnelheid. De mate en de snelheid van vergroving is niet meegenomen in de kalibratie van de sedimenttransporten. Daarnaast blijven de binnenbochten bij de vaste lagen eroderen. Dit gebeurt ook in werkelijkheid, maar het model overschat dit waarschijnlijk. Door de erosie van de binnenbocht concentreert de stroming zich in de binnenbocht en ontstaan er net benedenstrooms van de vaste lagen sprongen in de waterstand bij OLA (Figuur 3.8). Analyse van het stromingspatroon rond de vaste laag leidt tot de hypothese dat dit wordt veroorzaakt door een vertraging van de stroming net benedenstrooms van de vaste lagen, maar dat is niet nader onderzocht.
- Midden-Waal: in de Midden-Waal is de initiële bodemerosie vergelijkbaar met de historische trend (Figuur 3.3). Figuur 3.4 laat echter zien dat de gradiënt in sedimenttransport naar benedenstrooms verplaatst. Dit zorgt voor een versnelling van de bodemerosie (Figuur 3.3).
- Pannerdensch Kanaal: de erosiesnelheid hier wordt bepaald door de waterstanden bij de IJsselkop en de sedimenttoevoer (grootte en samenstelling), wat in het referentiemodel resulteert in een eroderende trend conform de waargenomen trend.

[3] Deze modelinstelling is ontdekt nadat de referentieberekeningen waren afgerond en kon niet meer worden hersteld.
[4] Deze informatie is pas later beschikbaar gekomen.
[5] In het Grensregio-project zijn beide aspecten wel meegenomen omdat overeengekomen is met de Duitse partners dat deze van belang kunnen zijn voor de prognose van bodemontwikkeling in dit traject. Deze correctie leidt tot minder erosie op zowel de Niederrhein als de Bovenrijn.

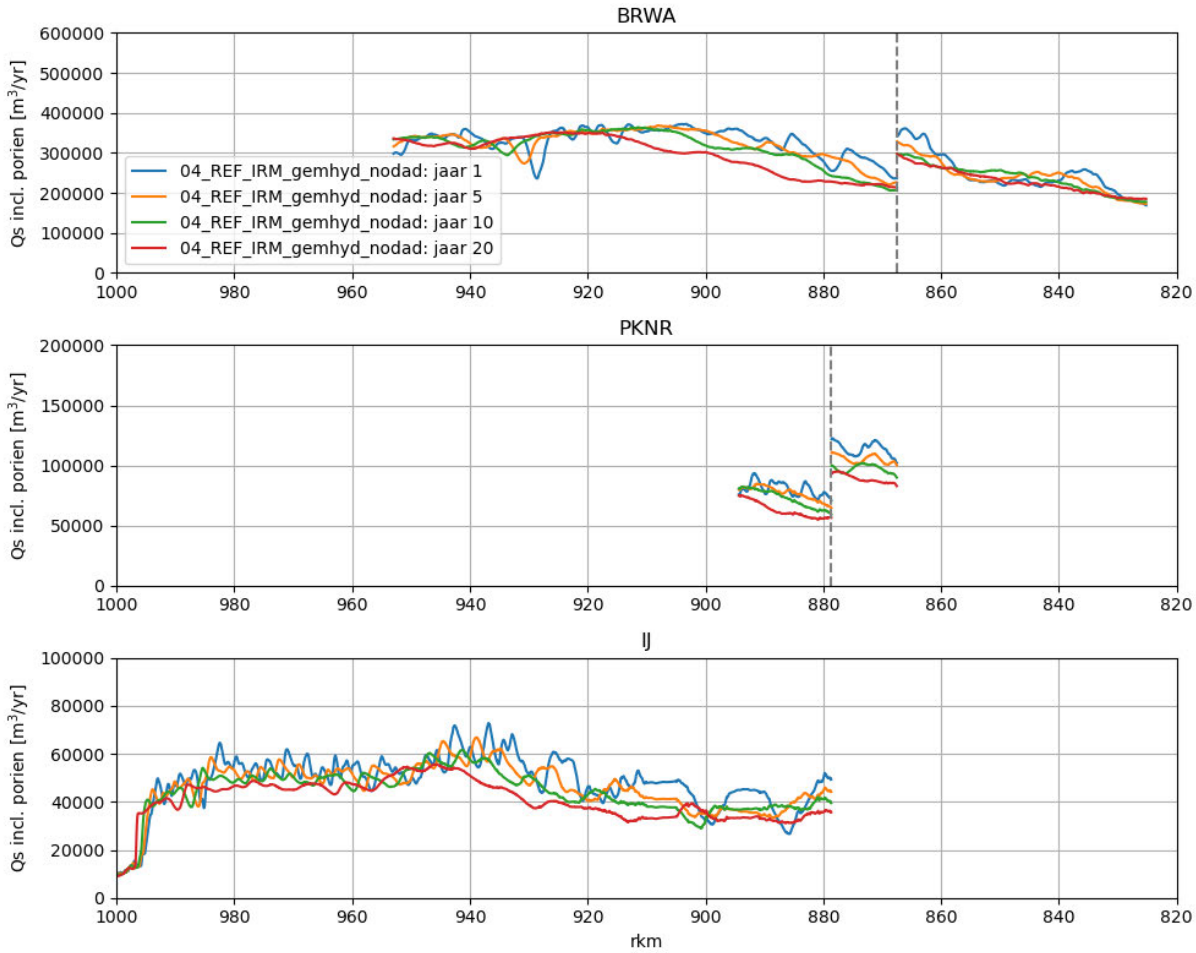
- IJssel en Nederrijn: de gemodelleerde erosie- en sedimentatietrends in deze riviertakken zijn niet overal in overeenstemming met de waargenomen historische trends. Specifiek voor deze takken ontbreekt de benodigde kennis en metingen om het sedimenttransport langs de takken, en de sedimentverdeling op het splitsingspunt goed te kunnen ijken[6]. Het resultaat van de parameterinstellingen in het referentiemodel is dat de Boven-IJssel min of meer stabiel is en dat de gradiënt in transport naar de Midden-IJssel verplaatst waardoor daar te veel erosie optreedt. De IJsselkop ontwikkelt zich dus tegenovergesteld aan wat wordt verwacht op basis van metingen.

In voorgaande studies is, ondanks bovengenoemde kanttekeningen, aangetoond dat het model de verplaatsingssnelheden van verstoringen goed beschrijft (Sloff et al, 2024) en dus geschikt is om trends in bodemveranderingen met juiste tijdschalen te beschrijven. De bovengenoemde verschillen tussen modelresultaten en metingen nemen we mee bij het ontwerpen van maatregelen en bij in de interpretatie van de modelresultaten. Hier gaan we verder op in, in de volgende paragraaf (paragraaf 3.4).

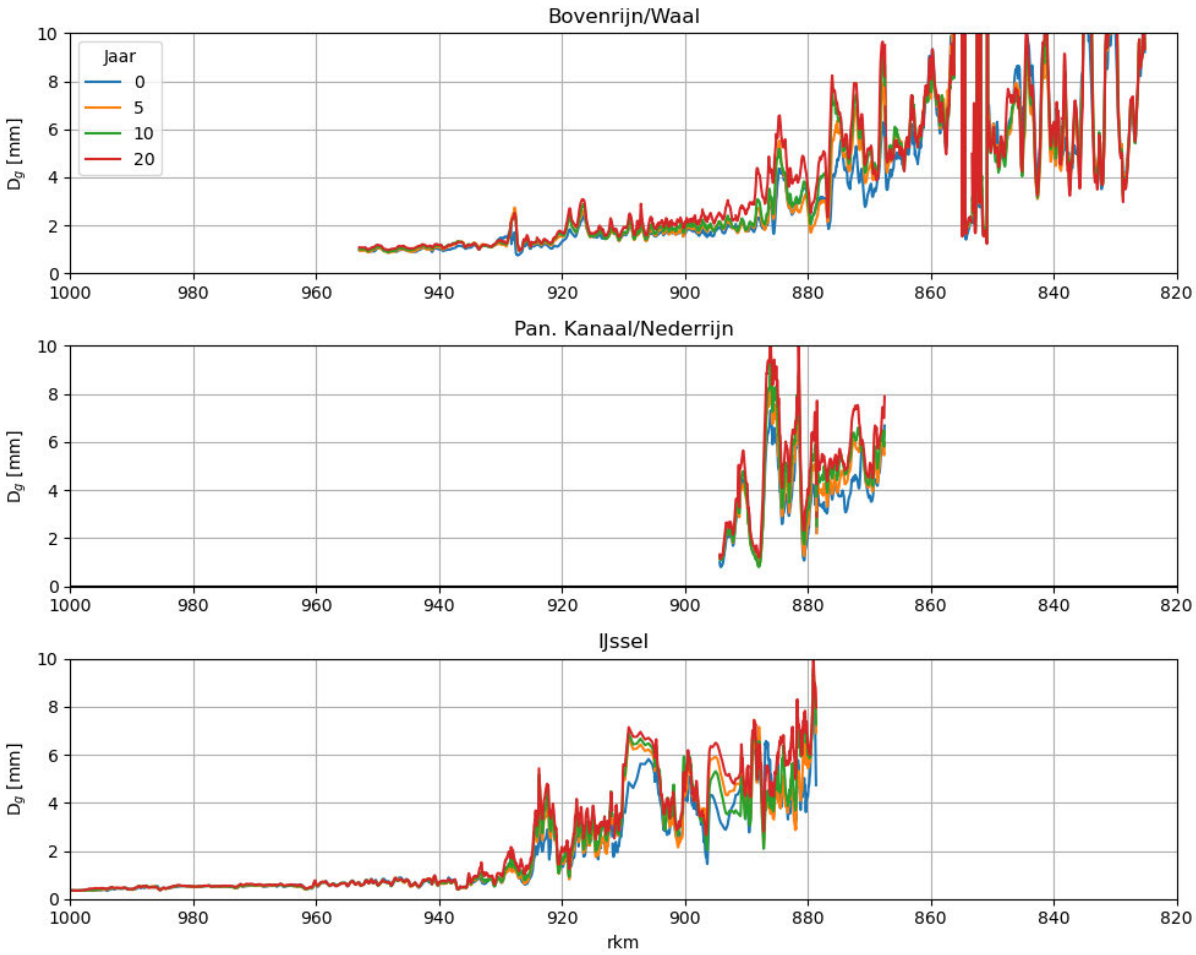
[6] Deltares heeft in gevoeligheidsberekeningen met verschillende instellingen voor parameters die de grootte van het sedimenttransport in takken, en daarmee ook de verdeling over het splitsingspunt, beïnvloeden laten zien dat ook een erosieve trend in de IJssel gevonden kan worden. Dergelijke aanpassingen in modelparameters kunnen dus veel uitmaken voor het resultaat met betrekking tot "absolute waarden". Deltares geeft echter aan dat het effect van maatregelen hier veel minder gevoelig voor is. Het vinden van het juiste set aan parameters vraagt om een diepgravende analyse, mogelijk extra metingen, en een uitvoerige kalibratie (wellicht i.c.m. gridverfijning). Dat valt buiten de scope van voorliggend onderzoek. Aanvullend kan de kanttekening geplaatst worden dat vooral op de IJssel de geobserveerde trends sterk afhangen van de periode waarvoor deze worden bekeken (Figuur 2.1).



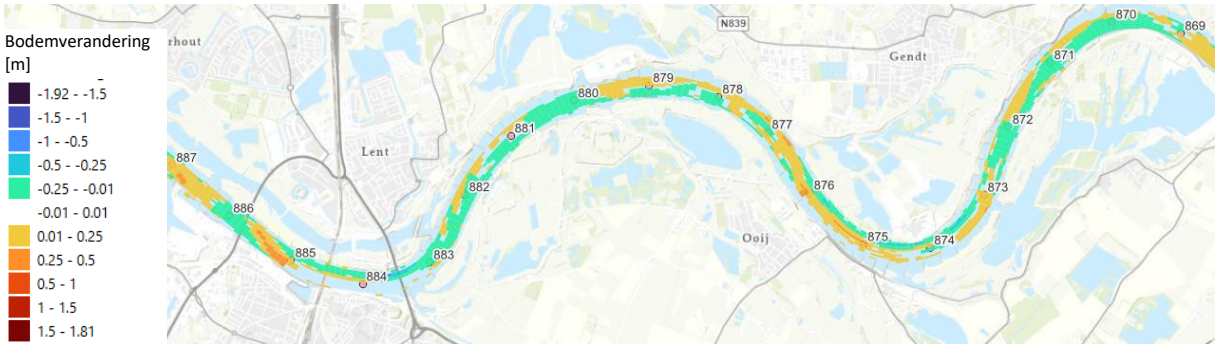
Figuur 3.3 Gemeten bodemtrends per riviertraject over 20 jaar (Tabel 2.1) vergeleken met de bodemtrends in het referentiemodel (04_REF_IRM).



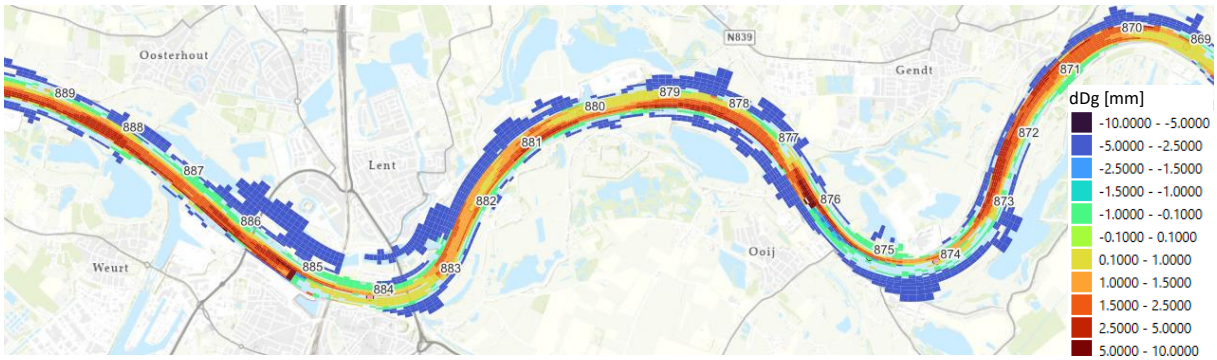
Figuur 3.4 Ontwikkeling van het sedimenttransport in het referentiemodel in de Bovenrijn/Waal, Pannerdensch Kanaal/Nederrijn en IJssel.



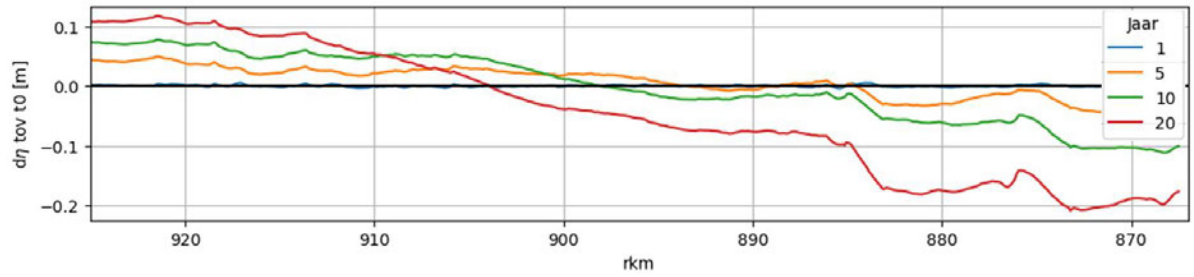
Figuur 3.5 Ontwikkeling van de korrelgrootte (Dg) op de rivieras voor de referentieberekening.



Figuur 3.6 Jaargemiddelde bodemverandering in de Boven-Waal na 20 jaar ten opzichte van t0.



Figuur 3.7 Berekende verandering in gemiddelde korreldiameter (Dg) van de actieve laag in de Boven-Waal na 20 jaar ten opzichte van t0. Positieve waarden zijn vergroving (rood/geel) en negatieve waarden zijn verfijning (groen/blauw).



Figuur 3.8 Waterstandsontwikkeling bij OLA op de Waal in de referentieberekening ten opzichte van t0.

3.4 Fit-for-purpose

Het morfologisch Delft3D model van de Rijntakken heeft de afgelopen jaren grote ontwikkelingsstappen doorlopen. In eerdere studies naar grootschalige maatregelpakketten om de bodemerosie tegen te gaan (bijv. Sloff et al. 2023) domineerden de verouderde gegevens in het referentiemodel de morfologische ontwikkeling. Sloff et al. (2024) hebben de geometrie geüpdatet en het sedimenttransport gekalibreerd. Binnen het Grensregio-project is de kalibratie verder gedetailleerd zodat het model ook met andere hydrografen leidt tot bodemtrends die in lijn zijn met waargenomen trends. Het resultaat is een model dat significant beter presteert in het beschrijven van de grootschalige ontwikkeling. Daarnaast is het voor de maatregelen die in deze studie worden beschouwd nodig om de tweedimensionale bodemveranderingen in beeld te brengen. Het huidige Delft3D model is daarom de meest geschikte tool om de effecten van verschillende type maatregelen op de grootschalige rivierbodemontwikkelingen en afvoerverdeling te onderzoeken.

In deze paragraaf geven we een overzicht van bronnen van onzekerheid in de modelresultaten. In de laatste sectie vatten we dit samen en geven we inzicht in het toepassingsbereik van het model.

3.4.1 Splitsingspuntengebied

De morfologische ontwikkeling van de Rijntakken wordt bepaald door de bovenstroomse sedimenttoevoer en de verdeling (grootte en samenstelling) van het sediment bij de splitsingspunten. De sedimenttoevoer in de Bovenrijn wordt sterk beïnvloed door suppleties en vaste lagen in het Duitse deel. Daarnaast is de bodem van de Bovenrijn relatief grof wat ervoor zorgt dat sedimenttoevoer vooral optreedt bij hoge afvoeren.

Het is onduidelijk in welke mate deze processen bijdragen aan de langetermijnontwikkeling van de Bovenrijn en dit soort processen zijn niet of beperkt meegenomen in het toegepast Delft3D-model. Deze onzekerheid in bovenstroomse sedimentaanvoer (grootte en samenstelling) werkt direct door naar de benedenstroomse takken.

Verschillende processen spelen een rol bij de sedimentverdeling bij het splitsingspunt. De werkelijke sedimentverdeling op het splitsingspunt laat zich lastig meten en is grotendeels nog onbekend; de uitwerking ervan op de bodemligging en bodemsamenstelling is echter wel bekend. Het model is daarom gekalibreerd om het gedrag van de trends in gemeten bodemligging rond de splitsingen zo goed mogelijk te reproduceren. Maar daarbij is het niet mogelijk om te valideren of de resulterende sedimentverdeling in het model de complexiteit en details van de werkelijke sedimentverdeling volledig beschrijft. In het gekalibreerde model is nog sprake van verschillen in kalibratiefactoren per riviertak, terwijl er geen grote verschillen zijn in type rivierbedding die dergelijke verschillen (kunnen) verklaren. Het is onduidelijk of deze noodzaak voor verschillende factoren voortkomt uit onvolkomenheden in de sedimentverdeling op de splitsing, of onvolkomenheden in de berekende sedimenttransportcapaciteit in de takken zelf.

3.4.2 Dwarshellingen

De mate waarin een bodemhelling de richting van het sedimenttransport beïnvloedt, wordt met name bepaald door de dwarshellingsrelatie (d.w.z. de invloed van zwaartekracht op sedimentkorrels die langs een dwarshelling bewegen) en door secundaire circulatiestroming (d.w.z. spiraalstroming in bochten). De eerder gekalibreerde parameters van de dwarshellingsrelatie zijn bij de aanpassing van de sedimenttransporten niet opnieuw aangepast. Sloff et al. (2024) laat zien dat in de Boven-IJssel de dwarshellingen onderschat worden. In het referentiemodel is te zien dat ook in de Boven-Waal de dwarshellingen afnemen in tijd (Figuur 3.4), in combinatie met veranderingen in bodemsamenstelling (zowel in langs- als in dwarsrichting). Echter ook in de gemeten ontwikkeling van de bodem in de Boven-Waal is dit gedrag opgetreden, maar is er nog geen onderzoek uitgevoerd om dit gedrag te verklaren. Vooralsnog wordt gesteld dat het effect op de grootschalige ontwikkeling van een riviertak beperkt is. De grootste impact wordt verwacht op de rivierfuncties zoals scheepvaart aangezien ondieptes en vaargeulonderhoud vooral in binnenbochten optreden.

3.4.3 Vaste lagen

De hoogteligging en ruwheid van de vaste lagen en de bijbehorende binnenbochten zijn bepalend voor de waterstanden in de Waal bij laagwater. Over het functioneren van de vaste lagen in het veld is nog veel onbekend doordat de driedimensionale stromingen en turbulentie hier grote invloed op hebben. In Delft3D is de ontwikkeling van de alluviale bodem rond de vaste lagen erg gevoelig voor de ruwheid van de vaste laag (Sloff et al., 2024). In het referentiemodel erodeert de binnenbocht (Figuur 3.6) net als in het veld, wat aangeeft dat principes van herverdeling van sediment en stroming door het model correct worden benaderd. De erosie in de binnenbocht lijkt door het model echter iets te worden overschat. Daarnaast reproduceert het model de (kleinschalige-) details tot vorming van de erosiekuil benedenstrooms van de vaste laag niet volledig, waardoor de omvang van de kuil slechts bij benadering kan worden gesimuleerd met dit model. Hoe de vaste laag in het veld functioneert (hydrodynamisch en morfologisch), hoe dit nog beter in Delft3D kan worden geschematiseerd en wat het effect van maatregelen is op het functioneren van de vaste laag is een onderzoek an sich en valt buiten de scope van deze studie.

3.4.4 Conclusie

Het referentiemodel is in staat om voor de meeste trajecten de bodemontwikkeling en afvoerverdeling te reproduceren ondanks de gevoeligheid van het systeem voor modelkeuzes, zoals de hydrograaf en keuzes voor afzonderlijke parameters (zoals de ruwheden, de ripple factor en kalibratiefactor voor sedimenttransport). De voorspelcapaciteit van het morfologische model wordt beperkt door de onzekerheden in de schematisatie, processen en toekomstige afvoeren. Bij het presenteren van absolute waarden moet deze onzekerheid worden meegenomen. DVR-studies hebben in het verleden echter laten zien dat het model geschikt is voor een effectbepaling van maatregelen. De verwachting is dat met de meest recente update van het morfologisch model de onzekerheden in de schematisatie bij een effectbepaling niet meer overheersend zullen zijn voor het eindresultaat.

Op basis van deze observaties concluderen we dat het numerieke model een belangrijk en geschikt hulpmiddel is voor de effectbepaling van maatregelen. In het resultatenhoofdstuk en de effectbeoordeling ligt de focus daarom op de **relatieve effecten** van de maatregelpakketten. Dat betekent dat we niet zozeer kijken naar de absolute bodemontwikkeling, afvoerverdeling, of effecten op het stroombeeld, maar naar verschillen met ofwel een referentieberekening, ofwel de initiële toestand. Om te komen tot een goed advies is het begrijpen van de resultaten en de interpretatie daarvan door experts in morfologische studies essentieel.

4 Maatregelpakketten

4.1 Inleiding: globale omschrijving maatregelpakketten

In deze studie ligt de focus van de maatregelpakketten op het stoppen van bodemerosie in de Waal en de IJssel. Het Pannerdensch Kanaal is relatief kort waardoor de invloeden van waterstandsverandering op de IJsselkop door maatregelen in de IJssel en Nederrijn (stuwbeheer) door stuwkrommes doorwerken op stroomsnelheden en sedimenttransport over de hele lengte van het Pannerdensch Kanaal en op de afvoer en sedimentverdeling op de Pannerdense Kop. In combinatie met het huidige stuwbeheer en deze stuweffecten blijkt dat de bodemontwikkeling in het Pannerdensch Kanaal vooral wordt bepaald door de ontwikkeling van de IJssel. De verwachting is dat door maatregelen in de IJssel te nemen, deze ook effectief zijn voor het beperken van de erosie in het Pannerdensch Kanaal.

Om inzicht te krijgen in de mogelijke beleidskeuzes zijn vier onderscheidende maatregelpakketten vastgesteld. De in het volgende hoofdstuk gerapporteerde resultaten en analyses van de vier maatregelpakketten zijn in verschillende iteraties en in nauw overleg met de bij het onderzoek betrokken experts tot stand gekomen. In dit hoofdstuk beschrijven we de maatregelpakketten in de vorm van doelen en uitgangspunten. Een deel van de uitgangspunten volgt uit tussenstappen in de berekeningen; dat geven we expliciet aan waar relevant. Alle berekeningen uit dit onderzoek zijn uitgevoerd met een (jaarlijkse herhalende) hydrograaf die representatief is voor het gemiddelde toekomstige klimaat met klimaatverandering (2050Hd, zie paragraaf 3.1.2).

MP1: Niets doen
Dit maatregelpakket is de referentie waarbij de bodemerosie onverminderd doorzet. Dit maatregelpakket geeft inzicht in het effect van doorgaande rivierbodemerosie op de rivierfuncties op de verschillende riviertakken als er geen maatregelen worden genomen.

MP2: Suppleties
Het doel van dit pakket is om de grootschalige bodemerosie te stoppen door het uitvoeren van suppleties. Het uitgangspunt is hierbij dat gebruik wordt gemaakt van extern materiaal. Het pakket richt zich op de Waal en IJssel.

De grootte van de suppletie is niet constant in ruimte en tijd. Afhankelijk van de afvoercondities, de verplaatsing van het erosiefront en de verplaatsing van de suppletie zal het benodigde suppletie volume variëren in de tijd. We gaan er in dit maatregelpakket vanuit dat initieel het sedimentvolume wordt neergelegd wat nodig is om de lokale gemeten erosietrend te compenseren. De bodemligging die hoort bij deze initiële suppletie wordt elk jaar onderhouden. Wanneer de erosie sneller gaat dan verwacht zal er dus meer sediment gesuppleerd moeten worden. En vice versa.

MP3: Meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen op de Waal
Het doel van dit maatregelpakket is om de bodemerosie in de Waal te stoppen door het aanleggen van het meergeulenconcept middels langsdammen met oevergeulen (Sloff et al. 2023). In het meergeulenconcept wordt een extra oevergeul naast de hoofdgeul aangelegd.

Deze oevergeulen onttrekken bij middelhoge en hoge afvoeren afvoer uit het zomerbed en verlagen daarmee het sedimenttransport in de hoofdgeul. Deze verlaging is nodig voor het stoppen van de rivierbodemerosie.
Binnen het meergeulenconcept kan gevarieerd worden met de mate van versmalling van de hoofdgeul. Van geen versmalling tot maximale versmalling, rekening houdend met de minimale vaarwegbreedte. Hoe meer de hoofdgeul wordt versmald, hoe meer laagwaterstanden kunnen worden opgestuwd. Versmalling van de hoofdgeul zorgt echter ook voor een toename van het sedimenttransport en versterkt daarmee de kans op de bodemerosie in het laagwaterseizoen. Een grotere versmalling van het zomerbed is dus weliswaar positief voor de opzet van de laagwaterstanden, maar moet gecompenseerd worden met grotere oevergeulen om netto het sedimenttransport te verminderen. Vooral op de Midden-Waal is de opgave zelfs zonder versmalling al groot omdat in het model de sedimenttransportcapaciteit met 30-40% omlaag moet worden gebracht (paragraaf 2.2).
In dit onderzoek is iteratief toegewerkt (zie Bijlage C) naar twee varianten die zijn doorgerekend voor een periode van 20 jaar:

- 40 m versmalling over de hele Waal voor maximale waterstandsopzet (‘LD-v12’)
- 40 m versmalling op de Boven-Waal en 20 m versmalling op de Midden-Waal (‘LD-v16’).

MP4: Maximale synergie

Het doel van MP4 is het stoppen van de bodemerosie in de Waal en IJssel met maximale synergie met andere opgaven vanuit PAGW, DPZW en het vergroten van de afvoercapaciteit. De focus ligt hierbij op het verhogen van de laagwaterstanden en het beïnvloeden van de gewenste afvoerverdeling tijdens laagwater. Vanuit DPZW is namelijk aangegeven dat de voorlopig gewenste afvoerverdeling moet inhouden dat er bij 1300 m^3/s Lobithafvoer 285 m^3/s over de IJssel en 30 m^3/s over de Nederrijn stroomt. Dit houdt in dat er 57 m^3/s meer naar de IJssel moet gaan in vergelijking tot de huidige situatie (zie Gensen et al, 2025).

Voor de Waal wordt uitgegaan van een meergeulenconcept. Dit meergeulenconcept kan op twee manieren worden gerealiseerd: een constructieve variant zoals in MP3 en een natuurlijke variant, geïnspireerd op het Plan voor Levende Rivieren van het WNF. In dit plan worden de oevergeulen vervangen door nevengeulen, worden zomerkades verlaagd en ooibossen geplant op eilanden tussen het zomerbed en de nevengeul. Net als in MP3 wordt het zomerbed versmald om bij lage afvoeren de waterstanden op te zetten.

In de IJssel is de opgave om te verruimen bij laagwater, zodat de IJssel meer water trekt voor de zoetwatervraag, en ook de bodemerosie wordt tegengegaan. Vanuit de studie laagwater afvoerverdeling (Gensen et al. 2025) volgt dat een combinatie van langsdammen in de Waal (30 m versmalling) met een zomerbedverbreding van de Boven-IJssel (15 m) over 10 km leidt tot de gewenste laagwaterafvoerverdeling. De verwachting is dat zomerbedverbreding ook voor aanzanding in de Boven-IJssel zal zorgen. Een tweede variant focust op de bochtafsnijding bij het Zwarte Schaar. Het ongedaan maken van bochtafsnijdingen verlengt de IJssel en leidt daarmee bovenstrooms van de maatregel tot stabilisatie van de bodemligging (stoppen bodemerosie) of zelfs netto sedimentatie. In het verleden zijn er twee bochtafsnijdingen in de Boven-IJssel uitgevoerd. Door de oorspronkelijke meander het Zwarte Schaar bij morfologisch relevante afvoeren weer aan te sluiten is de verwachting dat de bodemerosie in de Boven-IJssel en het Pannerdensch Kanaal wordt beperkt.

In MP4 zijn dus drie varianten van MP3 doorgerekend:
1. Een natuurlijke variant voor de Waal gebaseerd op het plan Ruimte voor Levende Rivieren.
2. De langsdammen in de Waal (MP3) met een verbreding van de Boven-IJssel.
3. De langsdammen in de Waal (MP3) met een heraansluiting van het Zwarte Schaar.

In dit hoofdstuk worden de maatregelen in meer detail beschreven met daarbij ook de manier van implementeren in Delft3D. De uitgangspunten voor MP1 en de resultaten zijn beschreven in Hoofdstuk 3.

4.2 MP2: Suppleties

4.2.1 Uitgangpunten

Op basis van literatuuronderzoek en twee testberekeningen met het voorliggende model zijn de volgende uitgangspunten voor het maatregelpakket met suppleties vastgesteld:

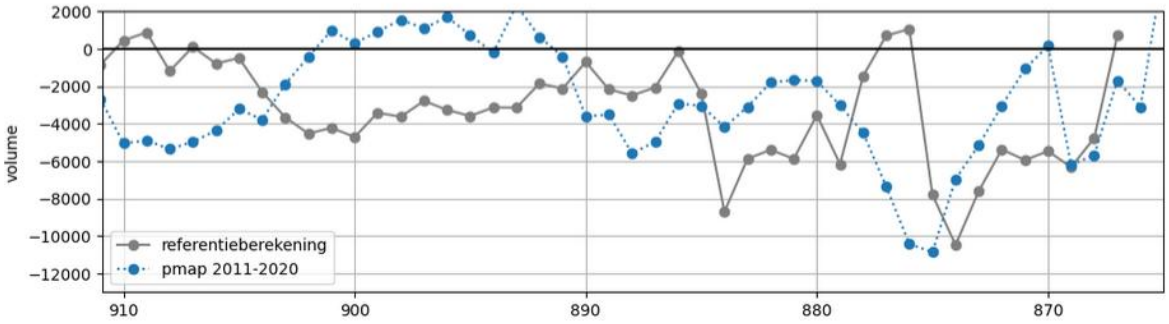
- er wordt alleen gesuppleerd op de Waal en IJssel.
- De suppletie moet ruimtelijk worden verdeeld. De verplaatsingssnelheid van verstoringen in de Waal is ongeveer 1 km/jaar. Door bijvoorbeeld alleen bovenstrooms te suppleren duurt het tientallen jaren voordat de suppletie alle eroderende delen bereikt.
- De modelstudies van Ylla Arbós et al (2024) en Czapiga et al (2022) laten zien dat het suppleren van relatief grof sediment positief kan zijn voor beperken van erosie op de suppletielocatie, maar negatieve gevolgen kan hebben door erosie benedenstrooms. Hoewel deze uitkomsten onzeker zijn omdat er geen validatiegegevens zijn, wordt ervoor gekozen de risico's te beperken door te suppleren met gebiedseigen materiaal (materiaal met een samenstelling die past bij het bodemsediment dat wordt getransporteerd).
- Wanneer er sedimentklassen gesuppleerd worden die in het model niet mobiel zijn (op die locatie) zorgt dat ervoor dat een deel van het sediment niet of beperkt bijdraagt aan het bodemtransport (en daarmee het tegengaan van bodemerosie).
- De mate van erosie in de Waal en IJssel wordt sterk bepaald door de hydrograaf (Figuur 2.1). Daarnaast verandert de sedimenttransportgradiënt en locatie daarvan in tijd (Figuur 3.4). Zowel het suppletievolume als de -locaties moeten dus variabel zijn.
- In de Waal en IJssel lijkt het benedenstrooms suppleren om een waterstandsopzet te bereiken, onvoldoende om ook de bodemerosie bovenstrooms van de suppletie tegen te gaan.
- Uit testberekeningen in de beginfase van het project met alternatieve suppletiestrategieën (suppleren vanuit bovenstrooms versus vanuit benedenstrooms) is gebleken dat specifiek in de smalle en bochtige Boven-IJssel de dwarshelling in bochten zeer gevoelig is voor afvoer- en waterstandsvariaties door de kleine breedte/diepte verhouding. Suppleren in de Boven-IJssel kan daardoor leiden tot ondiepere binnenbochten. Er is daarom gekozen om in de IJssel grover materiaal te suppleren, zodat dit effect zoveel mogelijk wordt tegengegaan (zie paragraaf 4.2.2).
- De grootte en locaties van de benodigde suppletievolumes kan verschillen in het model en in werkelijkheid onder invloed van onzekerheden in afvoerregime, schematisatie en processen. Uit de vergelijking tussen gemeten bodemligging in verschillende periodes (zie figuur 2.1) volgt dat de trends plaatselijk en in de tijd sterk kunnen variëren, en dus een adaptieve suppletie-aanpak vraagt. De rivier is in transitie door diverse ingrepen en door variabiliteit in afvoeren en bodemsamensteling.

Ook in de prognoses van het Delft3D model volgt variabiliteit in de trends, maar die zijn mogelijk anders dan de historische trends doordat het systeem zich verder ontwikkelt, en omdat er een andere hydrograaf wordt toegepast (klimaatscenario in plaats van historische afvoeren). Het Delft3D model is geschikt om het effect van maatregelen goed in beeld te brengen, maar minder geschikt voor het voorspellen van de exacte benodigde suppletiehoeveelheden. Om inzicht te krijgen in het effect van suppleties is daarom gekozen om het initiële suppletievolume op te leggen, waarbij het volume op basis van langjarige historische trends is bepaald. De suppletie wordt gelegd in de diepere delen van de rivier langs de eroderende trajecten, om zo min mogelijk hinder voor de bevaarbaarheid te veroorzaken. De diepste delen wordt bepaald ten opzichte van het referentievlak bij OLA, maar we hanteren geen check op "minimale resterende diepte", omdat de suppletie plaatsvindt in de diepste delen en in relatief grote vakken waardoor er in de berekeningen voldoende ruimte is voor de suppleties.

4.2.2 Vormgeving maatregel en implementatie Delft3D

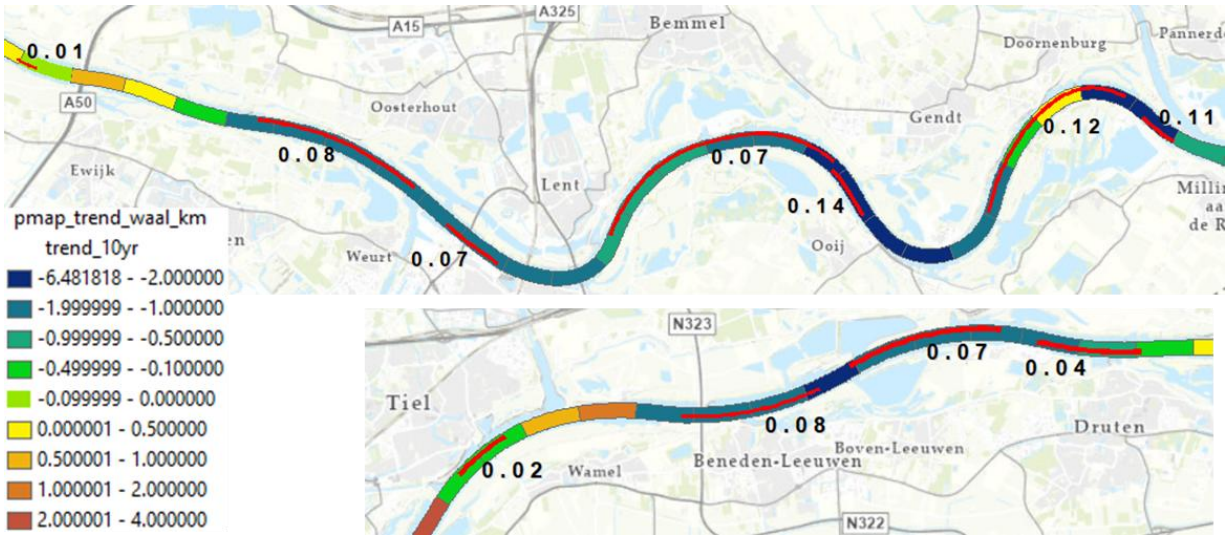
Waal

Figuur 4.1 geeft de benodigde volumes weer op basis van de PMAP-trend (paragraaf 2.1) en het referentiemodel. Het referentiemodel geeft een toekomstige trend weer op basis van klimaatverandering en is dus anders dan de historische PMAP-trend (zie paragraaf 3.3). Initieel krijgen we hiermee inzicht in het effect van een realistische suppletie en doordat Delft3D zelf het jaarlijkse suppletievolume bepaalt wordt dit initiële verschil tussen het suppletievolume en modelmatige erosievolume automatisch verkleind.

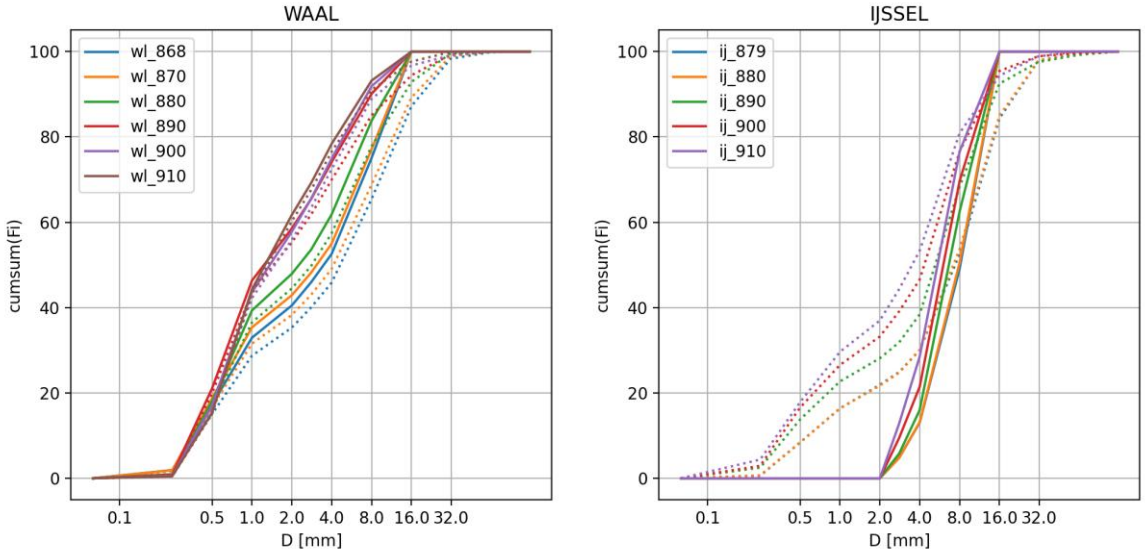


Figuur 4.1 Volume horende bij de bodem per jaar in de Waal volgens de referentieberekening en de PMAP-trend. Een negatief volume is gelijk aan een benodigd suppletievolume.

Figuur 4.2 geeft de PMAP-trend tussen 2011-2020 ruimtelijk weer. Vanuit scheepvaart is de eis dat de bodem lager moet liggen dan OLR-3,5 m (= 2,8+25%). We gebruiken echter OLR-4,0m als criterium om zeker te zijn dat er ruimte is voor een suppletiedikte van 0,5 m zonder dat dit direct effect heeft op de bevaarbaarheid. De stortvakken liggen daar waar de bodem onder OLR-4 m ligt en waar volgens de PMAP-trend erosie optreedt. Wanneer er in een erosietraject geen ruimte is om te storten wordt dit volume toegevoegd aan een bovenstrooms stortvak. De resulterende stortvakken en laagdiktes zijn in Figuur 4.2 weergegeven. Het initiële stortvolume is 139.409 m^3 inclusief poriën wat qua orde grootte goed overeenkomt met het jaarlijks (gemeten) sedimenttekort in de Waal (hoofdstuk 2). Figuur 4.3 geeft per 10 km de korrelgrootteverdeling van de suppletie weer. Deze is gebaseerd op een 10 km gemiddelde korrelgrootteverdeling die ook als basis is gebruikt voor de modelopzet (Sloff et al. 2024). Sediment met een korrelgrootte >16 mm komt bij de opgelegde hydrograaf niet in beweging en is daarom niet meegenomen in de suppletie.



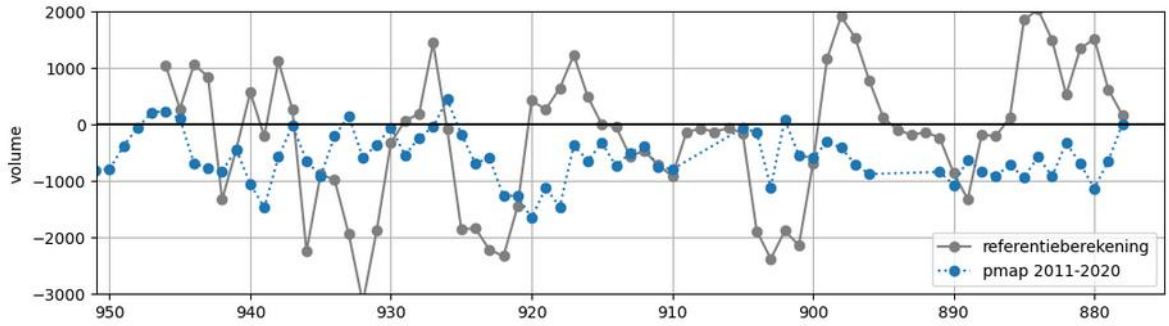
Figuur 4.2 PMAP-trend tussen 2011-2020 en de geselecteerde stortvakken (rode stroken) in de diepe delen met daarbij de initiële laagdikte in meters.



Figuur 4.3 De korrelgrootteverdeling van de suppleties in de Waal en de IJssel per 10 km (gestippelde lijnen) en die van de suppletie. In de Waal zijn geen immobiele sedimentklassen meegenomen, waardoor het suppletiemateriaal fijner is dan het lokale bodemmateriaal. In de IJssel moet relatief grof materiaal gesuppleerd worden (zie paragraaf 4.2.1) en daarom zijn de zandklassen weggelaten. Daarnaast zijn ook de immobiele sedimentklassen weggelaten.

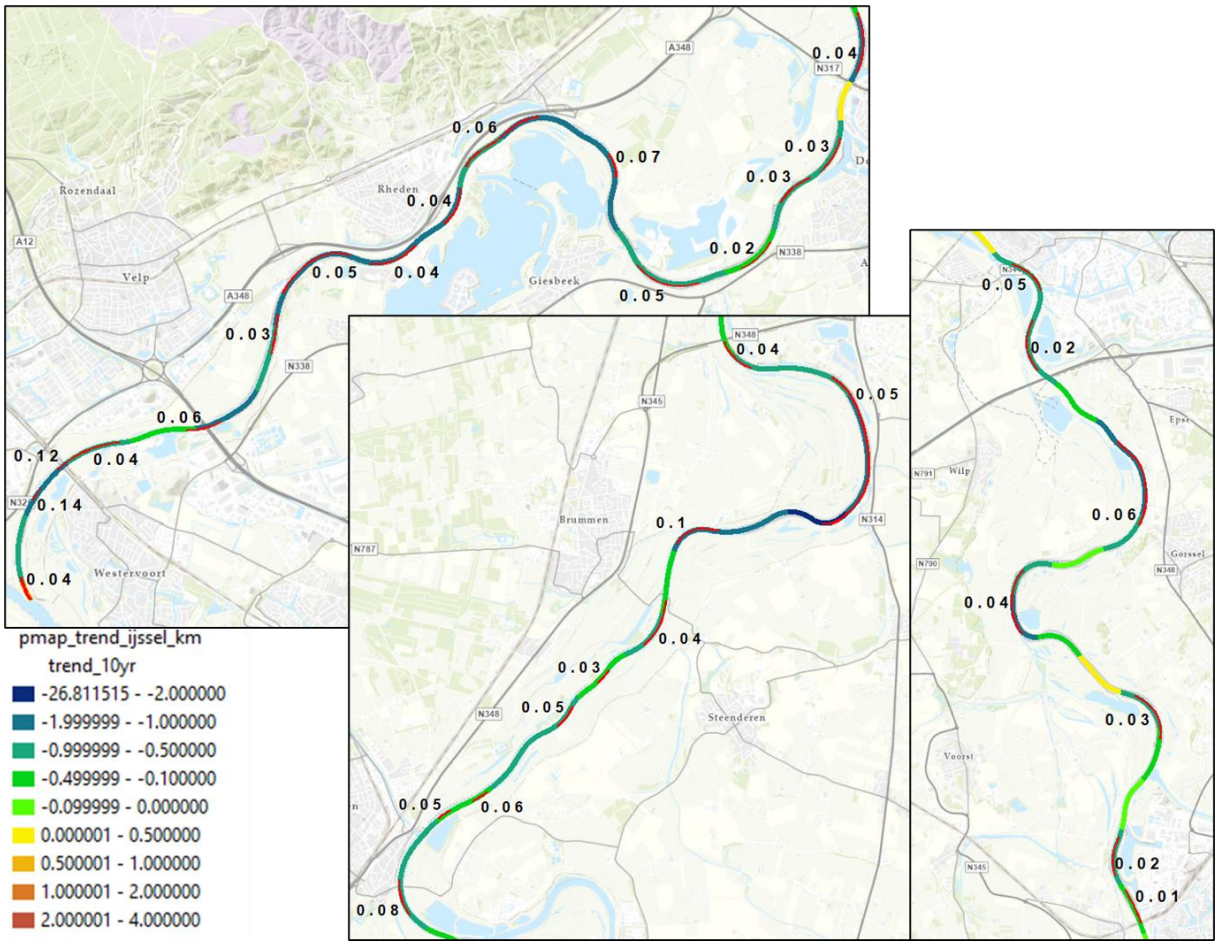
IJssel

Figuur 4.4 geeft de volumeverandering weer op basis van de PMAP-trend en de referentieberekening in de IJssel. Op basis van de PMAP-trend in de afgelopen 10 jaar is er duidelijke erosie te zien. Echter is de verwachting dat deze erosie in de toekomst afneemt (Ylla Arbos et al., 2019). Daarnaast zullen door de veranderingen in de hydrograaf de trends veranderen wat mogelijk de verschillen in erosie en sedimentatie uit paragraaf 3.3 verklaart. Door de suppletie te bepalen op basis van de PMAP-trend wordt initieel een te grote suppletie in het model aangebracht. Doordat het model daarna zelf het jaarlijkse volume bepaalt is het effect op de bodemligging beperkt.



Figuur 4.4 Volume horende bij de bodem per jaar in de IJssel volgens de referentieberekening en de PMAP-trend. Een negatief volume is gelijk aan een benodigd suppletievolume. Een positief volume is sedimentatie.

Figuur 4.5 geeft de stortvakken voor de IJssel weer. In de IJssel moet bij OLA een diepte aanwezig zijn van 3,13 m (= 2,5+25%) voor de scheepvaart. Daarom is OLR-3,33 m als criterium gebruikt voor de stortvakken wat ruimte biedt voor 0,2 m suppletiedikte. Door het bochtige karakter van de IJssel leidt dit tot veel relatief korte en kleine stortvakken. De keuze is gemaakt om deze niet samen te voegen omdat dit tot ongewenste bulten in de bodemligging kan leiden die problematisch kunnen zijn voor de bevaarbaarheid. Initieel wordt in totaal 37.000 m^3 in de IJssel gesuppleerd. Testberekeningen lieten zien dat het suppleren van gebiedseigen materiaal leidt tot ondiepere binnenbochten in de IJssel. Om hiervoor te corrigeren wordt relatief grof (maar wel mobiel) materiaal gesuppleerd, door de zandklassen niet in de suppletie mee te nemen (Figuur 4.3). In de Boven-IJssel komt het suppletiemateriaal daarmee redelijk overeen met het bodemmateriaal dat in de buitenbochten ligt.



Figuur 4.5 PMAP-trend tussen 2011-2020 en de geselecteerde stortvakken in de diepe delen met daarbij de initiële laagdikte in meters.

4.3 MP3: Meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen Waal

4.3.1 Uitgangspunten en ontwerpprincipes

Voor de schematisatie van het meergeulenconcept in Delft3D is een aantal keuzes gemaakt:

- de mate van versmalling van het zomerbed en de breedte van de oevergeulen moet overeenkomen met de breedte van 1 of meerdere roostercellen uit het modelinstrumentarium. Dit betekent dat we een versmalling kunnen modelleren van ongeveer 20 m (1 roostercel) of 40 m (2 roostercellen).
- De langsdam en de instroomdrempel moeten zowel in de bodemhoogte als in de overlaten worden meegenomen.
- Het is onduidelijk hoe goed Delft3D de sedimenttoevoer naar oevergeulen in een relatief grof model schat. Er zijn ter plaatse van de reeds bestaande langsdammen geen meetgegevens beschikbaar van deze sedimenttoevoer waarmee de uitkomsten van het model kunnen worden gevalideerd. De oevergeulen zijn daarom in het model niet erodeerbaar gemaakt om onrealistische erosie te voorkomen, maar om wel de mogelijkheid te bieden eventuele netto sedimentatie in de oevergeulen in het model te kwantificeren.

- Hoewel het de voorkeur heeft om het rooster aan te passen zodat deze precies uitlijnt op de beoogde langsdammen en zodat de morfologische breedte van het zomerbed constant is, kost dit een relatief grote inspanning en veel extra rekenwerk (ook de referentie moet worden aangepast) terwijl dit slechts een geringe verbetering van het resultaat oplevert. Gezien het verkennende karakter van dit onderzoek is daarom de keuze gemaakt om het rooster niet aan te passen.

De uiteindelijk doorgerekende en gerapporteerde varianten voor MP3 zijn tot stand gekomen op basis van een groot aantal hydraulische en morfologische (test)berekeningen en discussies met de experts (zie Bijlage C voor details en uitgevoerde iteraties). Uit deze testberekeningen is gebleken dat:

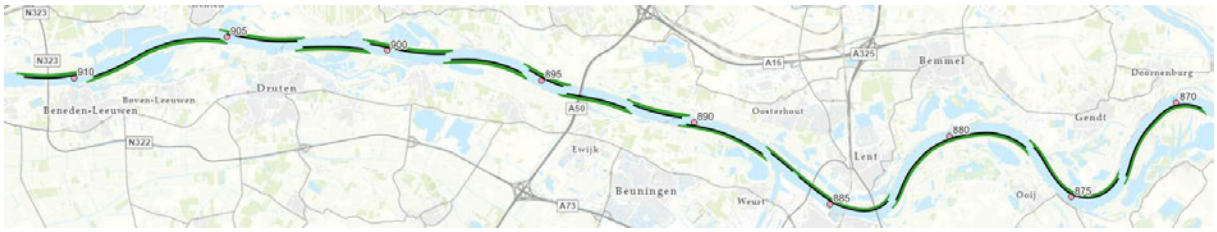
- het meergeulenconcept (versmallen zomerbed i.c.m. oevergeulen) een balans vormt tussen erosie en waterstandsopzet door versmalling bij lage afvoeren (voor scheepvaartdiepte) en verruiming bij middelhoge afvoeren voor sedimentatie, en in benedenstroomse richting toenemende verruiming om de sedimenttransportgradiënt te neutraliseren. Onder bepaalde afvoerregimes (vooral in natte periodes) kan waterstandsverlaging door oevergeulen in de Midden-Waal leiden tot waterstandseffecten in de Boven-Waal die daar juist tot extra erosie kunnen leiden als daar minder is verruimd.
- De versmalling van de hoofdgeul zorgt voor een reductie van het doorstroomprofiel van de hoofdgeul. De mate van aanpassing van het doorstroomprofiel zorgt voor bodemveranderingen. Een langsdam in de (ondiepere) binnenbocht zorgt met dezelfde versmalling dus voor minder vernauwing van het profiel dan een langsdam in de buitenbocht.
- Overlap tussen de langsdammen aan tegenover elkaar gelegen oevers moet worden voorkomen om grote lokale erosie door plaatselijke versmalling te voorkomen. Daarnaast is het belangrijk om de in- en uitstroomopeningen te stroomlijnen zoals bijvoorbeeld bij de bestaande langsdammen.
- De versmalling van de hoofdgeul en verruiming van het totale zomerbed a.g.v. aanleg van oevergeulen op de Midden-Waal veroorzaken waterstandsveranderingen die in grote mate de grootte van de stroombeelden en daarmee de dimensies van de oevergeulen op de Boven-Waal bepalen. Er is dus sprake van een nauw samenspel tussen de vormgeving en dimensionering van de oevergeulen over de gehele riviertak.
- Het meergeulenconcept moeten worden toegepast als systeemmaatregel en dus over een geheel traject. Alternatieven zijn aanvullende maatregelen als grote verruimingen of suppleties. Wanneer er op bepaalde trajecten geen langsdammen met oevergeulen worden aangelegd leidt dit namelijk tot grote erosie omdat hier de sedimenttransportcapaciteit niet is aangepast. Deze erosie leidt tot waterstandsdaling en kan bovenstrooms de verruiming tenietdoen.
- Wanneer het meergeulenconcept wordt toegepast op de hele Waal, de benodigde verruiming in de Midden-Waal voor het vlaktrekken van de sedimenttransportgradiënt dusdanig groot is, dat oevergeulen bij de bestaande langsdammen niet meer voldoen. Daar zal bij een dergelijke grootschalige toepassing een veel grotere verruiming noodzakelijk zijn.
- Uit de trendanalyses van langjarige gemeten bodemveranderingen volgt dat tussen Sint-Andries en Zaltbommel de overgang plaatsvindt van een eroderende Waal naar een sedimenterende Waal. De verwachting is dat daarom de langsdammen tot Zaltbommel moeten worden aangelegd om de bodemerosie over de gehele Waal effectief te stoppen. In dit onderzoek wordt het traject tot de huidige langsdammen beschouwd. Benedenstrooms van dit traject wordt gesuppleerd om de bodemerosie die ontstaat door implementatie van MP3 te compenseren en zo waterstandsdaling (richting bovenstrooms) te voorkomen.

- De oevergeulen zanden aan. Dit proces wordt in het model waarschijnlijk overschat omdat de oevergeulen in het model alleen kunnen aanzanden (we modelleren geen doorgaand sedimenttransport in de oevergeulen. Daarnaast worden in het model de geulen jaarlijks onderhouden en het gebaggerde sediment wordt lokaal in het zomerbed teruggestort. Hiermee wordt de mate van verruiming (i.e. afvoeronttrekking uit het zomerbed) gelijk gehouden en blijft het sediment behouden voor het zomerbed.

4.3.2 Vormgeving maatregel en implementatie Delft3D

De locatie en lengte van de langsdammen is gebaseerd op het Globaal ontwerp langsdammen (HKV, 2015) en het Plan Ruimte voor Levende Rivieren[7]. De langsdam ligt altijd in de binnenbocht zodat deze buiten de vaargeul ligt. Hier is de waterdiepte het kleinst en dus hoeft de langsdam minder groot te zijn. Daarnaast zorgt deze keuze ervoor dat bij deze dezelfde mate van versmallen, de verandering van het dwarsprofiel in langsrichting vergelijkbaar is. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de belangrijkste geometrische kenmerken van de twee varianten. Bijlage C geeft een beknopt overzicht hoe deze varianten tot stand zijn gekomen. Er is in dit onderzoek nog geen rekening gehouden met de fysieke inpasbaarheid van m.n. oevergeulen in het terrein buiten. Ofwel, dit onderzoek richt zich vooral op de systeemwerking van het meergeulenconcept.

Een versmalling van 40 m (LD-v12) leidt tot grote oevergeulen in de Midden-Waal om de erosie te stoppen. Daarom is daarnaast ook de 40-20 m variant (LD-v16) doorgerekend waarbij in de Midden-Waal het zomerbed met 20 m is versmald, terwijl de versmalling op de Boven-Waal 40 m blijft. In deze tweede variant is ook de oevergeulbreedte in de Midden-Waal aangepast naar 80 m. De hoogte van de langsdam is 2 m boven OLR net zo hoog als de bestaande langsdammen bij Tiel. Testberekeningen laten echter zien dat in benedenstroomse delen van afzonderlijke langsdammen in de Boven-Waal erosie optreedt doordat er lokaal te veel wordt versmald. Voor langsdammen in de Boven-Waal is er daarom gekozen voor een lagere kruinhoogte voor het benedenstroomse deel van iedere langsdam (zie hoofdstuk 5 voor het resultaat).



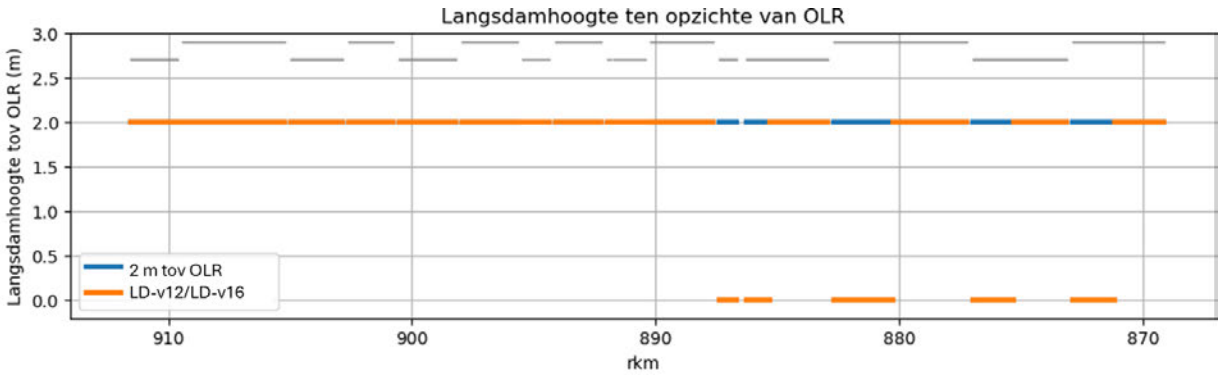
Figuur 4.6 Locatie van de langsdammen (zwart) en oevergeulen (groen) in de Waal.

Tabel 4.1 Overzicht van de belangrijkste verschillen tussen de 40 m en 40-20 m variant.

	LD-v12	LD-v16
Versmalling zomerbed:		
- Boven-Waal	40 m (2 roostercellen)	40 m (2 roostercellen)
- Midden-Waal (v.a. rkm 887)	40 m (2 roostercellen)	20 m (1 roostercel)
Breedte oevergeul		
- Boven-Waal	80 m (3 roostercellen)	80 m (3 roostercellen)
- Midden-Waal (v.a. rkm 890)	100 m (4 roostercellen)	80 m (3 roostercellen)
Hoogte instroomdrempel		
- Boven-Waal	0,25 m tov OLR	0,25 m tov OLR

[7] https://www.levenderivieren.nl

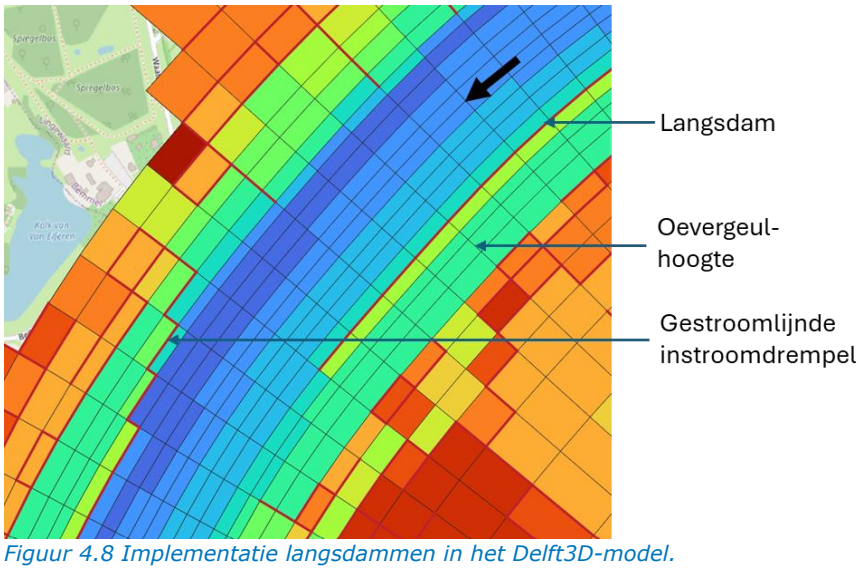
- Midden-Waal (v.a. rkm 890)	0,1 m tov OLR	0,25 m tov OLR
Hoogte langsdam (Figuur 4.7) - Boven-Waal - Midden-Waal	 0-2 m tov OLR 2 m tov OLR	 0-2 m tov OLR 2 m tov OLR



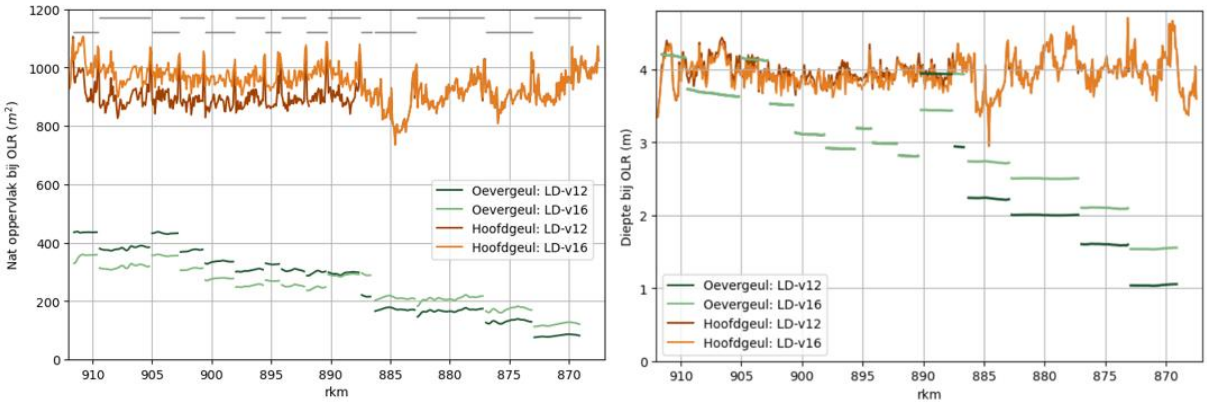
Figuur 4.7 De hoogte van de langsdammen langs de Waal. De benedenstroomse delen van de langsdammen in de Boven-Waal liggen lager om de mate van vernauwing te beperken.

Figuur 4.8 geeft een detail van de overgang tussen twee langsdammen zoals die in de schematisatie is ingebracht:

- De langsdam is zowel als een overlaat (rood) als in de bodem opgenomen.
- De instroomdrempel is in de bodem en als overlaat geschematiseerd.
- Kribben (en andere obstakels) in de oevergeulen zijn verwijderd.
- De bodemhoogte van de oevergeul is per langsdam gedefinieerd ten opzichte van OLR (Figuur 4.9). Deze bodemhoogte is een resultaat van een iteratief proces waarbij de focus ligt op de veranderingen in stroomsnelheid en het jaartransport in jaar 1.



Figuur 4.8 Implementatie langsdammen in het Delft3D-model.



Figuur 4.9 Het nat oppervlak bij OLR voor de oevergeul en de hoofdgeul (links). De diepte van de oevergeul bij OLR voor de twee varianten (rechts).

Aanvullend op de geometrische aanpassingen zijn ook sedimentmanagementmaatregelen aan de berekeningen toegevoegd met als doel:

- op diepte houden van de oevergeulen. Hiervoor wordt elk jaar het neergeslagen sediment uit de oevergeulen gebaggerd en gestort in het zomerbed parallel aan de oevergeul.
- Reduceren van benedenstroomse erosie. Benedenstrooms van het langsdammentraject is de sedimenttransportcapaciteit onveranderd wat tot grote erosie leidt. Deze erosie zorgt voor waterstandsverlaging (en terugschrijdende erosie). Dit wordt voorkomen door elk jaar het geërodeerde volume te suppleren tussen rkm 912 en 913, waarbij gebruik wordt gemaakt van de initiële bodemligging (de precieze volumes volgen uit de berekeningen, zie hoofdstuk 5).

4.4 MP4: Maximale synergie

4.4.1 Uitgangspunten

- Het uitgangspunt voor de groene variant is het meergeulenconcept, bestaande uit langsdammen en oevergeulen uit MP3 in plaats van een schematisatie van de geulen in de uiterwaarden. Reden hiervoor is dat het Delft3D rooster in de uiterwaard te grof is om nevengeulen goed mee te laten stromen. Een alternatieve aanpak om de afvoeren door de oevergeulen uit MP3 op te leggen als afvoeronttrekkingen aan het versmalde zomerbed in MP4 blijkt niet geschikt voor deze toepassing. Het opleggen van de maatregel met lozingen en onttrekkingen leidt bij lage Waalafvoer, waarbij de langsdammen nog niet overstromen, tot het juiste resultaat. Maar bij hogere afvoeren werkt de methode met onttrekkingen niet naar behoren en zorgen grote versnellingen en vertragingen voor afwijkende waterstanden. De alternatieve methode met onttrekkingen en toevoegingen is daarom in dit onderzoek niet gebruikt.
- Voor MP4 is de schematisatie van MP3 met oevergeulen dus als basis gebruikt. Hieraan zijn elementen van verruwing en zomerkadeverwijdering toegevoegd. Schattingen van de benodigde dimensies van nevengeulen om hetzelfde effect als MP3 te bereiken zijn opgenomen in hoofdstuk 7.1.
- Voor de verbreding van de Boven-IJssel volgen de dimensies uit Gensen et al (2025). Vertaald naar het Delft3D rooster wordt het zomerbed met ongeveer 20m verbreed: een strook van 10 meter langs het bestaande zomerbed op het niveau van het huidige zomerbed en daarnaast een strook van ca 10 m breed op OLR. De verbreding vindt alleen plaats op de linkeroever tussen km 879 en 890.

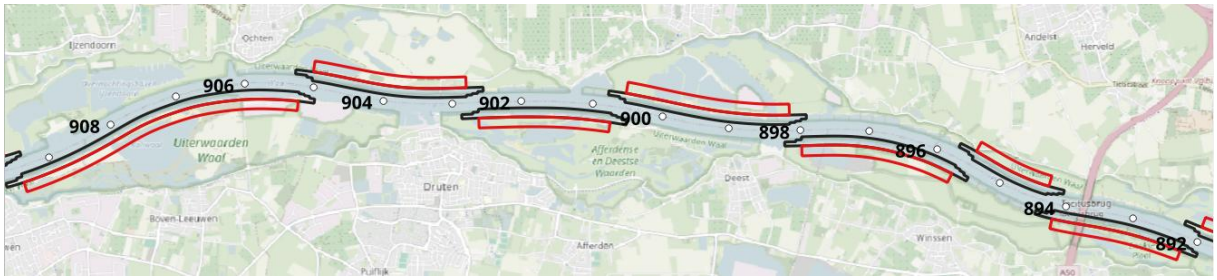
- Het aansluiten van het Zwarte Schaar past als maatregel niet op het rekenrooster van het modelinstrumentarium. Het model is daarom afgeknipt met een (waterstands)rand net bovenstrooms van het Zwarte Schaar. In de huidige loop van het zomerbed bij het Zwarte Schaar is een regelwerk nodig om met name de laagwaterstanden te kunnen reguleren. De exacte uitwerking van dit regelwerk valt buiten de scope van dit onderzoek. Bij lage rivierafvoeren (tot Lobithafvoer 1.400 m^3/s) is de waterstand uit de referentie vastgehouden. Voor hogere afvoeren wordt de referentiewaterstand verhoogd om het effect van de rivierverlenging na te bootsen (zie paragraaf 4.4.2 voor verdere uitwerking), met als doel een kleiner verhang, reductie van stroomsnelheden en aanzanding.

4.4.2 Vormgeving en implementatie Delft3D

Om de implementatie van MP4 in Delft3D te testen en goed vorm te geven zijn enige hydraulische testberekeningen uitgevoerd alvorens de morfologische berekeningen te starten. Resultaten van deze hydraulische berekeningen zijn verwerkt in deze paragraaf en worden tevens in het volgende hoofdstuk gebruikt om de morfologische effecten goed te kunnen interpreteren en duiden.

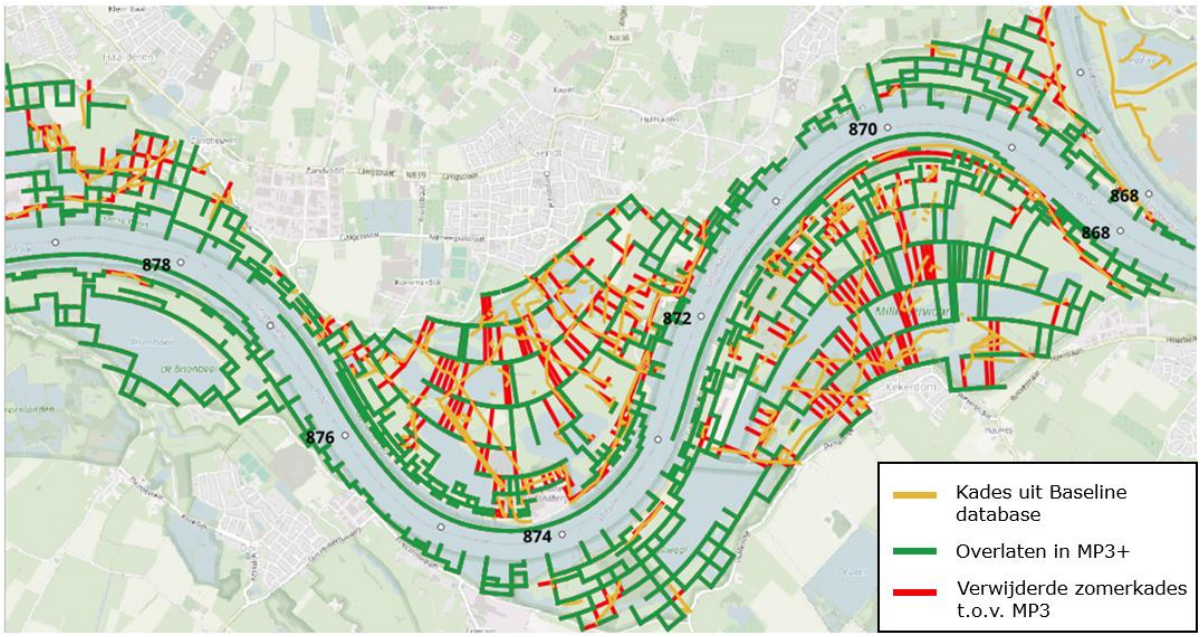
MP3+ - groene variant meergeulenconcept

Gezien de beperkingen van het huidige model is het meergeulenconcept met invulling van de langsdammenschematisatie uit MP3 als basis gebruikt (LD-v16) in plaats van nevengeulen door de uiterwaarden (zie voorgaande paragraaf voor de overwegingen). Als extra element zijn in deze groene variant zomerkadeverlaging en verruwing van de eilanden toegevoegd. De verruwing is in het model geschematiseerd als verruwing van de uiterwaarden naast de oevergeulen over een breedte van drie roostercellen (zie rode polygonen in Figuur 4.10). Deze breedte – circa 140 meter aan de linkeroever en 160 meter aan de rechteroever – komen qua orde grootte overeen met schetsen voor het meergeulenconcept volgens het WNF-plan Levende Rivieren. In deze vakken is de ruwheid voor droge ruigte toegekend (ruwheidscode 1212). Het effect van deze verruwing wordt mogelijk onderschat met deze schematisatie doordat de uiterwaarden hoger liggen dan de eilanden die in het plan Levende Rivieren zijn voorzien.



Figuur 4.10 Locatie van de verruwde vlakken in MP3+ (rode polygonen).

Overlaten in Delft3D komen via de Baseline-conversie voort uit kribben, kades en hoogteverschil–lijnen (=steilranden). De zomerkadeverlaging is toegepast door de kades in de Baseline-database (*j18_5-v2*) te verwijderen (zie oranje lijnen in Figuur 4.11). Hierdoor zijn er ook minder overlaten in de schematisatie (zie rode lijnen in Figuur 4.11). Deze kades zijn verwijderd over het gehele traject.



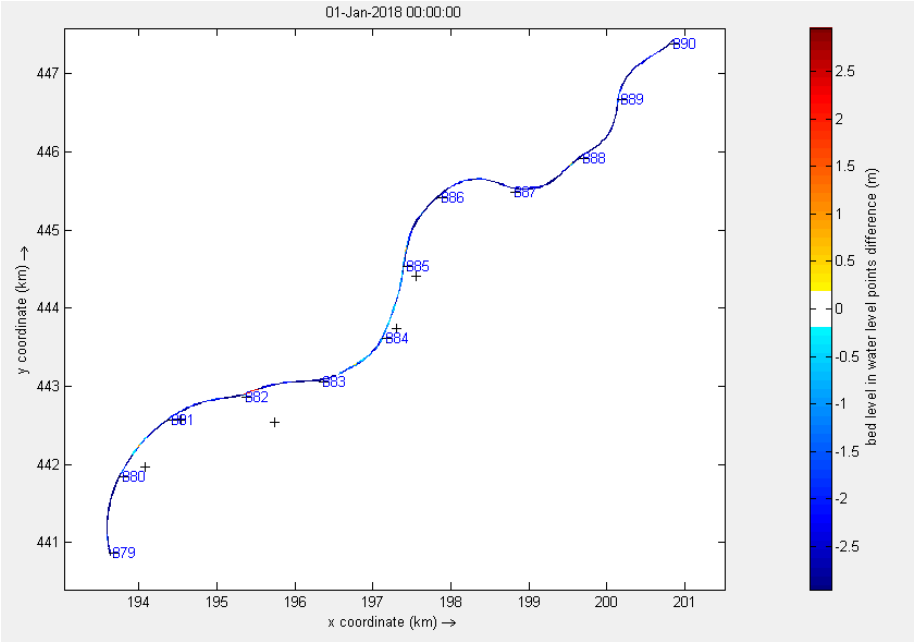
Figuur 4.11 Kades in Baseline (oranje), verwijderde zomerkades (rood), overgebleven overlaten (groen)

Zomerbedverbreding Boven-IJssel

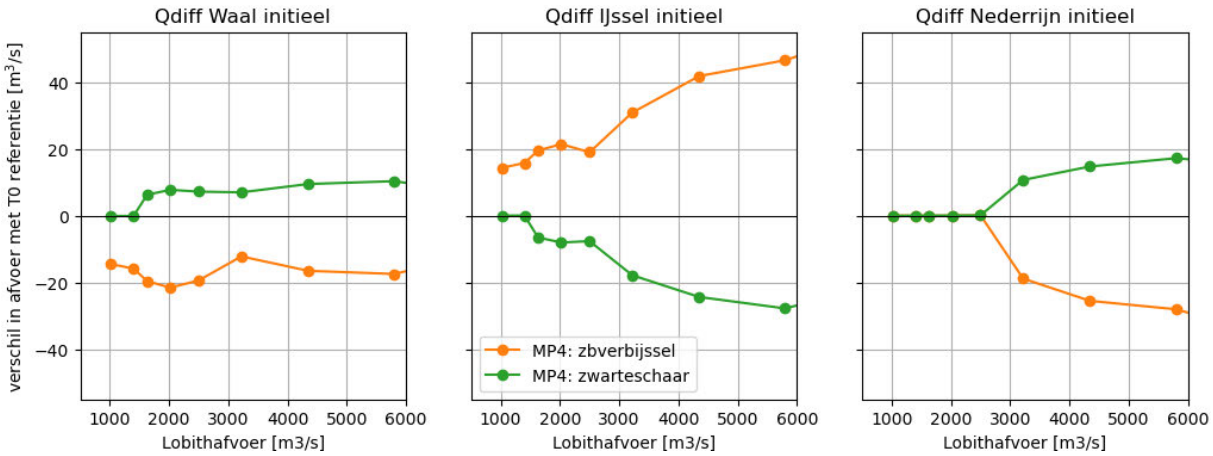
In Gensen et al. (2025) is de IJssel met 15 m verbreed over 10 km (Figuur 4.12). In Delft3D is de roostercelgrootte in de Boven-IJssel 10 m breed. Daarom is de keuze gemaakt om één roostercel te verlagen tot zomerbedhoogte en deze ook morfologisch actief te maken. Daarnaast ligt één roostercel op OLR zodat de impact op OLR beperkt is. Deze cel is niet morfologisch actief, i.e. niet erodeerbaar.

Figuur 4.13 geeft het effect van alleen de zomerbedverbreding op de IJsselafvoer weer. Bij lage afvoeren gaat er ongeveer 20 m^3/s meer naar de IJssel en dit neemt toe bij hogere afvoeren. Bij 2.500 m^3/s is er een trendbreuk zichtbaar, die het resultaat is van de overgang van een gestuwde naar ongestuwde Nederrijn. Wanneer we deze maatregelen combineren met langsdammen op de Waal (MP3: LDv12) neemt de afvoer naar de IJssel verder toe bij lage afvoeren (Figuur 4.14). Bij hogere afvoeren trekt de Waal door de ruime oevergeulen meer water, maar netto gaat er door de zomerbedverbreding initieel nog steeds meer water naar de IJssel bij alle beschouwde Lobith-afvoeren (dus tot en met een Lobithafvoer 5.800 m^3/s, zie
Figuur 4.14 midden).

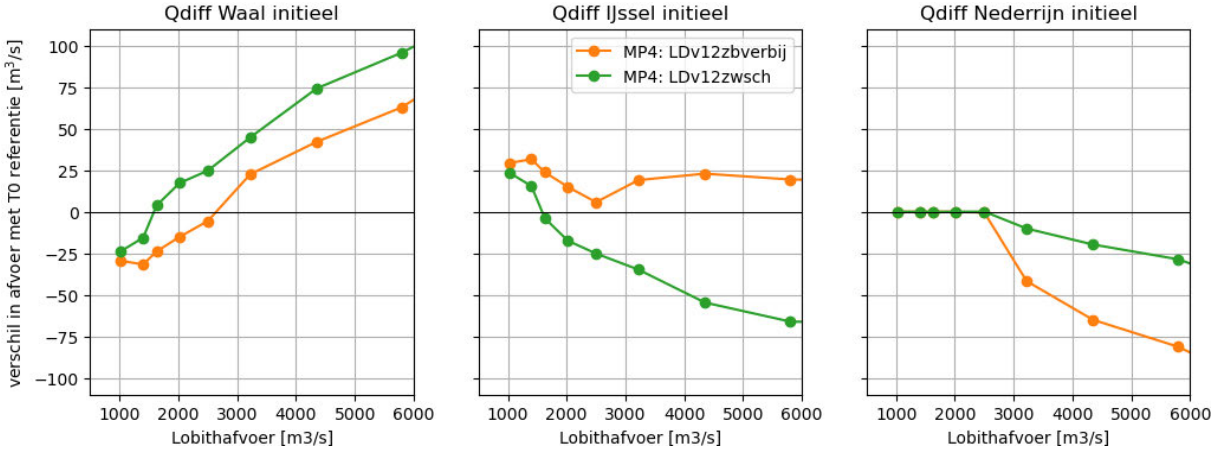
Het initiële effect van deze maatregel op waterstand en stroomsnelheid is opgenomen in Bijlage E.1. In het gebied met zomerbedverbreding neemt de stoomsnelheid af, vooral bij hogere afvoeren. Op het Pannerdensch Kanaal is bij lage en middenafvoeren de stroomsnelheid juist groter (meer afvoer, zelfde dwarsprofiel), net als benedenstrooms van de zomerbedverbreding (door toename in afvoer).



Figuur 4.12 Traject op de Boven-IJssel waarover de verbreding op de linkeroever is toegepast.



Figuur 4.13 Initieel effect op de IJsselafvoer (midden) van de verbreding van de Boven-IJssel en van de aansluiting van het Zwarte Schaar bij de morfologische afvoerstappen.

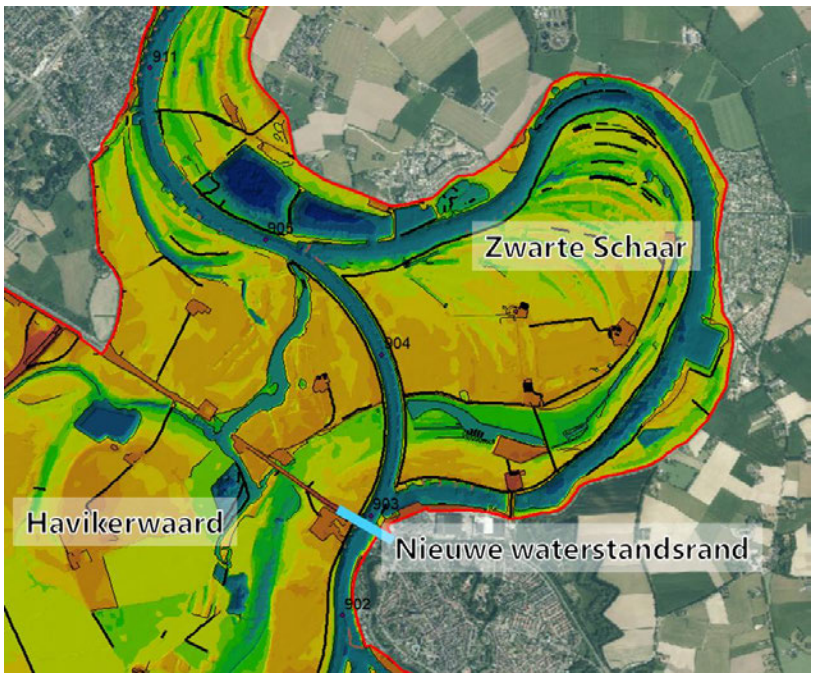


Figuur 4.14 Initieel effect van MP4 maatregelen in combinatie met maatregelen op de Waal op afvoerverdeling splitsingspunten voor afvoeren in de IRM-gemiddelde hydrograaf. Oranje: zomerbedverbreding, groen: aansluiten Zwarte Schaar.

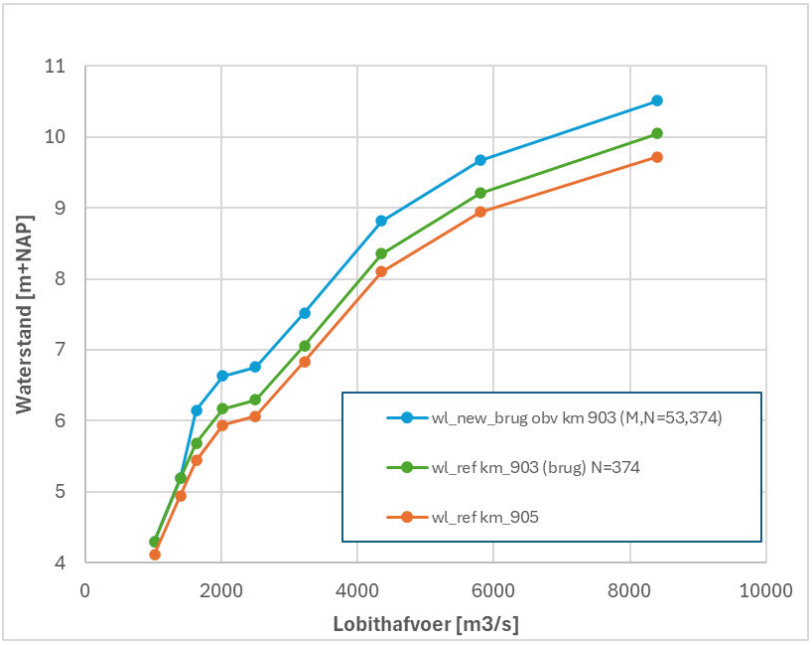
Aansluiten het Zwarte Schaar

Het Zwarte Schaar is een oude meander die is afgesneden. Het Delft3D rooster is uitgelijnd op het huidige zomerbed en schematiseert het Zwarte Schaar onvoldoende nauwkeurig om deze goed te laten meestromen in het morfologische model. Door het model af te knippen bij rkm 903 (Figuur 4.15) brengen we de waterstandseffecten (opstuwing) en de doorwerking daarvan op de bodemligging in de Boven-IJssel en het Pannerdensch Kanaal in beeld.

Bij lage afvoeren is een waterstandsopzet op de IJssel ongewenst in verband met de zoetwatervoorziening waarvoor een verhoging van de IJsselafvoer bij een Lobithafvoer van 1.300 m^3/s gewenst is. Om maximale synergie te bereiken is daarom een regelwerk voorzien die bij lage afvoeren het water via het huidige zomerbed stuurt (i.e. geen waterstandsopzet) en bij middelhoge en hoge afvoeren het water via het Zwarte Schaar stuurt. Dit betekent dat in principe in beide geulen een regelwerk nodig is. In een vervolgstudie moet gekeken worden of ook beide regelwerken nodig zijn. Figuur 4.16 geeft de waterstand ter hoogte van de nieuwe waterstandsrand weer met en zonder het aansluiten van het Zwarte Schaar. De waterstandsverhoging is geschat door de mate van verlenging van het zomerbed te vermenigvuldigen met het waterstandsverhang; dit levert een verhoging van de waterstand van 46 cm ten opzichte van de referentiewaterstand bij km 903 (brug Doesburg).



Figuur 4.15 Locatie van de nieuwe waterstandsrand net bovenstrooms van het Zwarte Schaar.



Figuur 4.16 Waterstandsrand bij de brug (ongeveer rkm 903) zonder (groen) en met (blauw) aansluiten het Zwarte Schaar.

Bij lage afvoeren is er geen waterstandsopzet en daardoor geen verandering van de afvoerverdeling (Figuur 4.13). Bij middelhoge afvoeren neemt de IJsselafvoer af door de waterstandsopzet (van 46 cm). Wanneer we dit combineren met langsdammen op de Waal gaat bij lage afvoeren wat extra water naar de IJssel, maar bij hoge afvoeren wordt de afname van de IJsselafvoer nog groter (Figuur 4.14).

Het initiële effect van deze maatregel op waterstand en stroomsnelheid is opgenomen in Bijlage E.2. Bij lage afvoeren (Q1020/1400) leidt de combinatie van referentiewaterstand en afvoertoename door maatregelen op de Waal tot een (te) steil waterstandsverhang en grotere stroomsnelheid in de Boven-IJssel (en het Pannerdensch Kanaal), waardoor de aanzanding wat wordt onderschat. Daarmee is het een conservatieve benadering. Bij hogere afvoeren neemt de stroomsnelheid af in de Boven-IJssel en het Pannerdensch Kanaal.

5 Morfologische ontwikkeling

In dit hoofdstuk beschrijven we eerst de grootschalige effecten en gaan vervolgens in op de afzonderlijke maatregelpakketten.

5.1 Langetermijnontwikkeling Rijntakken voor elk van de pakketten

5.1.1 Bodemontwikkeling en afvoerverdeling

Elk maatregelpakket is 20 jaar doorgerekend en zo gedimensioneerd dat deze in principe in staat zou moeten zijn om de bodemerosie te stoppen. Figuur 5.1 geeft de berekende bodemtrends weer in de verschillende trajecten van de Rijntakken en voor de verschillende maatregelpakketten die zijn gericht op het stabiliseren van de bodemligging. De groene Langsdammenvariant (MP3+) heeft geen onderscheidend effect op de trajectgemiddelde bodemligging en afvoerverdeling en is daarom niet opgenomen in Figuur 5.1 (zie ook paragraaf 5.4). Figuur 5.2 geeft het initiële verschil in Waal- en IJsselafvoer en tevens de afvoerontwikkeling in de tijd gedurende de morfologische simulaties van 20 jaar.

Bovenrijn

De maatregelenpakketten focussen op het stoppen van de bodemerosie in de Waal en IJssel. In de Bovenrijn is er nauwelijks effect op de bodemontwikkeling a.g.v. de maatregelen op de Waal en de IJssel. Het meergeulenconcept (combinatie van zomerbedversmalling met langsdammen en oevergeulen of nevengeulen), zorgen echter wel voor een waterstandsverlaging bij middelhoge en hoge afvoeren, wat de erosie op de Bovenrijn lijkt te versterken.

Waal

Zowel MP2 als MP3 leidt tot een stabilisatie van de gemiddelde bodemligging in de Boven-Waal over de periode van 20 jaar. MP4 (dus inclusief maatregelen op de IJssel) verandert dat beeld niet. In de Midden-Waal wordt de erosieve trend in eerste instantie gestopt. De bodemontwikkeling laat echter zien dat de Midden-Waal nog niet volledig is gestabiliseerd in de 20 jaar die zijn doorgerekend. De verwachting is dat hier meer tijd voor nodig is doordat er nog verstoringen door het systeem lopen. In de Beneden-Waal is vooral een bodemverhoging ten opzichte van andere varianten te zien in MP2 omdat er met de suppleties veel sediment aan het systeem wordt toegevoegd, wat in de Beneden-Waal sedimenteert.

Pannerdensch Kanaal en Nederrijn

Bij MP2 heeft de bodemhoogtetoename van de Boven-IJssel effect op de bodemontwikkeling van het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn. De waterstandsopstuwing zorgt voor een lichte afname van de erosie in het Pannerdensch Kanaal en stuwt meer afvoer naar de Nederrijn wat daar tot meer erosie dan in de referentiesimulatie leidt. Het meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen (MP3) zorgt voor meer afvoer naar de Waal bij middelhoge en hoge afvoeren, en dus voor minder afvoer naar de andere takken. Deze verminderde afvoer leidt in het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn tot minder sedimenttransport en daarmee treedt daar ook minder erosie op dan in de referentiesimulatie.

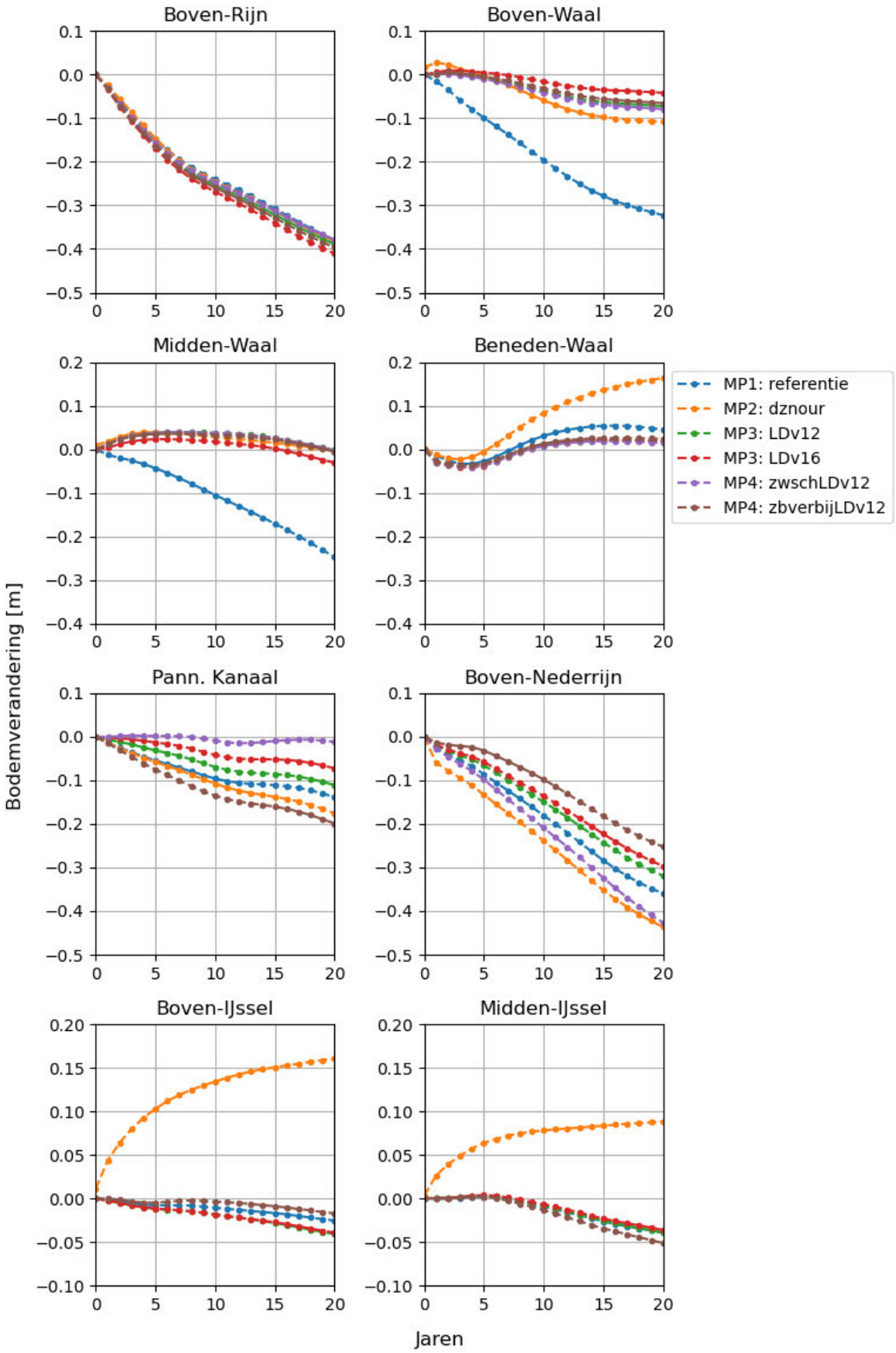
MP4 met aansluiting van het Zwarte Schaar zorgt voor een stabilisatie van de bodemligging van het Pannerdensch Kanaal. Zomerbedverbreding op de IJssel zorgt juist voor iets meer erosie in het Pannerdensch Kanaal.

IJssel

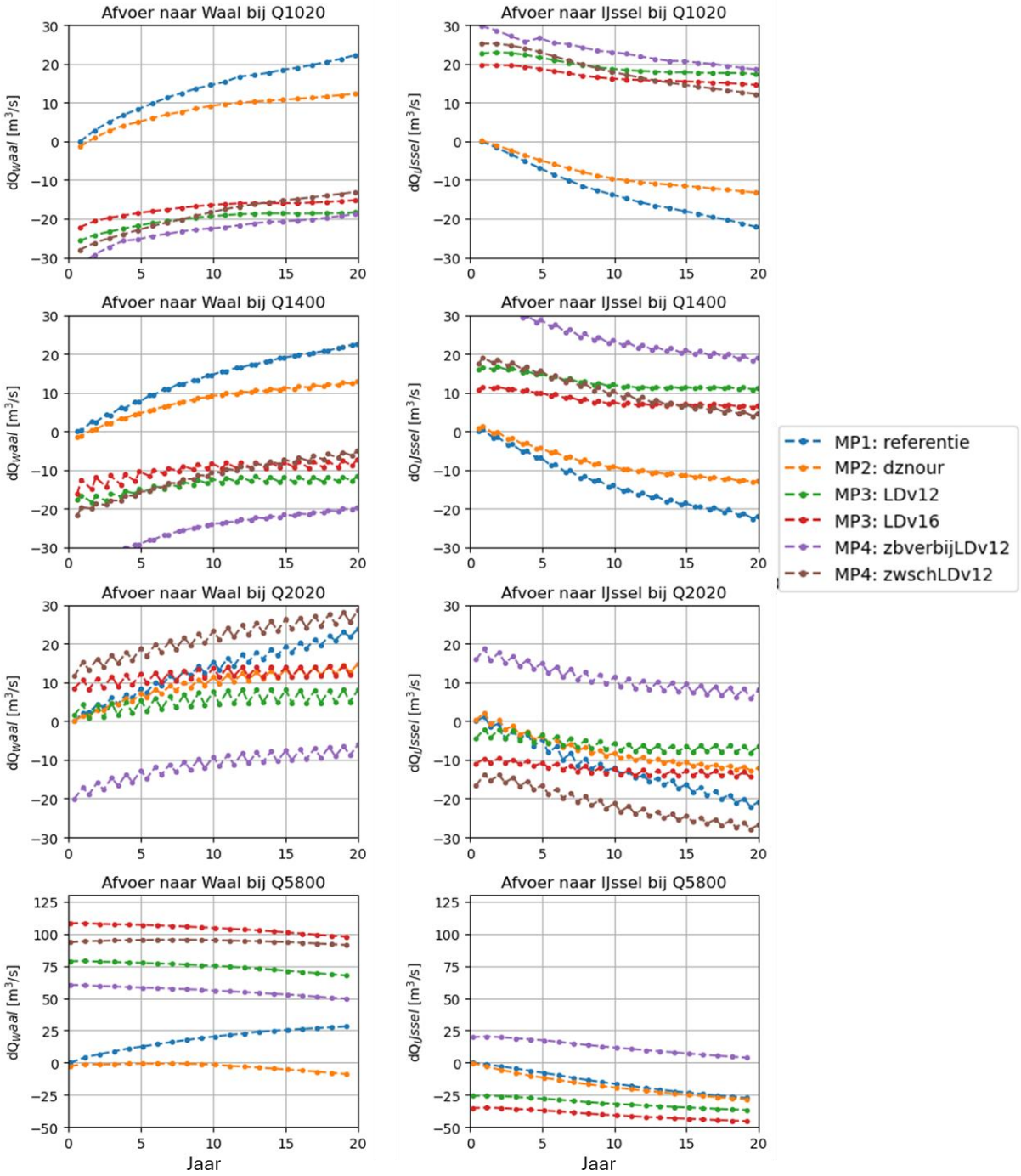
De suppleties in de IJssel leiden tot aanzanding in de IJssel. Dit komt doordat de suppletielocaties (die zijn gekozen op basis van de gemeten trends) niet aansluiten bij de bodemontwikkeling en erosie in de prognoses van het rekenmodel. Er wordt hierdoor te veel sediment aan het gemodelleerde systeem toegevoegd. Het meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen in de Waal (MP3) heeft nauwelijks effect op de bodemligging in de IJssel.

Conclusie

Alle maatregelpakketten zijn in staat om de grootschalige sedimentatie in de erosieve delen van de Waal en IJssel op te wekken en daarmee bodemerosie te kunnen stoppen. Voor MP4 levert zomerbedverbreding op de Boven-IJssel, aanvullend op toepassing van het meergeulenconcept op de Waal, een lichte verhoging van de trajectgemiddelde bodemligging op de Boven-IJssel. Voor het Pannerdensch Kanaal, waar geen specifieke maatregelen zijn geïmplementeerd, reduceert MP3 de erosie in deze tak, maar vooral aansluiting van het Zwarte Schaar lijkt effectief om bodemerosie hier te stoppen. In de volgende paragrafen beschrijven we de bodemontwikkeling in de takken in meer detail.
Voor wat betreft de afvoerverdeling zien we dat alle maatregelpakketten voor een toename van de laagwaterafvoer naar de IJssel kunnen zorgen ten opzichte van de referentie (Figuur 5.2). Dat geldt met name bij toepassing van het meergeulenconcept op de Waal (MP3 en MP4).



Figuur 5.1 Trajectgemiddelde bodemverandering voor de verschillende maatregelpakketten en varianten. De getoonde berekeningen zijn zonder vaargeulonderhoud. Let op: IJssel andere y-schaal, MP4/aansluiten Zwarte Schaar geen trajectgemiddelde te bepalen voor IJssel (want model afgeknipt bij km 903).



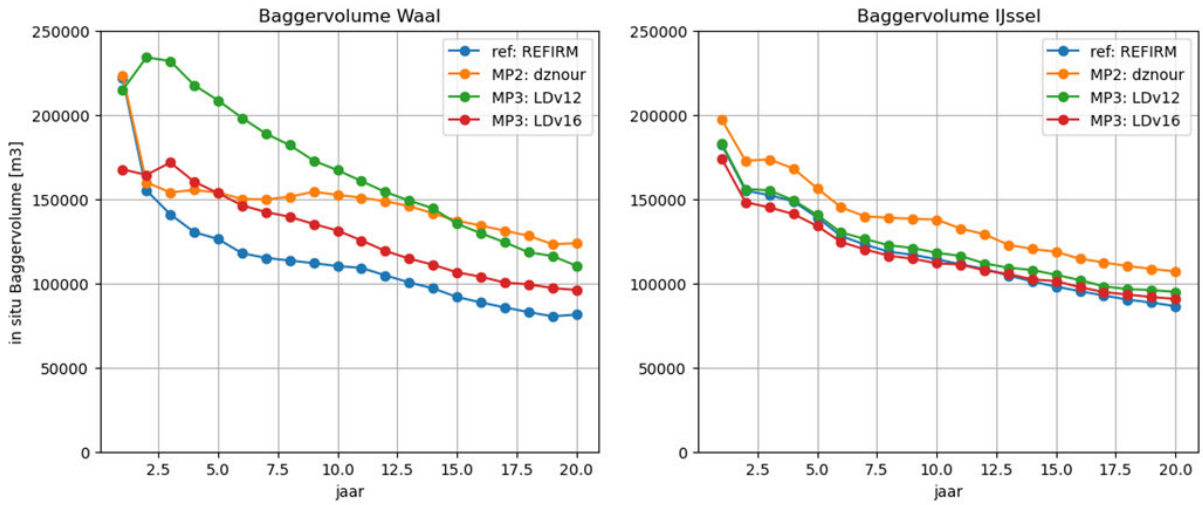
Figuur 5.2 De ontwikkeling van de afvoerverdeling ten opzichte van de referentie voor de Waal en IJssel door de maatregelpakketten en bodemontwikkeling (MP3+ niet getoond vanwege kleine verschillen met MP3).

5.1.2 Vaargeulonderhoud

Een selectie van simulaties met maatregelpakketten is uitgevoerd met vaargeulonderhoud. De instellingen zijn overgenomen uit het Grensregioproject. Zandwinning in de Beneden-Waal is niet meegenomen, want dat valt grotendeels buiten het modeldomein. Bij de vier laagste afvoeren in de hydrograaf wordt sediment gebaggerd dat hoger ligt dan OLR-2,8m (Boven-Rijn/Waal/Pannerdensch Kanaal) of OLR-2,5m (IJssel).

Daarbij wordt rekening gehouden met duinen en al het materiaal wordt teruggestort tussen de normaallijnen in de nabijheid van de baggerlocaties. Het OLR-vlak wordt in de berekeningen niet geüpdatet in de tijd.

Het totale jaarlijkse baggervolume voor de Waal en IJssel is weergegeven in Figuur 5.3. Voor MP4 zijn geen berekeningen met vaargeulonderhoud uitgevoerd. Voor MP1 is de ruimtelijke spreiding van het baggervolume opgenomen in Bijlage D. MP2 en MP3 zorgen voor een toename van het vaargeulonderhoud van 20-50% op de Waal en 10-30% op de IJssel.



Figuur 5.3 Benodigd vaargeulonderhoud. Het gebaggerde materiaal wordt teruggestort in de rivier.

5.2 MP2: Suppleties

Conclusies en leerpunten

- Wanneer op een bepaalde locatie met immobiele sedimentklassen (sedimentklassen grover dan 16 mm) wordt gesuppleerd dragen deze niet bij aan het reduceren van de transportgradiënt en dus ook niet aan het stoppen van bodemerosie over langere trajecten.
- Door over de hele tak de erosieve trajecten te suppleren met (bij hogere afvoeren) mobiele fracties van gebiedseigen materiaal kan bodemerosie over langere trajecten worden tegengegaan.
- Het verspreid suppleren in erosieve trajecten leidt tot een snelle aanpassing (verhoging) van de rivierbodemligging.
- Om de bodemerosie effectief tegen te gaan moet het benodigde suppletievolume variabel zijn en gebaseerd worden op de opgetreden erosie. Initieel is er namelijk meer sediment nodig omdat de rivier zich aanpast aan de suppletie en daarnaast hebben de hydrograaf en de sedimenttoevoer impact op de erosiesnelheid en dus op de suppletieomvang.
- De werkelijke sedimenttransportgradiënt verandert in de tijd door bodemontwikkeling, afvoervariaties en veranderingen aan de geometrie van de rivier. De suppletielocaties moeten dus regelmatig (bijvoorbeeld elke 5-10 jaar) worden geüpdatet aan de opgetreden erosietrends.
- De doorgerekende suppletievariant lijkt nog geen oplossing te zijn voor de erosie in de binnenbocht bij de vaste lagen.

Deze erosie heeft grote effecten op de ontwikkeling van de laagwaterstanden. Er is aanvullend onderzoek nodig om de benodigde suppletie (volume en sedimentverdeling) ter hoogte van de vaste lagen te bepalen.

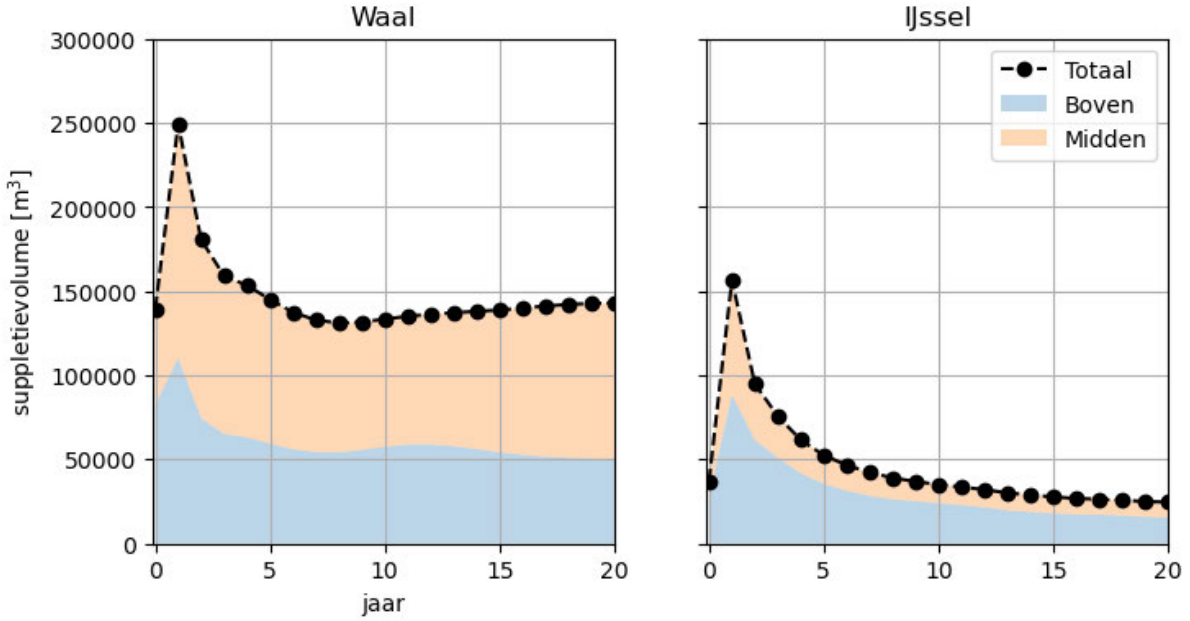
- In de IJssel kan een suppletie met fijn materiaal leiden tot ondiepere binnenbochten. Door grover materiaal te suppleren wordt dit effect gemitigeerd, maar dan moet wel rekening gehouden worden met de gradiënt in de korrelgrootteverdeling langs de tak. Te grof materiaal suppleren leidt namelijk tot (ongewenste) erosie van de binnenbocht.
- Het vaargeulonderhoud neemt toe met suppleren.

5.2.1 Suppletievolume en sedimenttransport

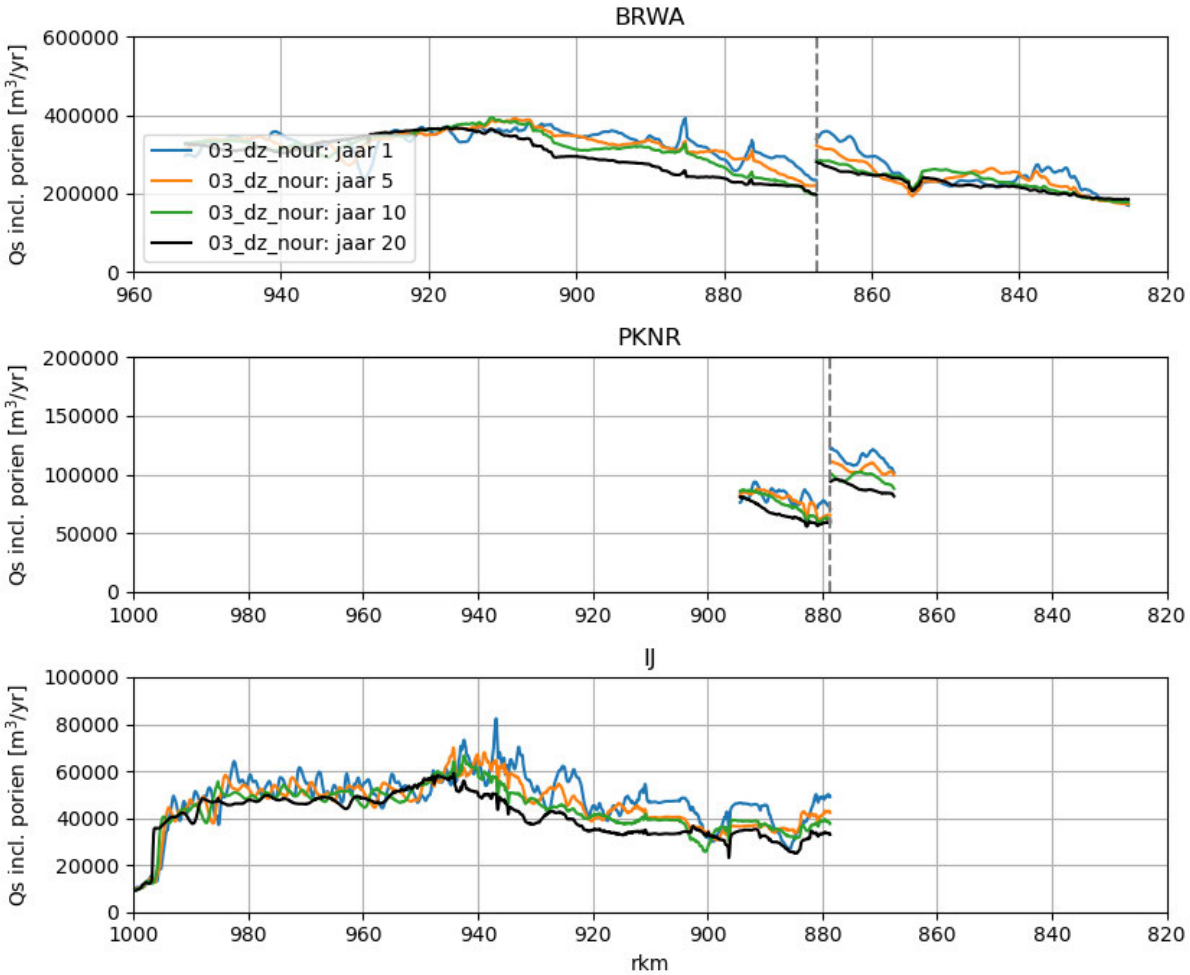
Initieel is over de stortvakken een totaal suppletievolume van 139.000 m^3 (Waal) en 37.000 m^3 (IJssel) verdeeld. Het model is zo opgezet dat binnen stortvakken de bodemhoogte (inclusief laagdikte van de suppletie) elk jaar wordt aangevuld. Zowel in de Waal als in de IJssel is het benodigde suppletievolume in het eerste jaar van de berekening veel groter dan het initiële volume (Figuur 5.4). Dit komt doordat de bodem nog niet is aangepast aan de suppletie. Bijvoorbeeld: door een initiële suppletie in de buitenbocht treedt erosie op in de binnenbocht, maar dit heeft tijd nodig. Zolang de binnenbocht nog niet volledig is aangepast, is het sedimenttransport in de buitenbocht nog hoog, de erosie groot en is er dus meer suppletievolume nodig.

In de Waal is het suppletievolume na ongeveer 10 jaar constant en benadert deze 150.000 m^3 wat het sedimenttekort is op basis van de sedimenttransportgradiënt (paragraaf 2.2). Opvallend is dat het suppletievolume in de Boven-Waal afneemt in de tijd en die van de Midden-Waal toeneemt. Figuur 5.5 laat zien dat de locatie van de sedimenttransportgradiënt in de Waal naar benedenstrooms migreert. Dit zorgt voor relatief meer erosie op de Midden-Waal die met meer suppletievolume gecompenseerd wordt.

In de IJssel is het suppletievolume na 20 jaar kleiner dan de initiële suppletie die op basis van metingen is vastgesteld (Figuur 5.4). Dit komt door de verschillen in bodemtrends tussen de metingen en het model (Figuur 3.3). Door lokale herverdeling van sediment kan erosie ontstaan in een stortvak terwijl deze erosie geen onderdeel is van de grootschalige bodemerosie (zie ook paragraaf 3.4.3). Deze lokale erosie wordt echter wel aangevuld wat leidt tot een extra suppletievolume. Figuur 5.4 laat zien dat het, in vergelijking met de Waal, veel langer duurt om naar het verwachte (modelmatige) sedimenttekort van 20.000 m^3/jaar (Figuur 5.5) te ontwikkelen. Het suppletievolume op basis van metingen is dus te groot en de stortvakken zelf zijn te klein gedefinieerd om het grootschalige sedimenttekort te bepalen. Dit leidt tot een te groot suppletievolume en daarmee een grote toename van de gemiddelde bodemligging (Figuur 5.1).



Figuur 5.4 MP2: Door het model bepaalde stortvolume (inclusief poriën) om de bodemhoogte in de stortvakken op peil te houden, opgedeeld in bovenstroomse en middentrajecten.



Figuur 5.5 MP2: Ontwikkeling van de sedimenttransportgradiënt in tijd.

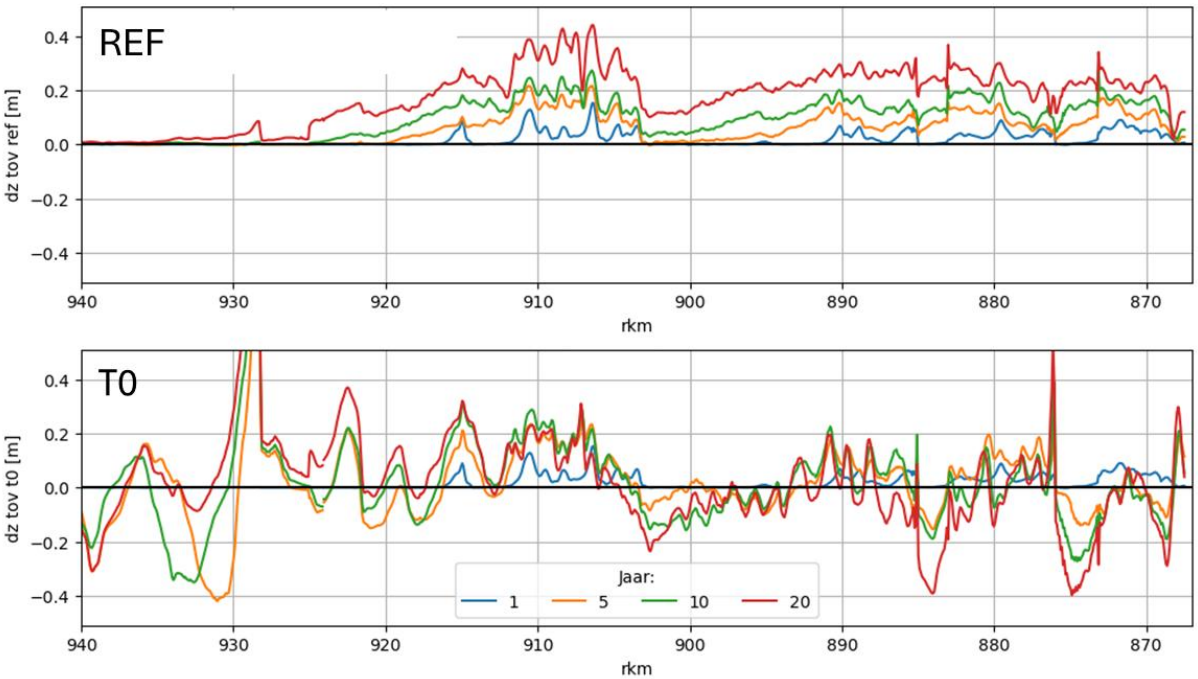
5.2.2 Bodemontwikkeling

Waal

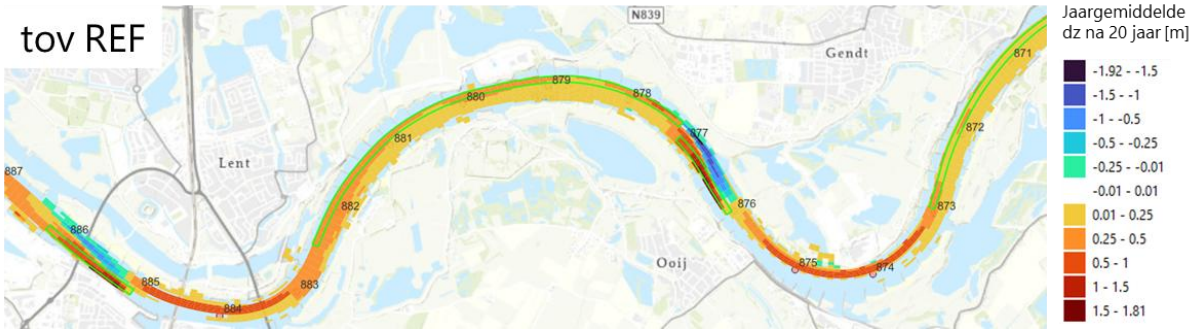
Figuur 5.6 geeft de bodemverandering in de Waal weer door de suppleties. In de Boven-Waal is ten opzichte van de referentie de bodem gemiddeld met 20 cm gestegen. Ten opzichte van T0 (initiële bodemligging) treedt er nog wel erosie op die vooral in de binnenbocht van de vaste lagen plaatsvindt. In de binnenbocht is geen suppletielocatie gedefinieerd en de sedimenttoevoer is te klein en te fijn om de erosie daar volledig te stoppen. Figuur 5.7 laat zien dat de bodemhoogte over het gehele traject omhoog komt ten opzichte van de referentie met uitzondering van de ondiepte in de binnenbocht benedenstrooms van de vaste laag. Door het storten van sediment in de erosiekuil neemt de hoogte van deze sedimentbult af.

Tussen rkm 895 en 902 treedt er volgens de metingen geen erosie op en zijn er dus geen stortvakken gedefinieerd. De bodemverhoging (t.o.v. de referentie) in dit traject wordt veroorzaakt door verplaatsing van de bovenstroomse suppletie en de waterstandsopzet vanuit benedenstrooms. Ten opzichte van T0 treedt er op dit traject erosie op. De migratie van deze erosie naar benedenstrooms zorgt voor de toename in suppletievolume in de Midden-Waal (Figuur 5.4).

Vanaf rkm 902 tot 915 is de bodem stabiel door de suppleties (t.o.v. T0). Het sediment dat hier gesuppleerd wordt, migreert naar de Beneden-Waal waar deze tot een bodemverhoging leidt (t.o.v. T0).



Figuur 5.6 MP2: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in de Waal ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).

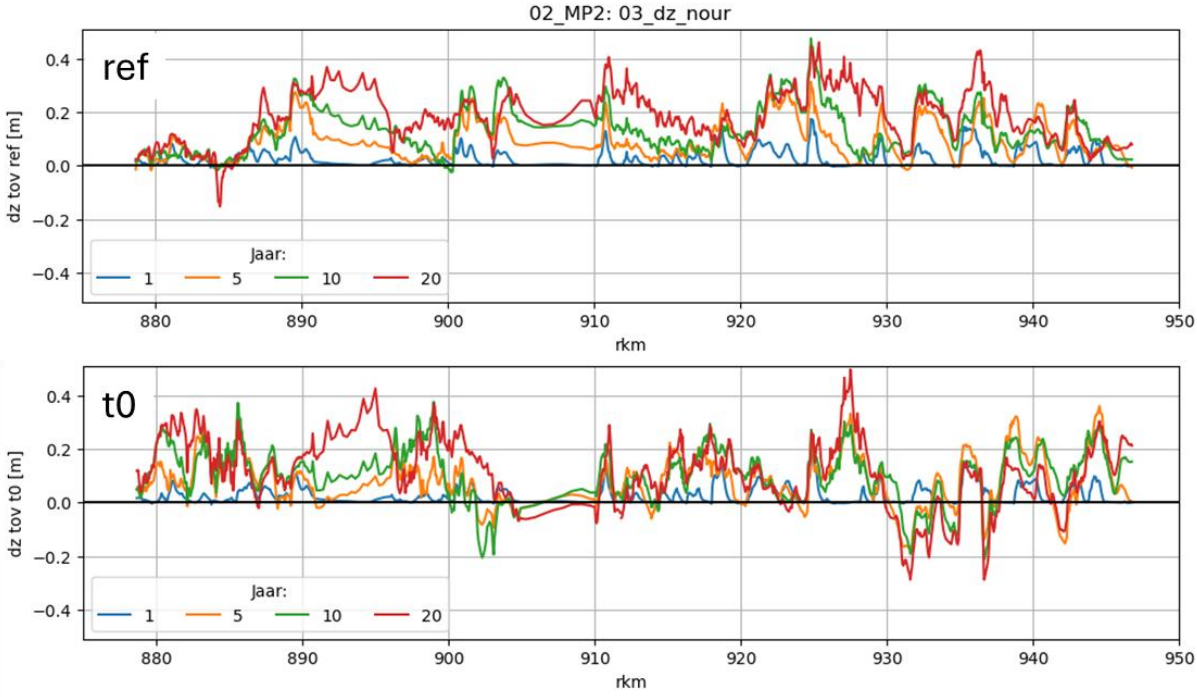


Figuur 5.7 MP2: Bodemverandering in de Boven-Waal na 20 jaar ten opzichte van de referentie, met de stortlocaties in de groene vakken.

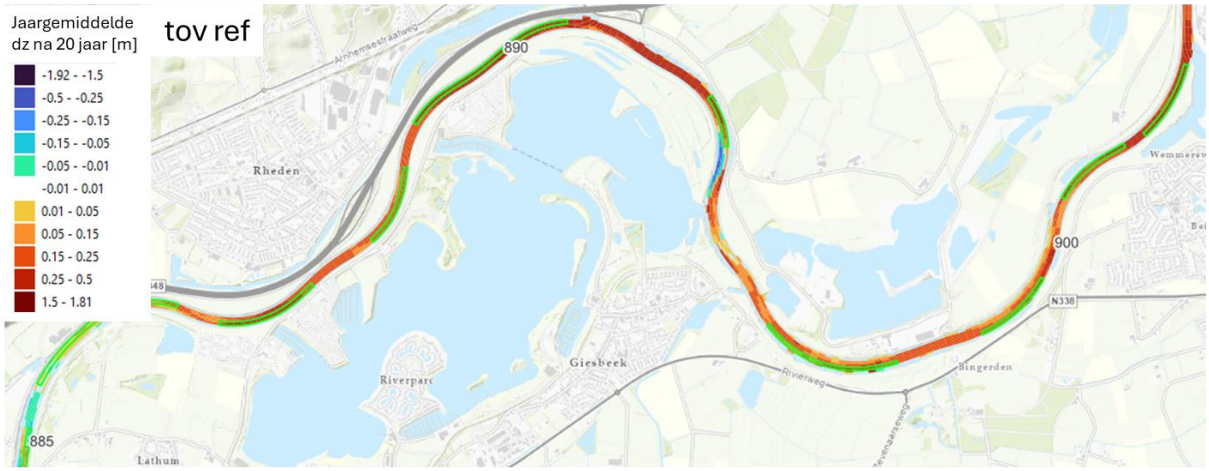
IJssel

In de IJssel is net als in de Waal een duidelijke bodemverhoging te zien ten opzichte van de referentie (Figuur 5.8). In de referentie ontstaat bij rkm 885 veel sedimentatie die door de suppletie niet ontstaat. In de IJssel is met relatief grof materiaal gesuppleerd om te voorkomen dat de binnenbochten ondieper worden. Het resultaat is dat ten opzichte van de referentie (waarin relatief veel erosie in de buitenbochten optreedt) een gelijkmatige aanzanding zichtbaar is (Figuur 5.9). De korrelgrootte is dus een goede regelknop om ondiepe binnenbochten te voorkomen.

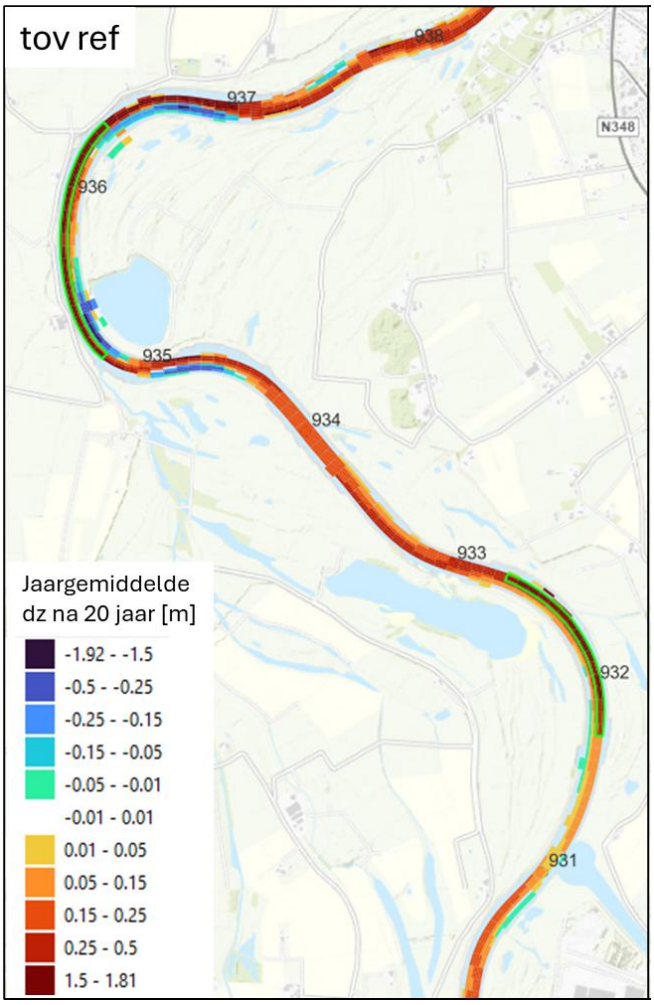
Benedenstrooms van rkm 930 is nauwelijks aanzanding te zien ten opzichte van de referentie en treedt er ten opzichte van T0 erosie op (Figuur 5.8). Figuur 5.10 laat zien dat dit komt door erosie van de binnenbochten. Door geen zandklassen mee te nemen in de suppletie past de suppletie goed bij het bodemmateriaal in de buitenbochten van de Boven-IJssel. Op de Midden-IJssel is het aanwezige bodemmateriaal fijner en zorgt de relatief grove suppletie in de buitenbocht voor erosie in de binnenbocht. Het suppleren van grof materiaal voorkomt dus een verondieping van de binnenbochten door de suppletie, maar te grof materiaal leidt mogelijk tot (ongewenste) erosie van de binnenbochten.



Figuur 5.8 MP2: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in de IJssel ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).



Figuur 5.9 MP2: Bodemverandering in de Boven-IJssel na 20 jaar met de stortlocaties in de groene vakken.



Figuur 5.10 MP2: Bodemverandering in de Midden-IJssel na 20 jaar met de stortlocaties in de groene vakken.

5.3 MP3: meergeulenconcept Waal

Conclusies en lessen:

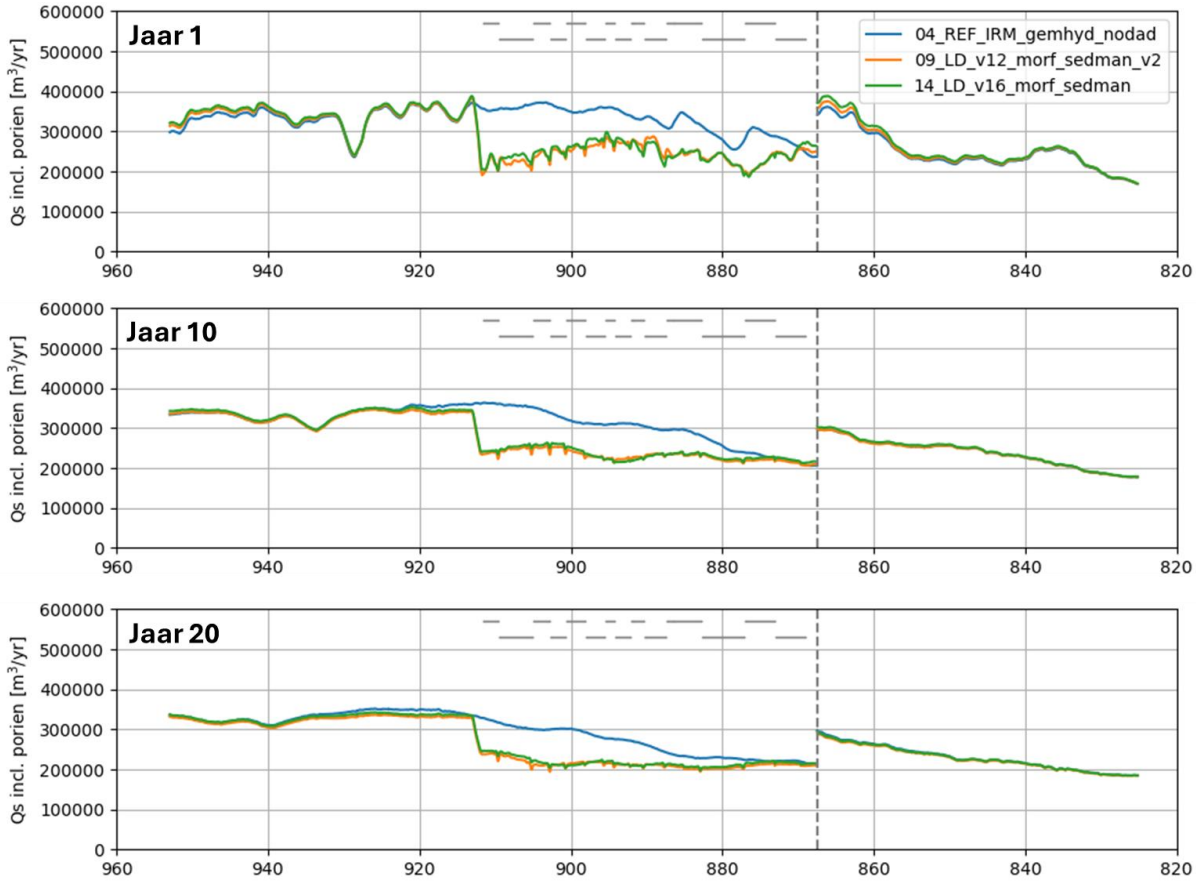
- de grootte van de oevergeulen varieert over het traject. Er zijn grote (brede en diepe) oevergeulen nodig op de Midden-Waal. Dit kan worden beperkt door het zomerbed minder te versmallen en/of de afvoerverdeling tussen hoofdgeul en oevergeul aan te passen of te optimaliseren. Op de Boven-Waal zijn er minder grote oevergeulen nodig.
- De keuzes voor dimensionering van de maatregelen (versmalling zomerbed en oevergeulgrootte) op de Midden-Waal bepalen in grote mate de benodigde geometrie van de oevergeulen op de Boven-Waal. Oftewel er is sprake van nauwe interactie tussen aanpassingen over het gehele traject.
- Bij een verdere detaillering in vervolgonderzoeken en nadere uitwerking en inpassing in de omgeving moet worden nagestreefd dat de aanpassing aan de stroomsnelheden zowel bij lage (bepaald door doorstroomprofiel) als bij hoge afvoeren (mate afvoeronttrekking) zodanig constant is langs een (individuele) langsdam dat in een langsdamtraject geen ongewenste erosie of sedimentatie in de hoofdgeul ontstaat. Dit betekent dat:
  - De grootte (breedte en diepte) van de oevergeul, kruinhoogte van de langsdam (zie paragraaf 4.3.2) en misschien ook wel de mate van versmalling van het zomerbed variabel moeten zijn binnen één langsdam.
  - De overgangen tussen twee langsdammen gestroomlijnd moeten zijn.
  - Waar dit niet lukt zullen suppleties of aanvullend vaargeulonderhoud nodig zijn.
- Het doorstroomprofiel van de oevergeulen bij de huidige langsdammen is te klein als het meergeulenconcept grootschalig wordt geïmplementeerd om de sedimenttransportgradiënt op de gehele Waal vlak te trekken.
- Het meergeulenconcept moet verder benedenstrooms van Tiel worden doorgezet om de gehele erosiviteit op de Midden-Waal te elimineren. De huidige scope, tot aan de bestaande langsdammen bij Tiel, is nog onvoldoende.
- Sedimentatie van de oevergeulen moet voorkomen worden omdat deze de effectiviteit van het meergeulenconcept beperken. Dit moet in het (verdere) ontwerp van de oevergeulen worden meegenomen en daarnaast is mogelijk jaarlijks onderhoud van de geulen nodig (i.e. baggeren). Hoeveel sedimentatie in de oevergeulen zal optreden is met het huidige modelinstrumentarium niet goed te voorspellen.
- Het effect van zomerbedversmalling bij de vaste lagen is nog onzeker door de complexiteit en de onzekerheid in het modelconcept. Het voorlopige advies is om hier geen versmalling van het zomerbed vanuit de binnenbocht toe te passen omdat dit de alluviale breedte verder beperkt. Dit vraagt nog een nadere detailleringsslag.

5.3.1 Sedimenttransport en sedimentmanagement

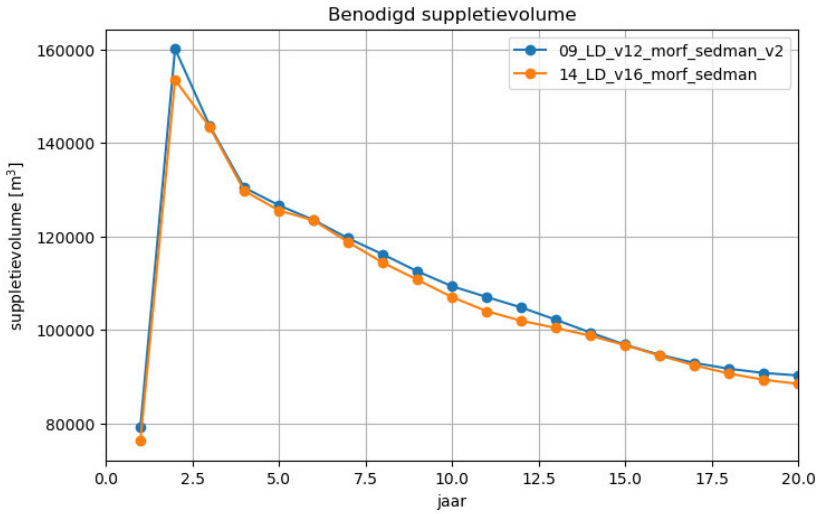
De bodemhoogte van de oevergeulen is iteratief bepaald met als doel om tussen de Pannerdense Kop (rkm 868) en Tiel (rkm 912) tot een constant sedimenttransport te komen. Figuur 5.11 geeft de initiële sedimenttransportgradiënt en ontwikkeling daarvan weer. Zowel in LD-v12 (versmalling gehele Waal 40 m) als in LD-v16 (Midden-Waal 20 m versmalling en Boven-Waal 40 m versmalling) is het sedimenttransport op de Waal min of meer constant. Dit zorgt voor de gewenste afname van de bodemerosie (Figuur 5.1).

Benedenstrooms van het traject met de nieuwe langsdammen (bij rkm 912) ontstaat een grote gradiënt in sedimenttransport die tot grote erosie leidt, die ongewenst is. In de berekeningen wordt deze erosiekuil daarom jaarlijks opgevuld met extern sediment om de negatieve effecten van deze erosie (i.e. waterstandsverlaging) te beperken (Figuur 5.12). Een andere optie is om de oevergeulen van de huidige langsdammen te verruimen en het meergeulenconcept in benedenstroomse richting door te trekken.

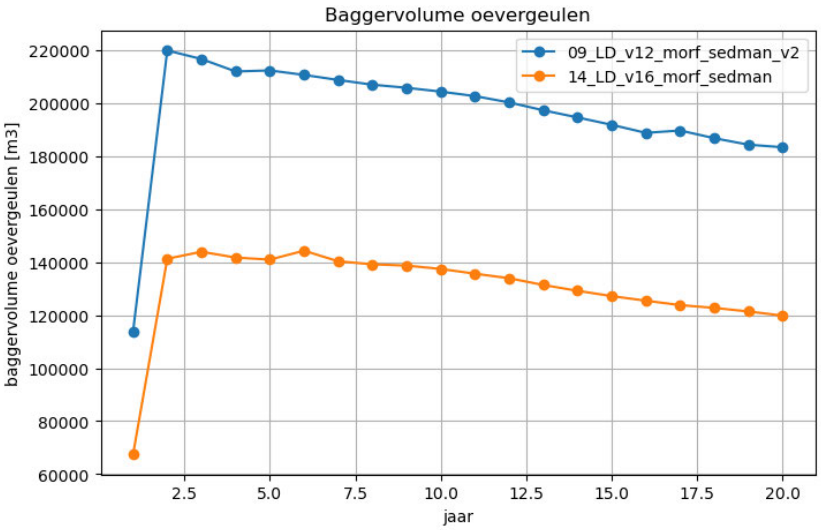
Door jaarlijks onderhoud van de oevergeulen en het gebaggerde sediment terug te storten in de hoofdgeul blijft de initiële afvoercapaciteit van de oevergeulen behouden en blijft er meer sediment beschikbaar in de hoofdgeul. Het sedimenttransport over het langsdammentraject blijft hierdoor min of meer constant. Zonder jaarlijks onderhoud onttrekken de oevergeulen steeds minder afvoer waardoor het sedimenttransport toeneemt. Bovendien wordt het sediment dat in de oevergeulen neerslaat dan onttrokken aan de hoofdgeul. De effectiviteit van de maatregel neemt dan af. De berekende baggervolumes zijn relatief groot ten opzichte van het jaartransport in de Waal (Figuur 5.13). Uit ervaring weten we dat het rekenmodel de toestroom van sediment naar de oevergeul niet goed kan berekenen. De verwachting is dat de mate van sedimentatie door het model wordt overschat door de manier van schematiseren (zie paragraaf 7.1.3).



Figuur 5.11 MP3: Jaarlijks sedimenttransport voor de twee langsdammen varianten en de referentie.



Figuur 5.12 MP3: Benodigd suppletievolume (inclusief poriën) om de sedimenttransportgradiënt bij rkm 912 te compenseren.



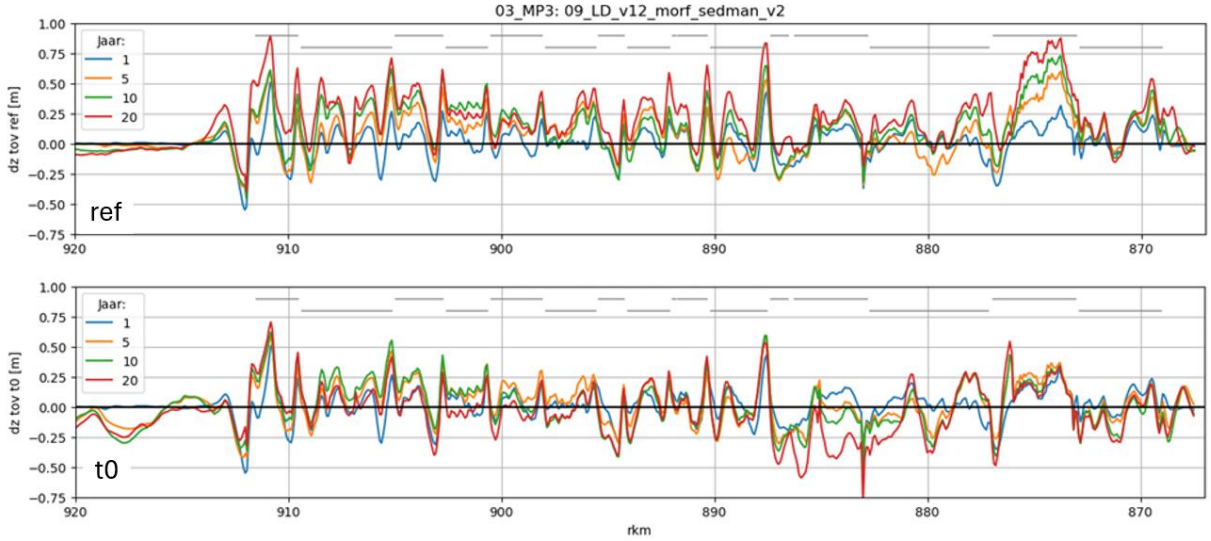
Figuur 5.13 MP3: Benodigd baggervolume in de oevergeulen zelf om de afvoercapaciteit van de oevergeulen en het sediment voor de hoofdgeul te behouden. Het gebaggerde materiaal wordt ter hoogte van de oevergeul teruggestort (diepste delen eerst).

5.3.2 Morfologische ontwikkeling

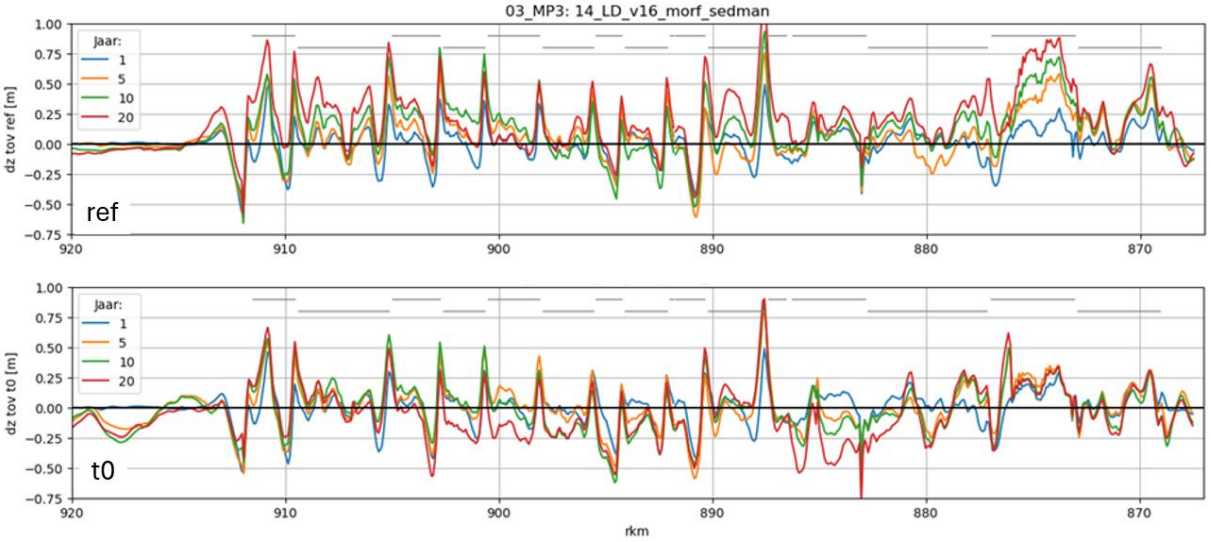
Figuur 5.14 en Figuur 5.15 tonen de jaargemiddelde bodemontwikkeling in de Waal voor de langsdamvarianten LD-v12 en LD-v16. In variant LD-v12 is de bodem na 20 jaar gemiddeld circa 25 cm gestegen ten opzichte van de referentiesituatie (MP1; niets doen). In vergelijking met T0 (initiële bodemligging) blijft de bodem grotendeels stabiel, vooral op de Midden-Waal (rkm 892-912). De voornaamste erosie ten opzichte van T0 vindt plaats tussen rkm 882 en 887, rond de vaste laag bij Nijmegen. De vaste laag zelf ondergaat geen erosie, maar de alluviale binnenbocht – waar het sediment wel mobiel is – erodeert hevig. Direct benedenstrooms van de vaste laag ontstaat een erosiekuil. Onzekerheden rondom de vaste lagen worden verder besproken in Hoofdstuk 7.1.3.

Figuur 5.15 laat zien dat de erosie in LD-v16 (gedifferentieerde versmalling tussen Boven- en Midden-Waal) wat minder effectief wordt gestopt dan in LD-v12 (uniforme versmalling).

Hoewel de sedimenttransportgradiënten, zoals besproken in de voorgaande paragraaf, grotendeels vergelijkbaar zijn, treedt er bij LD-v16 vanaf rkm 891 duidelijk wat meer erosie op. In de Boven-Waal (rkm 867-891) zijn de ontwikkelingen wel vergelijkbaar tussen beide varianten. De minder goede resultaten vanaf rkm 891 hangen samen met de overgang van 40 meter naar 20 meter versmalling ter hoogte van rkm 887 in LD-v16. De oevergeul tussen rkm 887 en 891 is in LD-v16 vergelijkbaar gekozen met LD-v12 en zorgt op dat traject voor iets meer aanzanding dan in LD-v12. Bij rkm 891 ontstaat in LD-v16 echter een duidelijk diepere erosiekuil dan in LD-v12 en die lijkt ook de erosie benedenstrooms daarvan te vergroten. In dat benedenstroomse traject zijn de oevergeulen minder groot gedimensioneerd (Figuur 4.9). Dit beeld onderstreept de noodzaak tot verdere optimalisatie van de overgang bij de 40m/20m-versmalling, mogelijk met een geleidelijk verloop.



Figuur 5.14 MP3 LD-v12: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in de Waal ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).



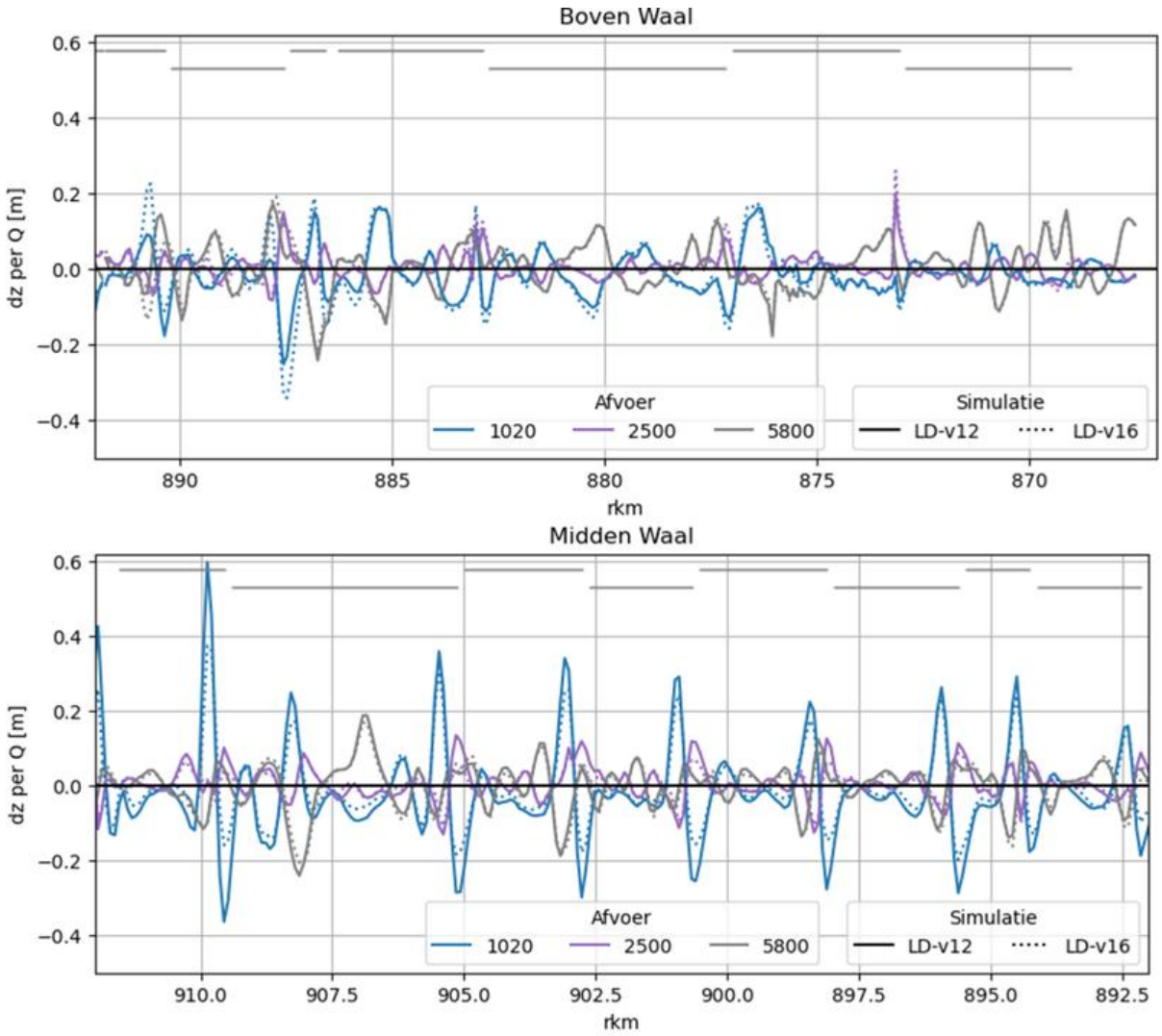
Figuur 5.15 MP3 LD-v16: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in de Waal ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).

5.3.3 Bodemdynamiek

Figuur 5.16 toont de bodemvariatie tijdens verschillende afvoerniveaus gedurende jaar 20. De grootste bodemveranderingen treden op bij een afvoer van 1020 m^3/s, met name bij de overgangen tussen de langsdammen. Op de Midden-Waal ontstaat hierbij een patroon van erosie op de overgangen, waar de stroomsnelheid piekt, gevolgd door sedimentatie benedenstrooms hiervan door de negatieve gradiënt in de stroomsnelheid. Tijdens midden- en hoge afvoeren treedt het omgekeerde patroon op, waardoor de bodemveranderingen gedurende de verschillende afvoerniveaus elkaar grotendeels compenseren.

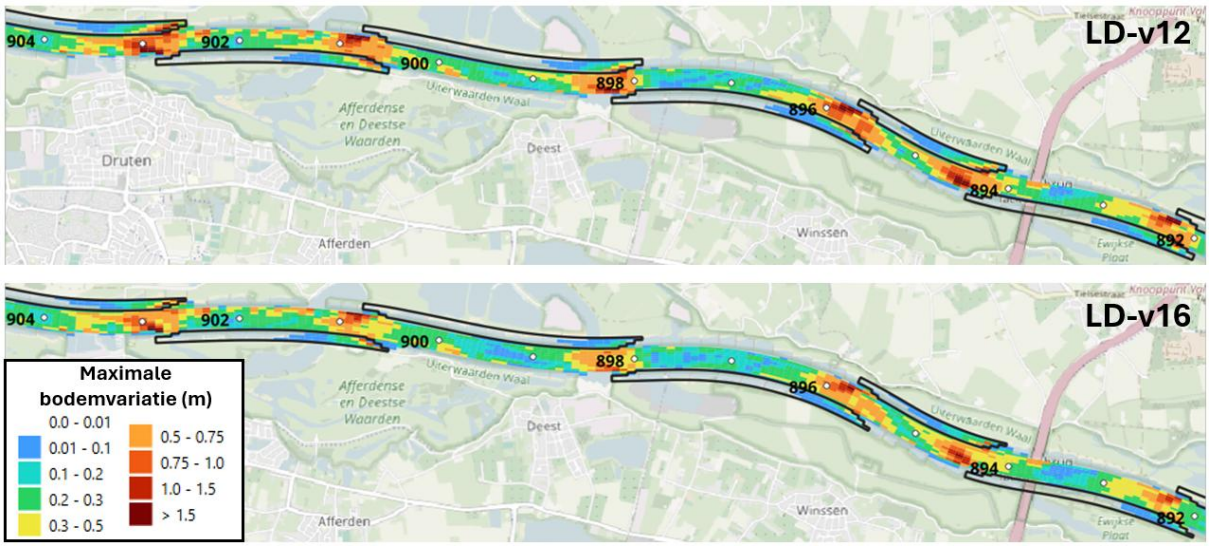
Net als in de jaargemiddelde bodemontwikkeling is ook de bodemdynamiek tussen LD-v12 en LD-v16 erg vergelijkbaar in de Boven-Waal. In de Midden-Waal valt vooral op dat LD-v16 tot wat minder hevige pieken leidt tijdens 1020 m^3/s. De kleinere versmalling in deze variant lijkt tot een verminderde bodemdynamiek te leiden. Een belangrijke kanttekening is dat de beoogde bodemstabilisatie in LD-v16 nog niet volledig is bereikt. Verdere optimalisatie van deze variant kan mogelijk alsnog tot grotere dynamiek leiden dan momenteel zichtbaar is.

Over het geheel genomen is de bodemdynamiek in beide varianten van vergelijkbare orde van grootte met die in de referentie, met uitzondering van de overgangen in de Midden-Waal. Daar treedt tijdens 1020 m^3/s aanzienlijk meer bodemverandering per seizoen op.



Figuur 5.16 MP3: Verschil in bodemligging tijdens drie afvoerniveaus in jaar 20 voor de Boven-Waal (boven) en Midden-Waal (onder)

Figuur 5.17 toont de maximale 2D bodemhoogteverschillen in jaar 20 binnen een deeltraject van de Midden-Waal (rkm 892-904). De figuur bevestigt het eerder besproken patroon: buiten de overgangen is de maximale bodemdynamiek beperkt, maar ter plaatse van de overgangen varieert deze van circa 0,3 tot 1,5 meter binnen één jaar. Opnieuw blijkt dat LD-v16 een gematigder gedrag vertoont dan LD-v12, met lagere waarden in maximale bodemdynamiek op de overgangen. Het is daarbij van belang om de eerder gemaakte kanttekening over LD-v16 in gedachten te houden.



Figuur 5.17 MP3: Maximale bodemvariatie in jaar 20 in de Midden-Waal (traject rkm 892-904) voor varianten LD-v12 (boven) en LD-v16 (onder).

5.4 MP4: Maximale synergie

Conclusies en lessen:

- door de combinatie van maatregelen op Waal en IJssel om de bodemerosie te stoppen, ontstaat een complex samenspel van effect op afvoerverdeling, waterstanden en stroomsnelheden.
- Het initiële effect van maatregelen van MP4 op de IJsselafvoer is als volgt:
  - Het meergeulenconcept op de Waal resulteert bij lage Lobithafvoeren (tot en met 1400 m^3/s), als gevolg van zomerbedversmalling door langsdammen, in extra afvoer naar de IJssel; bij hogere afvoeren is dat door de ruime oevergeulen (of nevengeulen) juist omgedraaid.
  - Aansluiten van het Zwarte Schaar resulteert bij midden en hoge Lobithafvoeren (vanaf 1630 m^3/s) in een afvoerafname naar de IJssel.
  - De afvoertoename van de IJsselafvoer die bij lage Lobithafvoeren (tot en met 1400 m^3/s) ontstaat door zomerbedversmalling op de Waal, wordt in principe verzwakt door aansluiting van het Zwarte Schaar. Met een regelwerk (of regelwerken) kan dit effect beperkt worden door de laagwaterstand op (een zeker) peil te houden.
  - Zomerbedverbreding in de IJssel versterkt de toename in IJsselafvoer bij lage afvoeren. Bij midden en hoge Lobithafvoeren (vanaf 1630 m^3/s) compenseert de zomerbedverbreding het effect van de oevergeulen op de Waal.
- Onderdeel van MP4 is de natuurlijke variant van MP3 (MP3+ met verruwing van de uiterwaard en verlagen van de zomerkades), die bij een gemiddelde hydrograaf (maximale afvoer in hydrograaf is 5800 m^3/s bij Lobith) vergelijkbaar effect op de bodemligging en waterstanden heeft als de langsdammen met oevergeulen uit MP3.
- Zomerbedverbreding in de Boven-IJssel:
  - leidt tot ~30 cm aanzanding in het verbrede traject en (initieel) tot 20-50 cm erosie benedenstrooms van de verbreding.
  - Stabiliseert de afvoer naar de IJssel in vergelijking met de referentie. Bij midden- en hoge Lobithafvoeren gaat dit ten koste van de Nederrijn.

- Kent een min of meer uniforme aanzanding over het verbrede traject, al zijn er lokaal wel verschillen doordat de mate van verruiming niet overal even groot is.
- Leidt op lange termijn tot erosie benedenstrooms van de zomerbedverbreding door toename van de IJsselafvoer.
- Leidt tot een tijdelijke toename van bodemerosie in het Pannerdensch Kanaal.

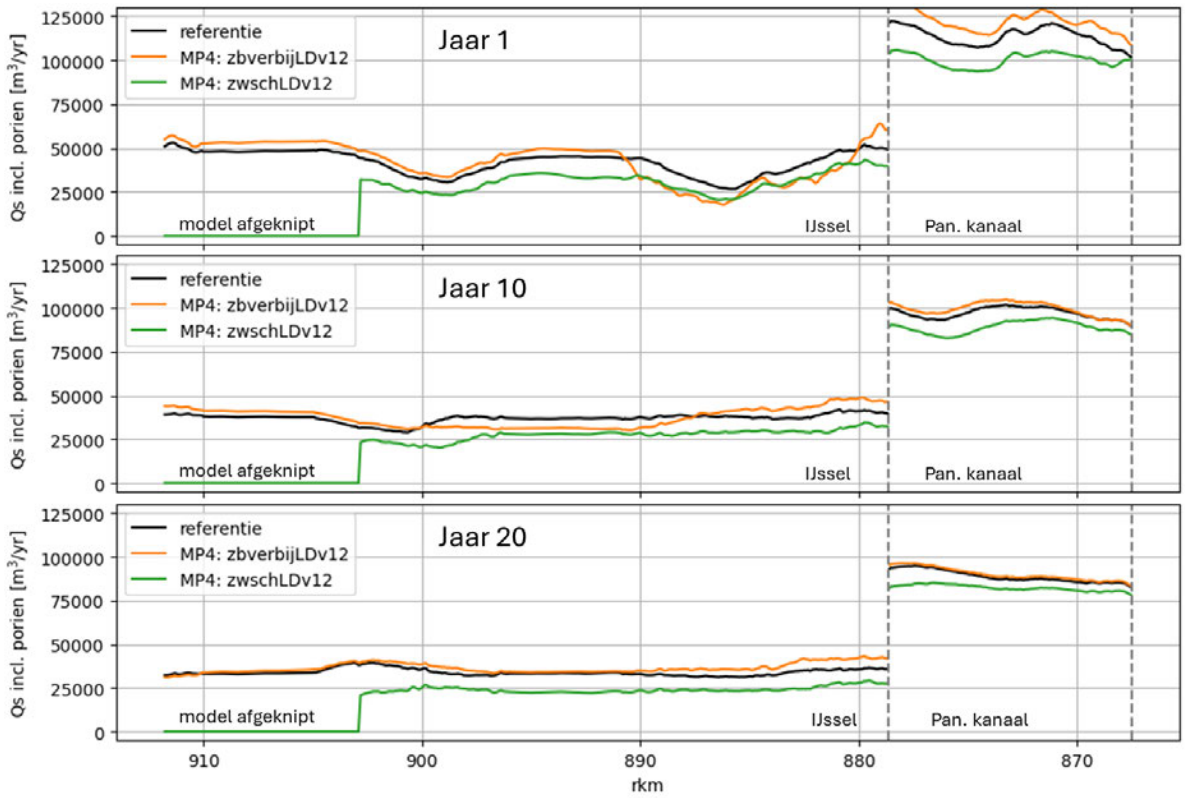
- Aansluiten van het Zwarte Schaar is zo gemodelleerd dat deze zo'n groot mogelijke waterstandsopzet veroorzaakt bij middelhoge afvoer en geen opzet veroorzaakt bij lage afvoeren. Of dit maakbaar en haalbaar is, is voor nu buiten beschouwing gelaten. Het aansluiten van het Zwarte Schaar:
  - heeft in de gekozen configuratie/schematisatie een beperkt aanzandend effect in de Boven-IJssel (in vergelijking met zomerbedverbreding).
  - Leidt in de Boven-IJssel tot lokale erosietrajecten. Erosie en sedimentatie wisselen zich af tussen lage en hoge afvoeren.
  - Leidt tot minder afvoer naar de IJssel op de lange termijn door aanzanding in het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel. Vooral bij midden/hoge afvoeren neemt de afvoer naar de IJssel flink af door de waterstandsopzet.
  - Leidt op de lange termijn (>20 jaar) waarschijnlijk tot aanzanding benedenstrooms van het Zwarte Schaar door afname van de IJsselafvoer.
  - Leidt tot een stabilisatie van de bodemligging in het Pannerdensch Kanaal.

5.4.1 Morfologische ontwikkeling

De berekeningen voor MP4 zijn inclusief maatregelen op de Waal. Daarvoor nemen we de maatregelen van MP3 (langsdammen en oevergeulen, LD-v12, inclusief sedimentmanagement). Het blijkt namelijk dat de effecten van de natuurlijke variant (MP3+, natuurlijke variant), die is geschematiseerd als MP3 met verruwing op de oevers en verwijdering van zomerkades (zie paragraaf 4.4.1), door die wijze van schematiseren een vergelijkbaar effect laat zien als MP3. De trajectgemiddelde bodemveranderingen op de Waal voor MP4 verschillen nauwelijks van de resultaten uit MP3 (zie Figuur 5.1: geen verschil te onderscheiden voor Boven-Waal), daarom focussen we de analyse hier op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

Sedimenttransport

Figuur 5.18 met de jaartransporten op de IJssel laat zien dat de zomerbedverbreding tussen IJsselkop en km 890 initieel leidt tot lagere transporten in het verruimde traject. In de loop van de tijd komt de bodem omhoog en neemt het sedimenttransport weer toe. Doordat de verruiming leidt tot wat meer afvoer naar de IJssel (paragraaf 5.4.2) nemen de transporten benedenstrooms van km 890 wat toe ten opzichte van de referentie. Door aansluiten van het Zwarte Schaar stuwen de waterstanden wat op, nemen de IJsselafvoeren af en daarmee het sedimenttransport op de Boven-IJssel. Dit zal zich in benedenstroomse richting (niet gemodelleerd) doorzetten.

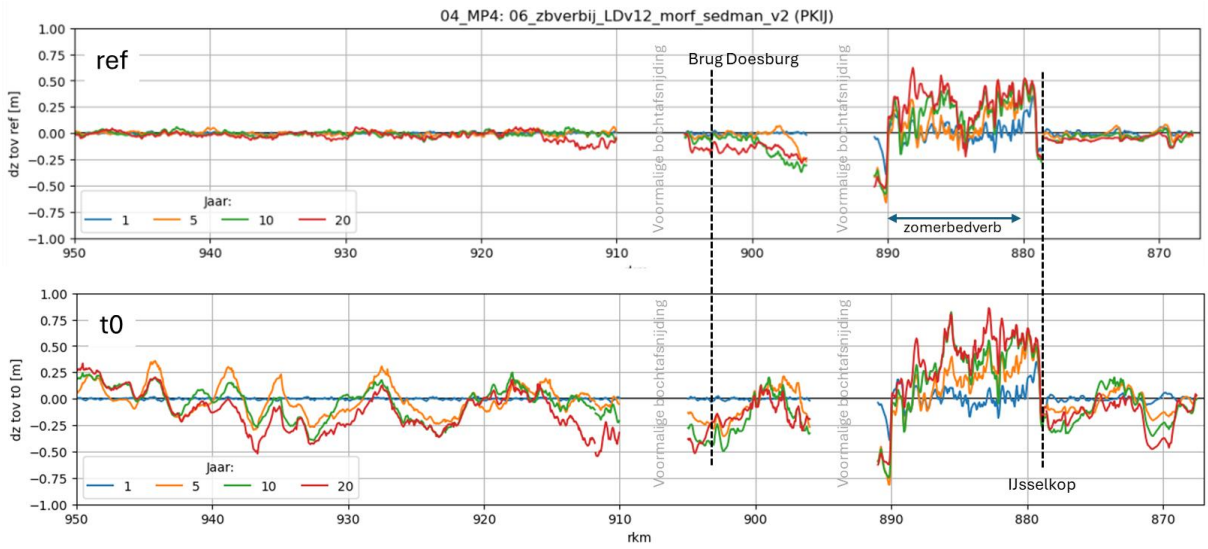


Figuur 5.18 MP4, vergelijking jaartransport met referentie voor Pannerdensch Kanaal en (deel van) Boven–IJssel.

Zomerbedverbreding Boven-IJssel i.c.m. meergeulenconcept op de Waal

Figuur 5.19 geeft de bodemverandering weer voor MP4 met zomerbedverbreding in de IJssel tussen km 879 en 890. Over het traject met zomerbedverbreding treedt aanzanding op die zich opbouwt vanaf bovenstrooms in benedenstroomse richting. Deze aanzanding is niet gelijkmatig over het verruimde traject, doordat de mate van verruiming van het dwarsprofiel niet overal even groot is (verruiming geïmplementeerd over een vaste roosterlijn). Over het traject met zomerbedverbreding (ongeveer 10 km) is de aanzanding na 20 jaar ongeveer 30 cm. Trajectgemiddeld over de Boven-IJssel (km 878.3-925.0) treedt er minder erosie op ten opzichte van MP3 LDv12(Figuur 5.1). Het traject waarover is verruimd is echter te kort om de trajectgemiddelde erosie volledig tegen te gaan. Benedenstrooms van de maatregel treedt erosie op doordat sedimenttransport bij het verbrede traject verlaagd is. In principe is dit een initieel effect, maar dit kan wel tot een erosiegolf leiden in het systeem. Daarnaast neemt de IJsselafvoer door de zomerbedverbreding toe wat het sedimenttransport over de gehele IJssel vergroot. Dit leidt tot een kleine toename van de erosie in de Midden-IJssel (Figuur 5.1). Initieel is de erosie het sterkst net benedenstrooms van de verbreding (50 cm). Na 20 jaar is de bodemverlaging over een afstand van ongeveer 15 km naar benedenstrooms verplaatst (orde 20 cm). Ten opzichte van T0 (initiële bodemligging) is de aanzanding op de Boven-IJssel nog wat groter omdat in de referentie de Boven-IJssel aanzandt.

De maatregel levert, t.o.v. T0, een bodemverlaging van ongeveer 5 cm op het Pannerdensch Kanaal. De bodemerosie neemt in het Pannerdensch Kanaal dus toe ten opzichte van de referentie (zie ook Figuur 5.1). Dit is een gevolg van toenemende stroomsnelheden in het Pannerdensch Kanaal (Figuur 9.2).



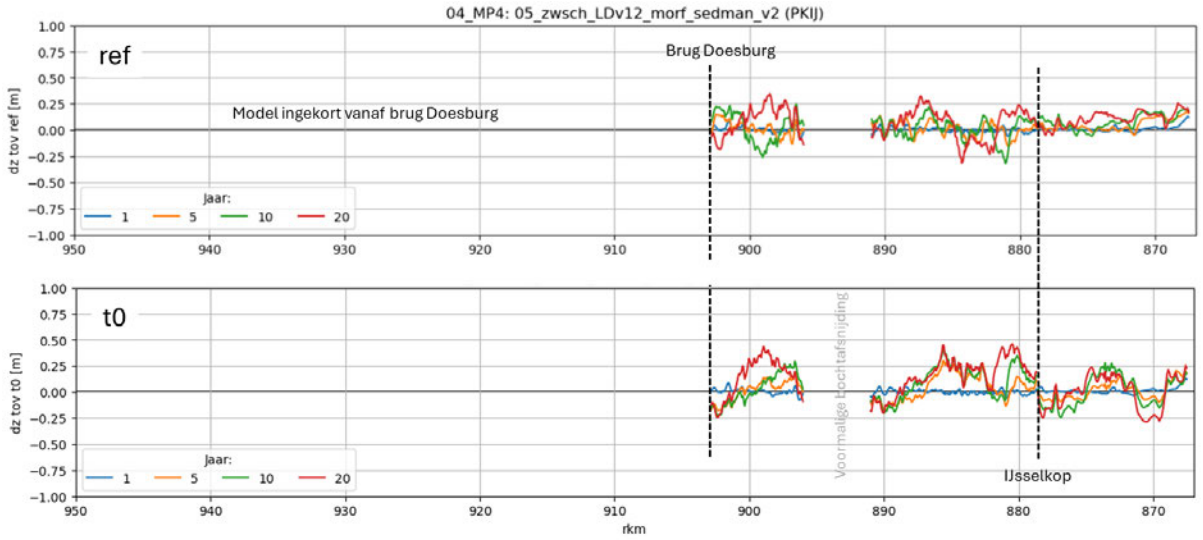
Figuur 5.19 MP4 – zomerbedverbreding in Boven-IJssel: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in het Pannerdensch Kanaal en de IJssel ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).

Aansluiten Het Zwarte Schaar i.c.m. meergeulenconcept op de Waal

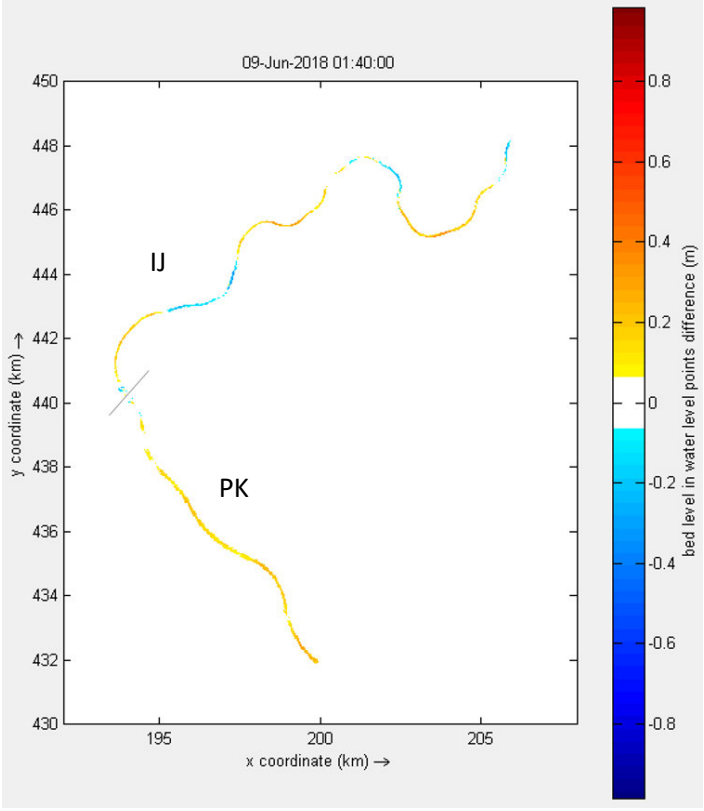
De waterstand is bij km 903 (brug Doesburg, rand model) voor afvoeren groter of gelijk aan Q1630 verhoogd met 46 cm ten opzichte van de initiële waterstand in de referentie (zie paragraaf 4.4.2). Dit resulteert in afnemende stroomsnelheden (kleiner verhang). Echter, bij lage afvoeren (Q1020 en Q1400) neemt de stroomsnelheid juist wat toe als gevolg van een steiler verhang op de Boven-IJssel (zie paragraaf 4.4.2). De aanzanding in bovenstroomse richting is dus kleiner dan 46 cm.

Figuur 5.20 geeft de bodemverandering weer voor MP4 met aansluiting van het Zwarte Schaar. Het effect op de trajectgemiddelde bodemligging (in vergelijking met de referentie) is weergegeven in Figuur 5.1. In vergelijking met de referentie is er tot jaar 5 nog weinig (aanzandend) effect van de maatregel op de IJssel te zien. Na 10 jaar ontstaat een patroon van erosie en sedimentatie. Na 20 jaar is er 10-20 cm aanzanding t.o.v. de referentie. Dit is ook te zien in Figuur 5.21, er lopen ‘golven’ door het systeem, maar er is geen 2D-gedrag in de zin van verandering in dwarshelling. Ten opzichte van T0 is er – net als in de referentie – een aanzandende trend. Benedenstrooms van het Zwarte Schaar zal initieel een erosiefront ontstaan. Echter door flink afnemende IJsselafvoer (door de verhoogde waterstand en een kleiner verhang bij midden en hoge afvoeren) kan er naar verwachting op de langere termijn ook benedenstrooms van de maatregel aanzanding ontstaan. De precieze omvang van deze effecten kan alleen in beeld worden gebracht wanneer het model daadwerkelijk wordt uitgebreid met het Zwarte Schaar.

Ten opzichte van de referentie komt de bodem van het Pannerdensch Kanaal omhoog, als gevolg van de waterstandsopzet. Figuur 5.1 laat zien dat een dergelijke maatregel de bodemerosie in het Pannerdensch Kanaal kan stoppen. Dit helpt ook om de (laag)waterstanden op peil te houden.



Figuur 5.20 MP4 – aansluiten Zwarte Schaar: Jaargemiddelde bodemontwikkeling in het Pannerdensch Kanaal en de IJssel ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de initiële bodemligging (T0, onder).



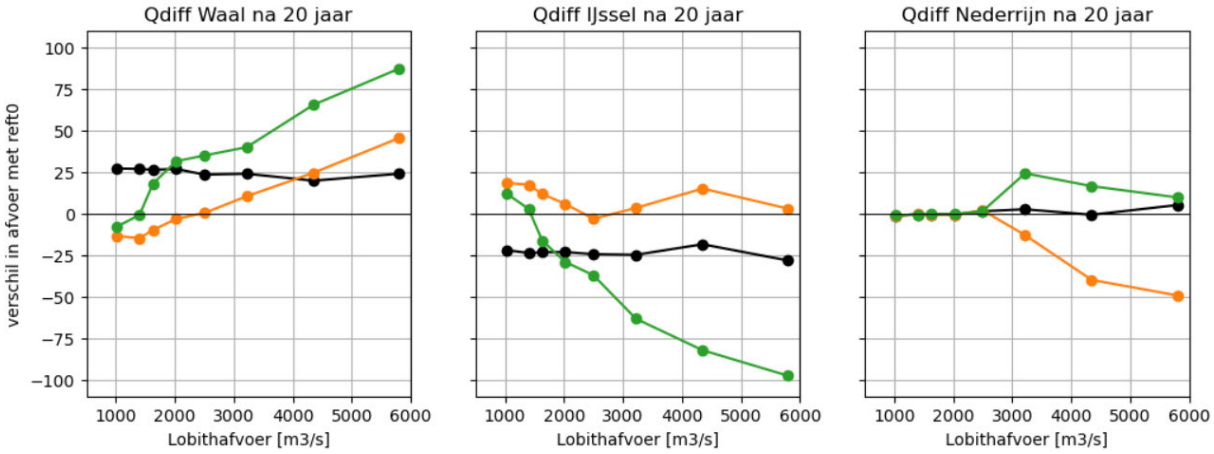
Figuur 5.21 MP4 – aansluiten Zwarte Schaar: Verschil in bodemligging met referentie na 20 jaar morfologische ontwikkeling voor Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel (tot brug Doesburg).

5.4.2 Effect op afvoerverdeling splitsingspunten na 20 jaar

Figuur 4.14 geeft het initiële effect van MP4 op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. De tijdsontwikkeling van (het effect op) de afvoerverdeling is opgenomen in Figuur 5.2.

Figuur 5.22 geeft eenzelfde figuur als Figuur 4.14, maar dan na 20 jaar morfologische ontwikkeling.

De zwarte lijn in Figuur 5.22 geeft de afvoerverdeling ten opzichte van de huidige situatie (dus T0). Na 20 jaar morfologische ontwikkeling levert de zomerbedverbreding bij alle beschouwde afvoeren een toename van de IJssel afvoeren ten opzichte van de referentie (oranje lijn middelste figuur); dit betekent dat de afvoer die extra naar de Waal gaat, ten koste gaat van de Nederrijn. Voor het Zwarte Schaar is het beeld voor lage afvoeren min of meer gelijk. Bij hogere afvoeren (vanaf Q1630) neemt de IJsselafvoer steeds verder af door netto aanzanding in de Boven-IJssel.



Figuur 5.22 MP4: effect op afvoerverdeling splitsingspunten na 20 jaar morfologische ontwikkeling voor afvoeren in de IRM-gemiddelde hydrograaf. Oranje: zomerbedverbreding, groen: aansluiten Zwarte Schaar, zwart: referentie.

6 Effectbepaling rivierfuncties

De vier maatregelpakketten die zijn beschouwd in dit onderzoek beoordelen we op de volgende vier rivierfuncties:

- Zoetwaterbeschikbaarheid
  - Afvoerverdeling splitsingspunten
  - Laagwaterstanden
- Waterveiligheid (hoogwaterstanden)
  - Initieel waterstandseffect van maatregelpakketten bij Q8400 (hoogst doorgerekende afvoer)
- Bevaarbaarheid (vlot en veilig scheepvaartverkeer)
  - Baggervolumes
  - Dwarsstroming
- Waterkwaliteit/natuur
  - Inundatiefrequentie uiterwaarden
  - Vergroten areaal natuur
  - Grondwaterstanden

We passen dezelfde systematiek toe als voor IRM-hoog- en laagwater, die ook grotendeels aansluit bij de beoordelingsaspecten van het in de PlanMER IRM toegepaste beoordelingskader[8]. Klasse-indelingen zijn anders gekozen vanwege de afwijkende focus en het detailniveau van de Delft3D modellering in vergelijking met D-Hydro, dat is gebruikt in de onderzoeken naar hoog- en laagwaterafvoerverdeling.

De effectbepaling is uitgevoerd per riviertraject uit Tabel 2.1. Alle maatregelpakketten zijn primair ingestoken op het stabiliseren van de bodemligging (ofwel: daarop zijn ze niet onderscheidend). Voor de effectbepaling zijn verandering van de afvoerverdeling op de splitsingspunten en effect op de waterstanden relevant. Deze gegevens zijn opgenomen in Bijlage F.

In de effectbepaling kijken we naar (i) het initieel effect van maatregelpakketten MP2-MP4 ten opzichte van de bodemligging op T=0 (dus puur een hydraulisch effect van een maatregel) en (ii) het langetermijneffect op afvoerverdeling en waterstand na 20 jaar morfologische ontwikkeling voor MP1-MP4. Tijdschalen en variatie in ontwikkeling van trends in de tijd zijn beschouwd in voorgaande hoofdstukken. Dwarsverbanden en combinaties worden besproken in de synthese in hoofdstuk 7.

Gezien de onzekerheden in het Delft3D model ten aanzien van de hydrodynamische effecten kijken we niet naar de getalswaarde van effecten, maar beoordelen we kwalitatief door de maatregelpakketten ten opzichte van elkaar te scoren (--/-/0/+/++), met daarbij steeds een beknopte onderbouwing.

[8] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/12/15/bijlage-5-planmer-programma-irm-eindrapport-14-november-2023

6.1 Zoetwaterbeschikbaarheid: waterstanden en afvoer IJssel bij laagwater

Het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) onderzoekt de wenselijke afvoerverdeling over de splitsingspunten bij laagwater waarbij een landelijke afweging wordt gemaakt hoe het beperkt beschikbare zoete water te verdelen in tijden van droogte. Hier is nog geen besluit over genomen. Wat vaststaat, is dat meer afvoer naar de IJssel bij laagwater gewenst is om het IJsselmeer als zoetwaterbuffer goed te laten functioneren. Als voorlopige wenselijke afvoerverdeling geldt dat bij een afvoer van 1.300 m^3/s bij Lobith de minimaal gewenste IJsselafvoer 285 m^3/s is, terwijl de Nederrijn 30 m^3/s afvoert. Daarvoor moet ten opzichte van de huidige situatie de afvoer naar de IJssel ca. 57 m^3/s toenemen. Naast het beïnvloeden van de afvoerverdeling is een expliciet doel van RvdR2.0 om voor de gehele Rijntakken de laagwaterstanden te verhogen (zowel ten opzichte van 'T0', als ten opzichte van de situatie met doorgaande bodemerosie en wijzigende afvoerverdeling, i.e. MP1). Daarom splitsen we de effectbeoordeling voor de functie zoetwaterbeschikbaarheid in:

- Een beoordeling op laagwaterstanden voor alle trajecten.
- Een separate beoordeling op (het effect op) de afvoer naar het Pannerdensche Kanaal en IJssel.

In voorliggend onderzoek kijken we niet zozeer naar de daadwerkelijke getallen van de afvoerverdeling en de laagwaterstanden, maar hoe de maatregelpakketten zich tot elkaar verhouden. In lijn met het onderzoek naar de Afvoerverdeling laagwater (Gensen et al, 2025) is er voor het aspect afvoerverdeling besloten alleen de verandering van de laagwaterafvoerverdeling te beoordelen ten opzichte van de gewenste afvoerverdeling. Wanneer de IJsselafvoer toeneemt en de minimale Nederrijnafvoer wordt gehandhaafd, zal de Waalafvoer afnemen. Omdat de afweging voor de gewenste afvoerverdeling door DPZW wordt gedaan, wordt in dit rapport niet de benedenstroomse doorwerking van de afname in Waalafvoer op bijvoorbeeld zoutindringing van de Rijn-Maasmonding beoordeeld. Voor Waal en Nederrijn worden wel ook de laagwaterstanden beoordeeld.

Laagwaterstanden
MP1 scoort slecht door doorgaande bodemerosie en het verder scheeftrekken van de afvoerverdeling. Alle overige maatregelpakketten zijn in beginsel bedoeld om de bodemerosie in eroderende trajecten te stoppen. MP3 en MP4 reduceren weliswaar de Waalafvoer bij laagwater, maar dit wordt gecompenseerd door versmalling van het zomerbed en daaraan gerelateerde waterstandsopzet. Daarom resulteert er voor de meeste trajecten voor alle maatregelpakketten een positieve score (Tabel 6.1). In het splitsingspuntengebied zijn de effecten het sterkst, omdat de maatregelen zich daar concentreren. MP2 heeft een positief effect op laagwaterstanden in de Beneden-Waal ten opzichte van MP1, doordat het suppletiemateriaal langzaam naar benedenstrooms wordt getransporteerd.

Specifiek voor het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn geldt dat suppleren in de eroderende trajecten van Boven-Waal en Boven/Midden-IJssel (MP2) de laagwaterstand stabiel houdt in vergelijking met MP1. Daarbij is het belangrijk om te realiseren dat dat een stuwkromme-effect is. In Figuur 5.1 is te zien dat in MP2 de bodem van het Pannerdensche Kanaal nóg verder zakt dan voor MP1 (daarom score '--'); hetzelfde geldt voor MP4-zvij (meergeulenconcept met zomerbedverbreding op de IJssel) waarbij op het Pannerdensch Kanaal stroomsnelheden toenemen (Figuur 9.2).

In MP3 en MP4 scoren Pannerdensch Kanaal en IJssel goed op de functie laagwaterstanden doordat via het meergeulenconcept op de Waal meer water via Pannerdensche Kanaal naar de IJssel gaat, wat de laagwaterstanden verhoogt. Het effect op de laagwaterstanden dempt langzaam uit in benedenstroomse richting op de IJssel. De combinatie van het meergeulenconcept met zomerbedverbreding in de IJssel ('MP4 zvij') scoort ook '++'; de combinatie van nóg meer afvoer naar de IJssel compenseert voor de laagwaterstandsreductie veroorzaakt door de lokale verbreding (Figuur 9.6).

Tabel 6.1 Effectbepaling rivierfunctie zoetwaterbeschikbaarheid, laagwaterstanden.

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	–	**0**	+	+	+	+	+
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0	– –	**0**	++	++	++	++	++
	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5	–	**0**	+	+	+	+	+
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4	+	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	–	**0**	– –	++	++	++	– –
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5	–	**0**	++	++	++	++	++
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	– –	**0**	++	++	++	++	+
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	– –	**0**	++	++	++	++	++
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	–	**0**	+	+	+	+	++

*Afvoer Pannerdensch Kanaal en IJssel bij laagwater*MP1

Tabel 6.2 Effectbepaling rivierfunctie zoetwaterbeschikbaarheid, laagwaterafvoer naar Pannerdensch Kanaal en IJssel.

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	niet relevant						
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0							
	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5							
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4							
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7							
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	– –	–	++	++	++	++	++
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5	niet relevant						
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	– –	–	++	++	++	++	++
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	– –	–	++	++	++	++	++
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	– –	–	++	++	++	++	++

6.2 Hoogwaterveiligheid

Het effect op hoogwaterveiligheid beoordelen we bij Q8400, wat in dit onderzoek de hoogst doorgerekende afvoer is. Daarbij kijken we naar de initiële veranderingen (zie Figuur 9.8).

Een dalende waterstand ten opzichte van de situatie zonder maatregelen (referentie) wordt positief beoordeeld, omdat daarmee de waterkeringen minder worden belast. Als de waterstand ergens in een traject met 20 cm of meer zakt wordt het effect als groot gewaardeerd (++).

De referentie (MP1) scoort overwegend positief, omdat door de zakkende zomerbedbodem de hoogwaterstand (beperkt) meezakt[9] Dat geldt vooral in de eroderende trajecten, maar in mindere mate ook voor de Bovenrijn door doorgaande bodemerosie in Boven-Waal en Pannerdensch Kanaal (stuwkromme).
Door suppleties (MP2) is het beeld licht negatief ten opzichte van de referentie (MP1) in trajecten die in de huidige situatie eroderen, doordat de suppleties de bodem en daarmee hoogwaterstand stabiliseren. Ten opzichte van de huidige situatie is de score neutraal.

Het meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen in de Waal (MP3) levert op de Waal in het traject met (ruime) oevergeulen een positief effect op de hoogwaterveiligheid (het verruimende effect is groter dan het effect van verhoogde afvoer naar de Waal). In de benedenstroomse trajecten van de Waal zorgt de toename in afvoer juist voor een negatieve score op hoogwaterveiligheid omdat daar geen rivierverruiming is toegepast. Voor de IJssel en in mindere mate het Pannerdensch Kanaal zorgt verschuiving van de afvoer richting de Waal juist voor een verbetering van de hoogwaterveiligheid.
In het meergeulenconcept met grote nevengeulen (MP3-groen) zorgt de verhoogde afvoercapaciteit voor een vergelijkbaar effect als MP3 met de langsdammen, maar door de begroeiing op de eilanden is de daling van de hoogwaterstanden op de Boven- en Midden-Waal iets minder.

Het pakket maximale synergie met aansluiting van Het Zwarte Schaar (MP4-Zwarte Schaar) zorgt voor een toename van de hoogwaterstand in de Boven-IJssel en scoort dus negatief. In de Midden-IJssel zullen de hoogwaterstanden dan wat zakken doordat minder water naar de IJssel stroomt, ofwel een positieve score. De berekeningen laten zien dat door de morfologische veranderingen de afname in afvoer naar de IJssel in de tijd doorzet (ook voor de hoogste afvoer Q5800 in de afvoerhydrograaf), waardoor de (hoog)waterstanden op termijn weer wat zakken. Met het pakket maximale synergie met zomerbedverbreding IJssel (MP4-zombedverbreding) zakken de hoogwaterstanden in de Boven-IJssel (bij de hoogwaterreferentie[10] waarschijnlijk beperkt). Benedenstrooms nemen de hoogwaterafvoeren en -waterstanden toe door de toename in IJsselafvoer, hetgeen resulteert in een negatieve score.

Tabel 6.3 Effectbepaling rivierfunctie hoogwaterveiligheid

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	+	**0**	+	+	+	+	+
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0	++	**0**	++	++	+	+	+

[9] Tenzij de verandering in afvoerverdeling te groot wordt, maar daar kunnen we op basis van de uitvoerde berekeningen (hoogst-doorgerekend afvoerniveau bij Lobith is 8400 m^3/s) geen uitspraken over doen en wegen we daarom niet mee in de beoordeling.
[10] Voor de trajecten met maatregelen is dit de situatie met een Lobithafvoer van 16.000 m^3/s.

	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5	+	0	+	+	0	0	0
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4	0	0	–	–	–	–	–
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7	0	0	– –	– –	–	–	–
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	+	0	++	++	++	+	++
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5	0	0	+	+	+	+	++
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	+	0	+	+	+	– –	++
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	0	0	+	+	+	–	–
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	0	0	+	+	+	0	–

6.3 Waterkwaliteit/natuur

Voor het doelbereik voor natuur en ecologische waterkwaliteit zijn aspecten als hydrodynamiek, morfodynamiek en ruimte voor natuurontwikkeling belangrijk. Ook de inundatiefrequentie van uiterwaarden is een belangrijk aspect. Effecten op grondwaterstanden laten we hier buiten beschouwing, omdat de effecten van maatregelen op de laagwaterstanden en grondwaterstanden relatief beperkt zijn. Het gaat meer om hectares natuurontwikkeling en de afstand van uiterwaardbodem tot grondwaterstanden die veel effectiever door grootschalige vergravingen wordt verkleind. Het opzetten van laagwaterstanden helpt wel bij het voorkomen van het uitzakken van grondwaterstanden in tijden van droogte; zie daarvoor de tabel met effecten op laagwaterstanden in paragraaf 6.1.

Voor de hydrodynamiek en morfodynamiek volgen we de beoordeling van het onderzoek naar de Afvoerverdeling laagwater (Gensen et al, 2025).
Het meergeulenconcept op de Waal met langsdammen met oevergeulen of de natuurlijke variant met nevengeulen door de uiterwaard (MP3 en MP4) zorgen voor een toename van de hydro- en morfodynamiek. Vanuit het oogpunt van natuur is diversiteit in oevergeulbreedtes en -dieptes gewenst. Dit resulteert namelijk in diversiteit in habitats. De specifieke inrichting van de geulen bepaalt dus sterk de verbetering van hydro- en morfodynamiek. Voor de Waal wordt in Gensen et al (2025) de score '++' gegeven, gedefinieerd als "Meer variatie in ruimte en tijd van de stroming en waterdieptes en geschikte grondwaterstanden. Qua morfodynamiek is sprake van meer vrije uitwisseling van sediment tussen zomerbed, oeverzone en uiterwaard". Tevens geldt dat scheepvaartgolven beperkt(er) indringen in oevergeul of nevengeulen (in vergelijking met kribvakken in de huidige situatie).
In dit onderzoek kijken we verder naar (a) de waterstand bij Lobithafvoer 4350 m^3/s, een belangrijke maat voor de inundatiefrequentie, want dit is ongeveer het niveau waarbij de meeste uiterwaarden in de Rijntakken beginnen mee te stromen en (b) de positieve natuurwaarde van oevergeulen en zomerbedverbreding door toename van de hydro- en morfodynamiek. De effecten op de waterstanden bij Q4350 zijn opgenomen in Figuur 9.9 (initieel) en Figuur 9.10 (na 20 jaar morfologische ontwikkeling). Het continu storten van sediment (MP2) heeft mogelijk een effect op biota (veel vaarbewegingen) en de onderwaterbodem; dat werken we in deze globale analyse verder niet uit. Het meestromen of inunderen van (bestaande of nieuwe) nevengeulen of strangen kan verbeteren door de opzet van laagwaterstanden; dit aspect is niet meegenomen in de beoordeling.

Toelichting bij Tabel 6.4:

- MP1 (referentie, niets doen) scoort slecht; een doorzakkende bodem en verder scheeftrekkende afvoerverdeling is ongewenst.
- MP2 (suppleties eroderende trajecten Waal en IJssel) scoort op vrijwel alle trajecten neutraal ten opzichte van de huidige situatie en daarmee positief ten opzichte van MP1, doordat door bodemstabilisatie de waterstand bij Q4350 stabiliseert, ook op het Pannerdensch Kanaal (door opzet van de IJsselwaterstand). De arealen natuur nemen echter niet toe. Ook is er geen sprake van functie-scheiding. Juist de scheiding van de functies bevaarbaarheid en natuur levert ecologische winst op (Deltares, 2021).
- MP3 (meergeulenconcept Waal met langsdammen en oevergeulen) levert, ten opzichte van MP1 en T0, over het algemeen een verbetering op. Met name vanwege de toename van hydro- en morfodynamiek en de toename in hectares met potentie voor natuurontwikkeling. MP4-groen scoort nog beduidend positiever door ruimte en specifieke inrichting voor natuurontwikkeling in de uiterwaarden en 'meer natuurlijke' nevengeulen in plaats van oevergeulen. In de takken zonder het meergeulenconcept zakken de waterstanden bij Q4350 en daardoor neemt de inundatiefrequentie van de uiterwaarden wat af. De score is wel iets minder negatief dan MP1 beoordeeld (ofwel -). Op de Beneden-Waal neemt de afvoer wat toe en daarmee de overstromingsfrequentie (0/+).
- Voor MP4 zorgt de afvoertoename van de zomerbedverbreding naar de IJssel voor een toename van de waterstand in benedenstroomse trajecten. Voor het aansluiten van het Zwarte Schaar wordt de waterstandsopzet (deels) tenietgedaan door de afvoerafname.

Voor het aspect ruimte voor natuurontwikkeling volgen we de beoordeling van Gensen et al (2025) waarin de hectares extra oevergeul de maatregelpakketten met meergeulen een + geven. Voor het pakket MP4 met grote nevengeulen zal de oppervlakte van de nevengeulen toenemen ten opzichte van de oevergeulen en zal verder de natuurpotentie groter zijn, dus een waardering ++.

Tabel 6.4 Effectbepaling rivierfunctie Waterkwaliteit/natuur, overstromingsfrequentie uiterwaarden (o.b.v. waterstandseffect bij QLobith 4350 m^3/s)

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	– –	0	–	–	–	–	–
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0	– –	0	+	+	+	+	+
	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5	– –	0	+	+	+	+	+
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4	– –	0	0/+	0/+	0/+	0/+	0/+
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7	0	0	0	0	0	0	0
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	–	0	–	–	–	0	–
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5	–	0	–	–	–	0	–
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	– –	0	–	–	–	+	+
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	– –	0	–	–	–	0	+
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	0	0	0	0	0	0	0

6.4 Bevaarbaarheid

Voor de functie bevaarbaarheid gaan we separaat in op twee onderdelen:

- Waterdiepte en afvoerverdeling bij laagwater
- Baggervolumes en dwarsstroming

Het stoppen van de bodemerosie is van groot belang voor de bevaarbaarheid, omdat knelpunten bij vaste lagen (zoals bij de vaste laag van Nijmegen) en aangrenzende waterinfrastructuur als sluizen en havens dan niet erger worden. Voor MP1, niets doen, ontstaan in de eroderende trajecten problemen voor de scheepvaart. Voor de IJssel wat meer dan voor de Waal, omdat in MP1 de (laagwater)afvoerverdeling langzaam verschuift richting de Waal ten koste van de IJssel. Pakket MP2 is erop gericht om de bodem op niveau te houden in eroderende trajecten van de Waal en de IJssel. MP2 levert een zeer beperkte bijdrage aan het bijsturen van de afvoerverdeling over de splitsingspunten. Ten opzichte van de referentie (MP1) zorgt MP2 voor iets minder afvoerafname naar de IJssel (Figuur 5.2), wat gunstig is. Het is echter onvoldoende om de laagwaterdiepte significant te verhogen (geen versmalling zomerbed); MP2 scoort daarom gelijk of iets beter dan MP1 voor bevaarbaarheid.
MP3 en MP4 versmallen de rivier op de Waal en vergroten daarmee de waterdiepte en wijzigen de afvoerverdeling. Voor deze pakketten geldt (zie ook Tabel 6.5):

- Langs de Boven-Rijn worden de waterstanden opgestuwd door het meergeulenconcept in de Waal, score ‘+’.
- Langs het traject Waalbochten (Boven-Waal) worden de waterstanden het meest opgestuwd, omdat het effect vanaf benedenstrooms volledig via een stuwkromme is opgebouwd. Score ‘++’.
- Het traject Midden-Waal ligt in de stuwkromme van het waterstandseffect. Benedenstrooms in het traject stijgt de waterstand en waterdiepte niet, terwijl deze in het bovenstroomse deel stijgt, score ‘+’.
- Langs de Beneden-Waal en in mindere mate langs de Boven-Merwede (Getijden-Waal) in verband met de invloed van de zee en getij, dalen de waterstanden en waterdieptes als gevolg van een afname van de Waalafvoer, score ‘-’.
- Langs het Pannerdensch Kanaal, de Boven-IJssel en de Boven-Nederrijn tot aan stuw Driel stijgen de waterdieptes als gevolg van de toegenomen afvoer, score ‘+’ voor MP3. Voor MP4 met zomerbedverbreding IJssel stroomt er extra afvoer naar de IJssel, maar verandert de waterdiepte niet veel door de verbreding, score ‘0’; benedenstrooms van de verbreding neemt de waterdiepte wel toe door de toename in IJsselafvoer waar vooral de Midden-IJssel van profiteert, score ‘+, 0/+’. Door MP4 met aansluiting van Het Zwarte Schaar nemen de laagwaterstanden toe, dat geeft score ‘++’; door een toename van de vaarafstand schalen we dit af naar ‘+’.
- Langs de Nederrijn-Lek vanaf stuw Driel (niet gemodelleerd, dus ook niet in tabel) verandert niks, score ‘0’.
- In de Midden-IJssel en verder benedenstrooms neemt het waterstandseffect van de toegenomen afvoer geleidelijk af, gemiddeld geeft dit score ‘0/+’ (MP4 Zwarte Schaar, score ‘0’).

Tabel 6.5 Effectbepaling rivierfunctie bevaarbaarheid; (laagwater)waterdiepte en afvoerverdeling.

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	–	**0**	+	+	+	+	+
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0	– –	**0**	++	++	++	++	++
	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5	–	**0**	+	+	+	+	+
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4	+	**0**	–	–	–	–	–
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7	**0**	**0**	–	–	–	–	–

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	–	**0**	+	+	+	+	+
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5	–	**0**	+	+	+	+	+
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	– –	**0/+**	+	+	+	+	**0**
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	– –	**0/+**	**0/+**	**0/+**	**0/+**	+	+
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	–	**0/+**	**0/+**	**0/+**	**0/+**	+	**0/+**

Naast bovenstaande beoordeling op (laagwater)diepte en afvoerverdeling, beoordelen we de functie bevaarbaarheid ook op basis van met Delft3D berekende baggervolumes (voor een selectie maatregelpakketten) en het effect op dwarsstroming voor MP3. Voor toelichting op de berekende baggervolumes, zie paragraaf 5.1.2 en voor toelichting op de dwarsstroming, zie Bijlage F.3. De score is een combinatie van beide aspecten, waarbij baggervolume (vaargeulonderhoud) primair is, en dwarsstroming secundair.

Baggervolumes:

- zowel initieel als op de lange termijn leveren alle maatregelpakketten meer vaargeulonderhoud op dan de referentiesituatie (MP1: niets doen). Overigens neemt voor alle maatregelpakketten het berekende baggervolume wel af in de tijd. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat het baggerreferentievlak niet wordt ge-update, maar ook dat in de eerste jaren veel baggerwerk nodig is om sediment te "herverdelen" in het systeem. Langzaam ontstaat een soort "evenwicht".
- MP1: modelberekeningen laten zien dat het baggervolume voor MP1 langzaam afneemt in de tijd. Dat komt door de combinatie van het wegzakken van de rivierbodem en het niet updaten van het baggerreferentievlak. Toch scoren we de Waal negatief. Door bodemerosie zakt de laagwaterstand steeds verder waardoor de bevaarbaarheid bij vooral vaste lagen steeds kritischer wordt. De langzame toename van afvoer naar de Waal voor MP1 compenseert hier niet voor.
- MP2: voor de Waal resulteert MP2 in ongeveer 50.000 m^3/jaar extra baggervolume ten opzichte van MP1, vooral in Boven- en Midden-Waal. Dat geldt ook voor de IJssel. Waarschijnlijk heeft dit geen of marginaal effect in de benedenstroomse trajecten in de riviertakken.
- MP3: zowel initieel als op de lange termijn is meer vaargeulonderhoud nodig op de Waal.
- De berekende baggervolumes in de oevergeulen op de Waal (MP3/MP4) zijn in absolute zin onzeker (paragraaf 7.2), maar we zien wel dat het volume voor LDv16 afneemt t.o.v. LDv12. Dit lijkt wel plausibel omdat in LDv16 het zomerbed minder wordt versmald op de Midden-Waal en de oevergeulen daar minder breed zijn (Tabel 4.1).

Dwarsstroming:

- neemt voor MP3 in het gebied met de oevergeul toe, ook door versmalling en verspringing van langsdammen per oever. Stroomlijnen van instroomopeningen lijkt dwarsstroming te beperken.
- Voor LDv16 waar in de Midden-Waal minder versmalling is toegepast, lijkt de dwarsstroming minder groot.
- Dit is meegewogen in onderstaande tabel in de Boven-Waal en Midden-Waal.

Tabel 6.6 Effectbepaling rivierfunctie bevaarbaarheid; baggervolumes en dwarsstroming.

Traject		rkm	MP1 ref	MP2 dznour	MP3 LDv12	MP3 LDv16	MP3 groen	MP4 zws	MP4 zvij
Boven-Rijn/ Waal									
	1.1 Bovenrijn	857.7-867.0	–	**0**	**0**	**0**			niet bepaald
	1.2 Boven-Waal	867.0-887.0	–	– –	–	–			
	2.1 Midden-Waal	887.0-911.5	–	– –	– –	–			
	2.2 Beneden-Waal	911.5-932.4	–	**0**	**0**	**0**			
	2.3 Getijden-Waal	932.4-952.7	**0**	**0**	**0**	**0**			
PanKanaal/ Nederrijn									
	1.3 Pann. Kanaal	867.0-878.3	niet bepaald						
	1.5 Boven-Nederrijn	878.3-891.5							
IJssel									
	1.4 Boven-IJssel	878.3-925.0	+	–	**0**	**0**			niet bepaald
	4.1 Midden-IJssel	925.0-965.0	+	–	**0**	**0**			
	4.2 Beneden-IJssel	965.0-1006.0	+	**0**	**0**	**0**			

6.5 Kosten en uitvoerbaarheid

De maakbaarheid van de maatregelpakketten is sterk verbonden met of de voorziene maatregelen praktisch uitvoerbaar zijn en of de kosten acceptabel zijn. Ook is het relevant of de maatregelen goed faseerbaar, uitbreidbaar en adaptief zijn (bijvoorbeeld i.v.m. onverwachte effecten of door klimaatverandering). Voor elk van de maatregelpakketten geven we een korte beschouwing van de uitvoerbaarheid en de kosten. Voor een globale kosteninschatting maken we gebruik van het 'memo eenheidskosten IRM' (Kind et al., 2022) en Ecorys (2023), met prijspeil 2021.

De gebruikte eenheidsprijzen voor de maatregelen zijn gegeven in Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Gebruikte eenheidskosten

Type maatregel	kosten	eenheid
Zomerkadeverlaging	3,2	M €/km
Langsdammen	9,5	M €/km
Oevergeul	0,215	M €/m breedte*
Zomerbedverbreding	0,352	M €/m/km
Uiterwaardproject (per m3)	43	€/m^3
Baggeren en storten vaargeul	10	€/m^3
Baggeren en storten oevergeul	20	€/m^3
Suppleren extern sediment	47	€/m^3

*voor extra breedtes boven 80 m oevergeulbreedte

De investeringskosten en de onderhoudskosten per jaar zijn per maatregelpakket samengevat in Tabel 6.8.
Voor het baggerwerk in de oevergeulen wordt een eenheidsprijs aangehouden die het dubbele is van het reguliere baggerwerk in de vaargeul, omdat de bereikbaarheid van de oevergeulen lastiger is.
Aangezien de zomerbedverbreding op de IJssel in dit onderzoek getrapt wordt uitgevoerd (over 10 m breedte verdiept tot de omliggende zomerbedbodem, en over 10 m breedte verdiept tot OLR), wordt voor de kosten voor de verbreding gerekend met 15 m verbreding.

Tabel 6.8 Globale investeringskosten (afgerond op 5 M€) en onderhoudskosten per maatregelpakket

Type kosten	**Ref**	**MP2**	**MP3**		**MP4**		
		Dz_nour	LD-v12	LD-v16	MP3+	Zwarte Schaar	Verbr IJssel
Investeringskosten (M€)							
Langsdammen (standaard)			415	415	830[1]		
Extra afgraven oevergeulen			590	605	1.180[1]		
Zomerkadever wijdering					390		
Afgraven verbreden IJssel							60
Profileren Zwarte Schaar[2]						20	
Kunstwerk(en) Zwarte Schaar						PM	
Totaal	0	0	1.005	1.020	2.400	20	60
Jaarlijkse kosten (M€/jaar)							
Vaargeulonderhoud	2,50	3,05	3,08	2,63	nb	nb	nb
Suppleties[3]		9,06	5,15	5,08	5,15		
Onderhoud oevergeulen[4]			3,93	2,61	3,93		
Totaal	2,50	12,1	12,2	10,3	9,08	--	--

[1] Aangenomen dat de aanlegkosten van een nevengeul twee keer zo groot zijn als een oevergeul
[2] Gebaseerd op 1 m verdiepen over 80 m breed en 6 km geul
[3] De suppleties voor MP3 en MP4 hebben betrekking op het vullen van de kuil benedenstrooms van de laatste langsdam. Als het Zwarte Schaar of de zomerbedverbreding onderdeel zijn van MP4, zijn die kosten op de Waal er ook, maar die kosten zijn alleen opgenomen onder MP3+.
[4] Gezien de onzekerheid over de grote onderhoudsvolumes (paragraaf 7.2), is dit bedrag ook onzeker en naar verwachting een grote overschatting.

MP1 – niets doen
Voor MP1 zijn er geen aanlegkosten, maar het vaargeulonderhoud gaat wel door. De totale hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk bedraagt circa 5 miljoen m^3 over een simulatieperiode van 20 jaar. Deze hoeveelheid betreft uitsluitend het onderhoud in de Nederlandse Rijntakken, exclusief de Duitse Niederrhein. Uitgaande van een eenheidsprijs van 10 €/m^3, leidt dit tot een gemiddelde jaarlijkse kostenpost van 2,50 miljoen € per jaar.

MP2 – suppleren
Voor het suppleren rekenen we met een eenheidsprijs van 47 €/m^3. Suppleties vinden plaats op zowel de Waal als de IJssel. Over een periode van 20 jaar bedraagt het totale suppletievolume op de Waal 3,09 miljoen m^3 en op de IJssel 0,96 miljoen m^3, inclusief de initiële suppletie op tijdstip t = 0. In totaal zijn er dus 21 suppletiemomenten meegenomen in de analyse.
Op basis van het gemiddelde volume over deze momenten en de genoemde eenheidsprijs komen de gemiddelde jaarlijkse suppletiekosten uit op circa 9,06 miljoen € per jaar.

MP3 – meergeulenconcept Waal
Het versmallen van de Waal met langsdammen en daarachter oevergeulen is praktisch maakbaar, gezien de pilot-langsdammen die al zijn uitgevoerd. Wel is in voorliggend onderzoek gebleken dat de oevergeulen bij de bestaande langsdammen te klein zijn om de sedimenttransportgradiënt vanaf de Pannerdense Kop te nivelleren. De oevergeulen moeten dus veel groter worden en in hoeverre dat maakbaar is dient nog te worden uitgezocht.

Voor de fasering (benedenstrooms of bovenstrooms beginnen) zijn de aanbevelingen uit de studie 'Uitwerking beleidskeuze Rivierbodemligging' leidend. De belangrijkste aanbeveling is dat continu sedimentmanagement nodig is gedurende de aanleg van de langsdammen om de bodemerosie te stoppen. Behalve de ligging van de kruin zijn langsdammen een adaptieve maatregel in de zin dat de effecten grotendeels bepaald worden door de dimensionering van (instroom)drempels en van de oevergeul. Ten aanzien van de laagwaterafvoerverdeling zijn langsdammen niet adaptief; een eenmaal gekozen ligging van de langsdammen kan niet eenvoudig gewijzigd worden.
Regelknoppen als de hoogte en breedte van drempels en dimensies van de oevergeulen zorgen maar voor beperkte adaptiviteit voor de afvoerverdeling. De eenheidskosten per strekkende kilometer langsdam inclusief het verwijderen van kribben waardoor een (maximaal) 80 m brede oevergeul ontstaat, zijn 9,5 M€. In dit onderzoek is gebleken dat de oevergeulen hoogstwaarschijnlijk ruimer moeten zijn dan de kribvakken aan ruimte bieden. De extra volumes te ontgraven grond zijn berekend en vermenigvuldigd met een eenheidsprijs van 43 €/m^3. Dit geeft aanlegkosten van langsdammen en oevergeulen van ruim 1 miljard €. Voor LD-v16 (versmalling Midden-Waal 20 m i.p.v. 40 m) zijn de kosten iets hoger dan voor LD-v12, met name omdat de oevergeulen op de Boven-Waal wat groter moeten zijn in die variant.

MP4 – maximale synergie
In dit maatregelpakket worden de oevergeulen vervangen door nevengeulen, zomerkades verwijderd en natuur ontwikkeld op eilanden. Het grondwerk zal sterk toenemen, omdat kribvakken worden opgevuld om eilanden te creëren en de nevengeulen compleet moeten worden uitgegraven. De maakbaarheid van deze variant dient ook nader te worden onderzocht al is het maar vanwege het ruimtebeslag van dergelijk grote maatregelen.
De precieze meerkosten ten opzichte van de langsdammen met oevergeulen zijn niet in detail bepaald, maar als eerste schatting is een verdubbeling van de kosten aangenomen.

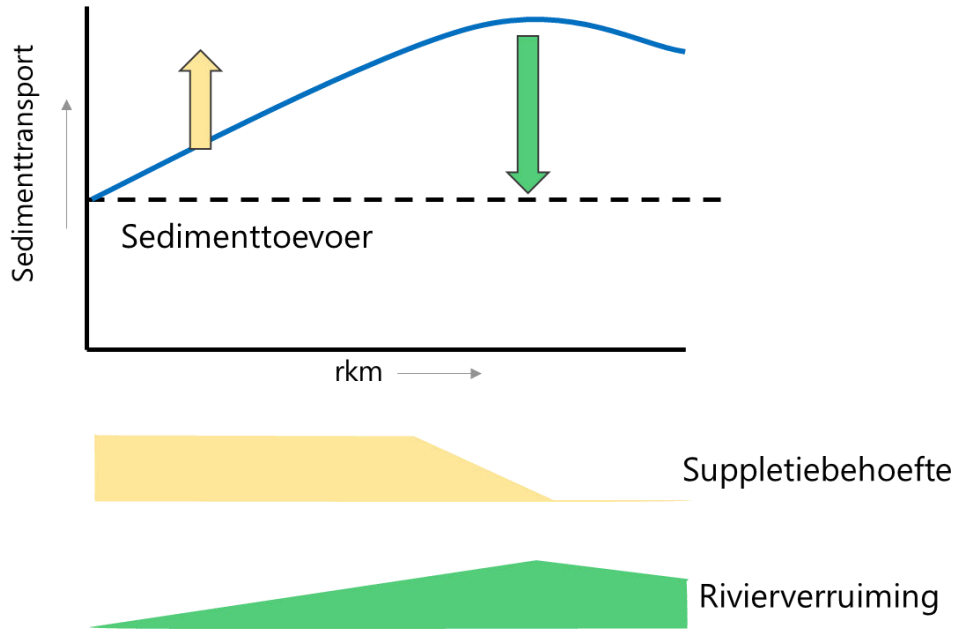
Op de IJssel wordt in MP4 de Boven-IJssel verbreed en/of het Zwarte Schaar wordt aangekoppeld. Globale kosten van aansluiting van het Zwarte Schaar geschat op basis van ca 500.000 m^3 grondwerk om de oude meander te profileren (6 km lang x 1 m diep x 80 m breed). Er is ook een stuurbaar regelwerk voorzien (of wellicht twee regelwerken), waarvan de kosten op voorhand moeilijk zijn te schatten, dus vooralsnog PM. De kosten voor de zomerbedverbreding op de IJssel zijn gebaseerd op een gemiddelde verbreding van 15 m en de eenheidskosten per strekkende kilometer (10 km).

7 Synthese

Op basis van de hiervoor beschreven berekeningen en analyses, de berekeningen die ter voorbereiding daarvan zijn uitgevoerd en expert judgement zijn belangrijke lessen geleerd die in dit hoofdstuk zijn samengevat.

7.1 Concepten en werking van maatregelen

De erosie van de zomerbedbodem is het gevolg van gradiënten in langsrichting van het jaarlijkse sedimenttransport. Doordat minder sediment wordt aangevoerd dan de rivier kan transporteren (de sedimenttransportcapaciteit) wordt het tekort aan sediment opgepakt van de rivierbodem en treedt er erosie op. Doel van een oplossing is dus om de sedimenttransportgradiënt weg te nemen door sediment toe te voegen (suppletie) ter compensatie, of de sedimenttransportcapaciteit te verlagen. In Figuur 7.1 is dit schematisch weergegeven. De vorm van de curve voor de sedimenttransportcapaciteit bepaalt daarbij de mate van suppleren of verruimen.



Figuur 7.1 Conceptueel model van suppletiebehoefte versus rivierverruiming.

7.1.1 Sediment suppleren

De berekeningen van maatregelpakket 2 hebben duidelijk laten zien dat suppleren op meerdere plaatsen moet gebeuren. In voorbereiding op de berekening met grootschalige suppleties (Hoofdstuk 5.2) zijn berekeningen uitgevoerd waarin op de Waal en IJssel of benedenstrooms of bovenstrooms werd gestart met suppleren.

In beide gevallen werd jaarlijks 150.000 m^3 (relatief grof[11]) sediment gestort op de Waal en 8.500 m^3 op de IJssel en werden de diepste delen eerst gevuld.

Starten met suppleren aan de benedenstroomse zijde van het erosietraject en dan in de loop van de jaren naar bovenstrooms uitbreiden:

- verhoogt de waterstanden bovenstrooms van het suppletietraject, maar in onvoldoende mate om (door afname transportcapaciteit) de erosie op het gehele erosietraject tegen te gaan. Verhoging van (laag)waterstanden heeft een positief effect op bevaarbaarheid.
- Door te suppleren in diepe delen (profielvullend) en niet in dunne lagen over grotere afstand (profielvolgend) komt niet al het gesuppleerde materiaal op transport. Dat vermindert de effectiviteit voor het stoppen van bodemerosie over langere trajecten.
- Beïnvloedt de (laagwater)afvoerverdeling op het splitsingspunt maar beperkt, omdat het heel lang duurt (orde tientallen jaren) voordat er een significant effect op de afvoerverdeling is te verwachten.
- Vergroot de sedimenttoevoer waar het niet nodig is (benedenstroomse van het erosietraject) waar extra sedimentatie plaatsvindt.

Als aan bovenstroomse zijde van het erosietraject wordt gestart met suppleren en in benedenstroomse richting wordt uitgebreid in de loop van de tijd:

- wordt lokale erosie gestopt, maar de verplaatsingssnelheden (op de Waal ca 1 km/jaar) zijn te klein om de erosie benedenstrooms effectief te stoppen.
- Kan de laagwaterafvoerverdeling effectief beïnvloed worden, omdat het storten aanvangt vanaf het splitsingspunt en de zomerbedbodem daarbij orde meters omhoog komt.

De doorgerekende suppletiemaatregelen zijn gericht op het compenseren van de sedimenttransportgradiënt en verder niet geoptimaliseerd. Hierdoor neemt het vaargeulonderhoud flink toe. Een toekomstige verdere detailleringsslag moet focussen op de sedimentsamenstelling (e.g. een aangepast mengsel bij de vaste lagen) en slim vaargeulonderhoud (e.g. hergebruik van suppletiemateriaal). De samenstelling van het suppletiemateriaal is daarbij een regelknop voor effectiviteit van het stoppen van de erosie en de 2D effecten (dwarshelling). In dit onderzoek is ook niet gekeken of de volumes en samenstelling van het te suppleren materiaal beschikbaar zijn.

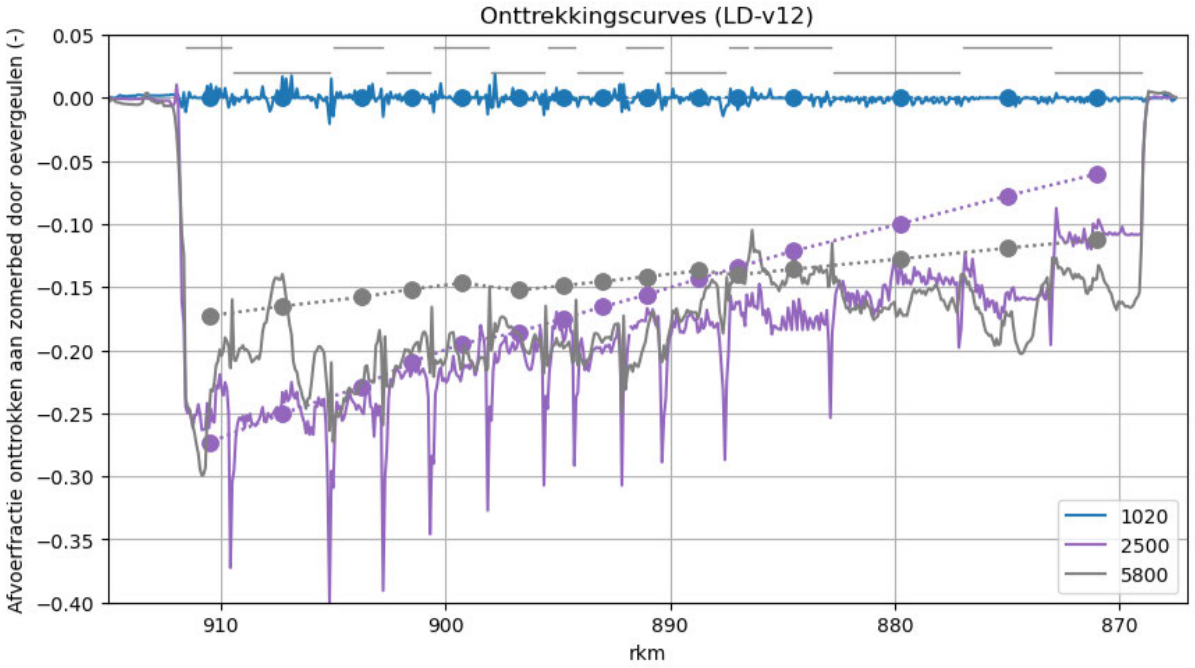
7.1.2 Meergeulenconcept

Dimensionering

Door versmalling van het zomerbed bij lage rivierafvoeren en verruiming bij hogere afvoeren zal de sedimenttransportcapaciteit bij lage afvoeren toenemen en bij midden en hogere afvoeren afnemen, zodra de oevergeulen of nevengeulen meestromen. Deze effecten zijn nagebootst met een tool dat het effect van verandering van geometrie op stromingscondities en sedimenttransportcapaciteit berekent. Met dit tool wordt een eerste beeld van de benodigde verruiming en afvoeronttrekking aan de hoofdgeul berekend, horende bij een gekozen versmalling van de hoofdgeul. Figuur 7.2 toont de resultaten van de tool en hoe de onttrekkingen eruit zien in het rekenmodel na optimalisatie van het ontwerp. De vorm van schatting en berekend zijn vergelijkbaar, maar duidelijk is dat de onttrekking in de berekeningen wat groter moet zijn dan geschat met het tool.

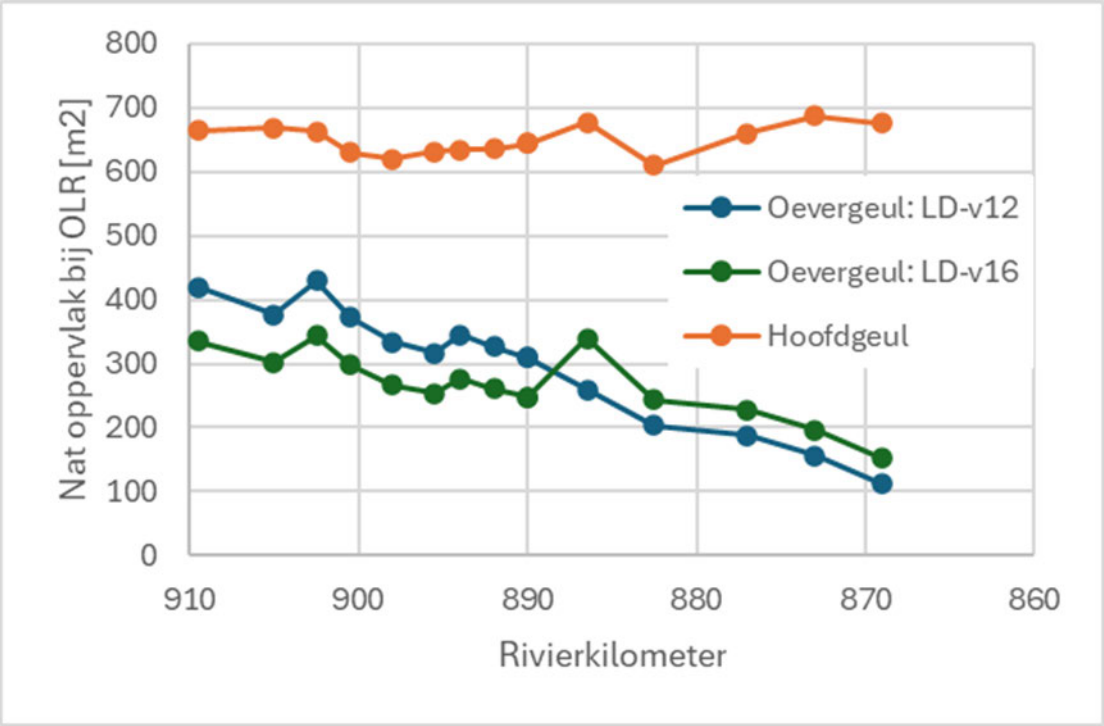
[11] In deze berekeningen is gestort met gebiedseigen materiaal zonder grove fracties die niet of nauwelijks bijdragen aan het sedimenttransport, zoals wel is gedaan voor de ruimtelijk variërende suppleties die zijn beschreven in hoofdstuk 5.

Dit wordt verklaard door de stuwkromme-effecten, waardoor verruiming benedenstrooms leidt tot vergroting van stroomsnelheid, sedimenttransportcapaciteit en dus erosie bovenstrooms. De verruiming bovenstrooms moet dan ter compensatie wat worden vergroot. Dit betekent ook dat het tool als eerste indicatie kan worden gebruikt, maar dat door niet-uniformiteit van de stroming wijzigingen in een deel van de rivier tot veranderde ontwerpen elders in de rivier zullen leiden.



Figuur 7.2 Geschatte en berekende afvoeronttrekking aan de hoofdgeul door langsdammen (40 m versmalling) en oevergeulen bij drie afvoerniveaus op de Boven-Rijn. De geschatte afvoeronttrekkingen zijn bepaald met het evenwichtstool en weergegeven met stippellijnen en bolletjes.

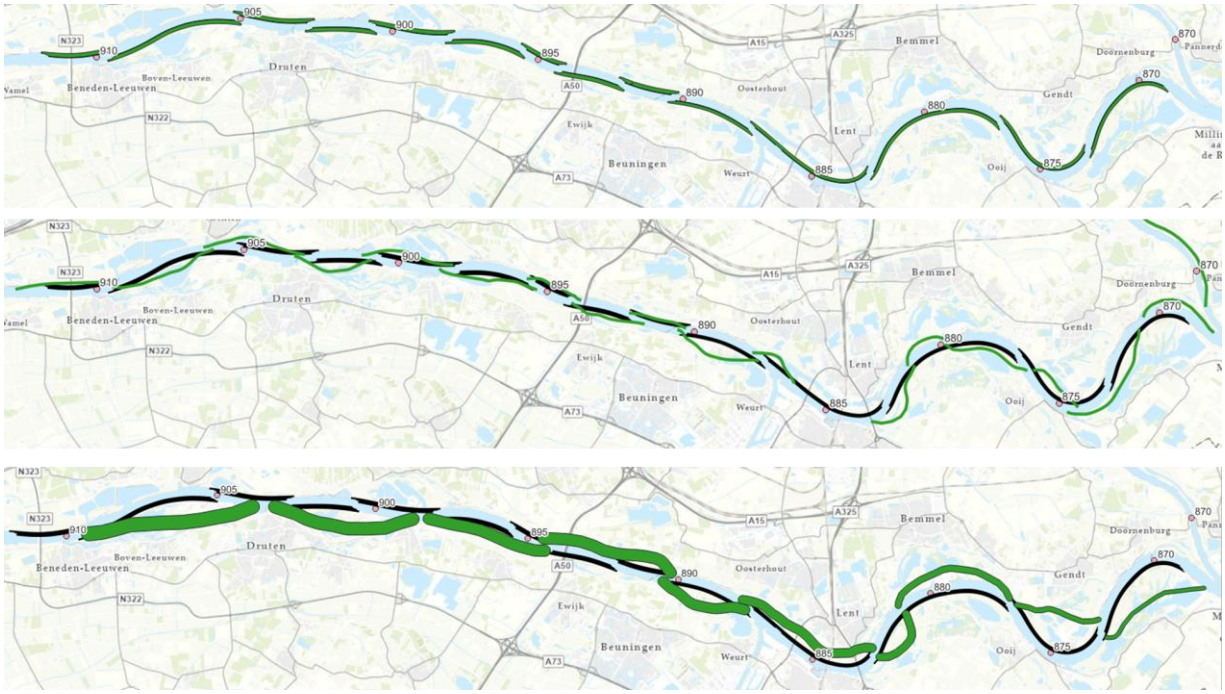
Ten aanzien van de werking van het meergeulenconcept hebben de berekeningen bevestigd dat de benodigde afvoercapaciteit door de oevergeulen groter moet worden naarmate, in de situatie zonder maatregel, de verhouding tussen de lokale sedimenttransportcapaciteit en de sedimenttoevoer van bovenstrooms groter is (zie ook Figuur 7.3). Dit betekent dat de benodigde onttrekkingen in benedenstroomse richting steeds groter moeten worden. De figuur toont dat het benodigde doorstroomoppervlak van de oevergeulen op de Waal bij OLR tot wel 60% is van het doorstroomprofiel van de hoofdgeul. De figuur laat tevens zien dat door halvering van de versmalling op de Midden-Waal (LD-v16) de oevergeulen op dat traject ca 20% minder ruim hoeven te zijn, maar op de Boven-Waal juist weer ca 20% ruimer moeten zijn. Belangrijke noot hierbij is dat een kleinere versmalling minder laagwaterstandsopzet genereert. De verruiming op de Boven-Waal moet wat groter worden om te compenseren voor de lagere laagwaterstanden op de minder versmalde Midden-Waal. Veranderingen op een deeltraject hebben dus consequenties voor het ontwerp op boven- en benedenstroomse trajecten.



Figuur 7.3 Doorstroomoppervlak van hoofdgeul en oevergeul bij twee ontwerpen van het meergeulenconcept.

Met een oevergeul kan ervoor worden gekozen om deze diep te maken, waardoor de vereiste doorstroomcapaciteit met beperkte breedte van de oevergeul kan worden bereikt. Als voor een natuurlijker variant van het meergeulenconcept wordt gekozen met eilanden om de hoofdgeul te versmallen en grote nevengeulen om voldoende afvoercapaciteit te creëren zullen deze nevengeulen verder de uiterwaard in worden gelegd en mogelijk wat langer zijn dan de oevergeulen. Bovendien zijn heel diepe nevengeulen ongewenst. De nevengeulen zullen dan (waarschijnlijk fors) breder worden dan de oevergeulen. Figuur 7.4 toont hoe een ontwerp met diepe oevergeulen eruit zal zien (bovenste paneel) en hoe een ontwerp met ondiepe, langere en brede nevengeulen voor te stellen is (onderste paneel). Als de bodem van de nevengeulen op OLR-1,5 m wordt gekozen loopt de gemiddelde breedte van dergelijk nevengeulen op tot 150-250 m, en met flauwe oevers nog breder. In de middelste figuur is een schets opgenomen van het meergeulenconcept gebaseerd op de visie ‘Ruimte voor Middenafvoeren’ van het WNF. De bovenste en onderste figuren illustreren de benodigde ruimte die langs de Waal nodig zou zijn voor het meergeulenconcept als de hoofdgeul wordt versmald met 40 m. Dit maakt inzichtelijk dat met de oorspronkelijke schetsbeelden uit WNF plan niet de opgave voor de rivierbodem kan worden gerealiseerd en dat de dimensionering van de nevengeulen waarschijnlijk grootschaliger moet zijn om het beoogde effect (tegengaan bodemerosie) te bereiken. Als de versmalling van de hoofdgeul gehalveerd wordt, reduceert de breedte van de geulen met naar verwachting 20-25%.

Versmalling van de hoofdgeul door een langsdam heeft positieve effecten bij lage afvoeren op de waterdiepte (scheepvaart) en waterstanden (afvoerverdeling, natuur). Voor het hoofddoel van dit onderzoek, stoppen van erosie, is versmalling niet per se nodig en zelfs ongunstig, omdat daardoor grotere oevergeulen of nevengeulen nodig zijn. Toepassen van het meergeulenconcept zonder versmalling lijkt daarmee een interessante onderzoekvraag, maar is vanuit het instandhouden van de vier hoofdrivierfuncties niet haalbaar.



Figuur 7.4 Indicatieve schets van de vormgeving van het meergeulenconcept met diepe oevergeulen zoals toegepast in dit onderzoek (boven), dimensionering met nevengeulen gebaseerd op de visie 'Ruimte voor Middenafvoeren' van het WWF (midden) en een ontwerp met ondiepe, langere en brede nevengeulen, vermoedelijk nodig om de bodemerosie te stoppen (onder).

Fasering

In de berekeningen voor MP3 en MP4 is uitgegaan van aanwezigheid van het meergeulenconcept op dag 1 van de berekening. In werkelijkheid is er uiteraard een fasering van de aanleg nodig. Mogelijke strategieën, overwegingen en aandachtspunten zijn:

- van beneden- naar bovenstrooms: bovenstrooms van het traject is het sedimenttransport onveranderd omdat daar nog geen langsdammen liggen. Dit leidt tot grote sedimentatie over het langsdammentraject en een erosietraject benedenstrooms daarvan (i.e. vergelijkbaar met de morfologische response van de huidige langsdammen). Daarnaast worden door de verruiming bij hogere afvoeren de waterstanden ter plaatse van en bovenstrooms van de langsdammen verlaagd, waardoor daar extra erosie plaatsvindt. Bij de langsdammen en in de oevergeulen vindt dan mogelijk extra sedimentatie plaats. De laagwaterstanden worden in bovenstroomse richting in de loop van de tijd verhoogd. Pas als de langsdammen ook op de Boven-Waal zijn aangelegd wordt de afvoerverdeling beïnvloed.
- Van boven- naar benedenstrooms: de waterstanden bij het splitsingspunt worden direct beïnvloed en daarmee de afvoerverdeling. Als de oevergeulen al worden gedimensioneerd op de uiteindelijke breedte en diepte, zullen deze initieel te ruim zijn, omdat de Midden-Waal nog niet is verruimd en de benedenstroomse waterstanden bij midden en hogere afvoeren nog niet worden verlaagd. Op de Boven-Waal is daarmee de aanzanding waarschijnlijk initieel te groot en zal benedenstrooms van de aangelegde langsdammen extra erosie ontstaan. Omdat de laagwaterafvoer naar de Waal afneemt, zal op de niet versmalde trajecten dus een kleinere waterdiepte beschikbaar zijn dan in de oude situatie (oorspronkelijke hogere OLA).

Ongeacht de fasering zal sedimentmanagement in de periode van aanleg nodig zijn om doorgaande erosie, extra erosie of overmatige sedimentatie te compenseren. Wanneer de maatregel adaptief wordt ontworpen (bijvoorbeeld ten behoeve van een onzekere hydrograaf) kan dit ook bijdragen aan het tegengaan van de neveneffecten.

Daarbij kan gedacht worden aan een flexibele instroomdrempel bij langsdammen, of een overgedimensioneerde oevergeul of nevengeul, waarvan het profiel of de ruwheid aangepast kan worden om in te spelen op onverwachte (neven)effecten van de maatregel.

7.1.3 Andere oplossingsrichtingen

De maatregelen die in dit onderzoek zijn verkend zijn gericht op het compenseren van het effect van de erosiviteit (suppleren) of op de erosiviteit uit het systeem halen als oorzaakbestrijding (meergeulenconcept). De sedimenttransportgradiënt wordt echter in grote mate bepaald door de gradiënt in korrelgrootte langs de rivier en de sedimenttoevoer van bovenstrooms. Er zijn daarom ook alternatieve oplossingsrichtingen denkbaar:

- de sedimenttransportgradiënt in een riviertraject is (gegeven een bepaald afvoerverloop en sedimentaanbod) een resultante van de riviergeometrie en bodemsamenstelling. In de Waal komt de gradiënt in transport voort uit een geleidelijke verfijning van het bodemmateriaal in benedenstrooms richting. In plaats van met rivierverruiming, kan de transportgradiënt dus ook worden beïnvloed door de Waal in benedenstroomse richting te vergroven. Dit vraagt echter om een grootschalige maatregel met veel onzekerheid in de precieze uitwerking. Als we ervan uit gaan dat de stroomsnelheden vrijwel constant zijn langs de rivier, dan zou de bodemsamenstelling vanaf de Pannerdense Kop doorgetrokken moeten worden naar Zaltbommel. Dat betreft dan de hele dikte van de actieve laag (1 à 1,5 m) vervangen door een passende samenstelling over de hele zomerbedbreedte. Het is echter zeer lastig te voorspellen hoe een dergelijke grootschalige aanpassing op de korte, maar vooral ook op de lange termijn uitwerkt, en dus of die werkt zoals bedoeld[12]. Daarnaast kan suppleren van grof materiaal afpleistering veroorzaken. Dan wordt de bodem immobiel en ontstaat er benedenstrooms grote erosie. Het is natuurlijk wel denkbaar om op specifieke erosieve locaties (zoals erosiekuilen bij vaste lagen) grof materiaal te storten om plaatselijke erosie tegen te gaan.
- Een andere denkbare mogelijkheid om de erosie tegen te gaan is het vergroten van de sedimenttoevoer naar de Waal en IJssel vanuit de bovenstroomse tak. Door bijvoorbeeld meer (en bij voorkeur) fijner sediment vanuit de Bovenrijn naar de Waal te sturen kan dit bijdragen aan het verhogen van het sedimenttransport in de Boven-Waal. Echter is nog niet duidelijk hoe dit het beste gerealiseerd kan worden (door suppleties met een bepaalde samenstelling, of geometrische aanpassingen aan de zomerbedbodem net bovenstrooms van de splitsing?) en wat de neveneffecten zijn, omdat de processen die de sedimentverdeling over het splitsingspunt bepalen nog niet voldoende goed begrepen zijn. Ook is het belangrijk om te realiseren dat het orde 100 jaar kan duren voordat de hele Waal iets heeft gehad aan deze oplossingsrichting. Het kan natuurlijk wel een deel van de oplossing zijn.

De oorzaak van de gradiënt in korrelgrootte, gradiënt in sedimenttransport en erosie is niet eenduidig vast te stellen. De processen vinden over een lange termijn plaats en zijn niet allemaal in een model te vatten. De relatie tussen oorzaak en gevolg is hierdoor niet eenduidig en de effectiviteit van maatregelen daarom moeilijk in te schatten. Voor het maken van een keuze moet meer inzicht gekregen worden in de grootte van de verschillende onzekerheden.

[12] Sloff et al. (2023) beschrijft ook een aantal risico's wanneer gesuppleerd wordt met relatief grof materiaal, op de aspecten laagdikte, (hoge) kosten en duurzaamheid.

7.2 Onzekerheden

De resultaten van het referentiemodel en de verschillende maatregelpakketten laten zien dat complexe stromingen en bijbehorende bodemveranderingen bepalend kunnen zijn voor de bodemontwikkeling. Dat geldt vooral voor het referentiemodel wanneer wordt gekeken naar absolute bodemverandering. De (relatieve) effecten van maatregelpakketten zijn in lijn met de verwachtingen en lijken hier minder door beïnvloed te worden of het effect kan worden gemitigeerd.

In deze paragraaf beschrijven we de belangrijkste aandachtspunten en onzekerheden. Ondanks dat een state-of-the-art Delft3D-model is toegepast in dit onderzoek, zijn de meeste onzekerheden gerelateerd aan dit model; een model is altijd een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Om deze onzekerheden het hoofd te kunnen bieden, is het essentieel dat maatregelen adaptief zijn, zodat veranderde omstandigheden en onverwachte effecten kunnen worden opgevangen. Voor suppleties is dit mogelijk, omdat keuzes te maken zijn in hoeveelheden, samenstelling, locaties en frequenties. Voor inrichtingsmaatregelen zijn de stuurknoppen beperkter. Voor het meergeulenconcept zijn dimensies van de drempels, hoogte van de langsdam of het eiland, en dimensies en ruwheid van de oevergeul of nevengeul zelf stuurknoppen. Daarnaast zal sedimentmanagement naar verwachting altijd onderdeel zijn van de gekozen strategie en daarmee een adaptief onderdeel zijn, ook bij grootschalige implementatie van het meergeulenconcept.

Sedimenttransport en sedimentverdeling splitsingspunten

De sedimentverdeling bij de splitsingspunten bepaalt in belangrijke mate transportgradiënt en bodemtrends in de Rijntakken. De processen hierachter zijn echter nog onvoldoende bekend om deze goed te kunnen implementeren en voorspellen met het Delft3D-model. Dit is een onzekerheid die niet alleen doorwerkt in de (initiële) dimensionering van maatregelpakketten MP3 en MP4, maar ook in de berekende langetermijneffecten op bodem, afvoer en sedimentsamenstelling. In het splitsingspuntengebied (inclusief Boven-Waal en Boven-IJssel) kan het doorbreken van pleisterlagen een grote impact hebben op het sedimenttransport en de sedimentverdeling. Op sommige locaties in de Bovenrijn ligt onder de actieve laag een pakket met relatief fijn zand. Als door erosieprocessen de grovere toplaag verdwijnt komt dit materiaal bloot te liggen, en kunnen zich diepe erosiekuilen ontwikkelen. Het vrijkomende geërodeerde sediment veroorzaakt dan een extra piek in aanvoer van fijn sediment in de tak en op de splitsing. Ook in de bovenstroomse trajecten van Pannerdensch Kanaal en Waal kunnen dergelijke erosieprocessen leiden tot aansnijden van fijnere onderlagen en veranderingen in het doorstroomprofiel. De onderzochte rivierverruimende maatregelen verlagen (in ieder geval lokaal) de bodemschuifspanning en verkleinen de risico’s, maar aanlegfasen verdienen aandacht.

Vaste lagen

Van stroming en sedimenttransport op en rond vaste lagen is nog veel onbekend. De processen die de bodemontwikkeling sturen zijn nog onvoldoende begrepen en daarmee nog lastiger te voorspellen met een rekenmodel zoals Delft3D. Het is daardoor nog niet mogelijk om het modelconcept in Delf3D te verifiëren. Een aanpassing van de zomerbedbodem ter hoogte van de vaste laag wordt daarom voorlopig nog als riskant gezien.

Morfodynamiek oevergeulen en overgangen

Met de gevonden dimensies van de oevergeulen en nevengeulen is in de geulen een vergelijkbare morfodynamiek als in de hoofdgeul te verwachten.

Op locaties van de aansluitingen is ook versterkte morfodynamiek te verwachten. De berekeningen met gestroomlijnde ontwerpen bij die aansluitpunten lieten al zien dat de morfologische reacties gevoelig zijn voor de vormgeving (Bijlage C). Dit verdient dus zeker verdere aandacht, omdat implementatie van een dergelijk meergeulenconcept ongetwijfeld tot extra beheerinspanning zal leiden.

Daarbij aanvullend de opmerking dat in de modelberekeningen de sedimentatie in de oevergeulen naar verwachting (flink) wordt overschat, omdat:

- hellingseffecten (2D effecten) mogelijk worden onderschat.
- Sortering van sediment tussen oevergeul en zomerbed met de gebruikte transportrelaties mogelijk onvoldoende wordt beschreven.
- De oevergeul in het model is beschreven met een vaste laag waarop alleen sedimentatie kan plaatsvinden. Hierdoor kan er alleen sedimenttransport optreden in de oevergeul nadat sedimentatie opgetreden is. De oevergeul gedraagt zich hierdoor als sedimentvang en het sedimenttransport in de oevergeul wordt onderschat.
- De instroomdrempel in Delft3D (noodgedwongen) met een trapjeslijn is geschematiseerd. De invloed daarvan op de sedimentinstroming is niet goed bekend.

Het baggeronderhoud in de oevergeulen of nevengeulen wordt met het model daarom naar verwachting overschat. Vergelijking van de gemeten en berekende morfodynamiek in de reeds aangelegde oevergeulen bij Tiel voor de opgetreden afvoercondities kan licht werpen op de mate van overschatting. Daarvoor worden dan nadere morfologische analyses voor de bestaande langsdammen aanbevolen met zowel Delft3D als D-Hydro.

Dynamiek

De grootte van de oevergeul bij een langsdam wordt bepaald door de mate van erosie die bij laagwater ontstaat door de versmalling van het zomerbed, en door de sedimenttransportgradiënt. Twee componenten in de uitgevoerde berekeningen beïnvloeden dit:

- wanneer het sedimenttransport bij lage afvoeren wordt overschat leidt dit tot een overschatting van erosie bij lage afvoeren die bij hoge afvoeren met een grotere oevergeul moet worden gecompenseerd.
- De toekomstige afvoeren zijn zeer onzeker. De analyse geeft een schatting van de geulgrootte voor een gemiddelde hydrograaf, gegeven het geselecteerde klimaatscenario. Bij een relatief droge periode zal de oevergeul groter moeten zijn dan bij een relatief natte periode om voldoende effect te hebben.

Om de onzekerheden in het sedimenttransport en de toekomstige hydrograaf te ondervangen is het belangrijk om de maatregelen als adaptieve maatregelen te ontwerpen, waarbij gedacht kan wordt aan aanpasbare instroomdrempels bij oevergeulen of oevergeulen waarvan de ruwheid of het doorstroomprofiel makkelijk kan worden vergroot of verkleind.

Tevens wordt aanbevolen om met Delft3D en D-Hydro te verkennen hoe gevoelig de dimensies van de oevergeulen zijn voor de verdeling van het jaarlijkse sedimenttransport over lage en hoge afvoeren.

Effectbeoordeling rivierfuncties

De effectbeoordeling op de vier hoofdrivierfuncties zoetwaterbeschikbaarheid, hoogwaterveiligheid, natuur en bevaarbaarheid is in belangrijke mate uitgevoerd op met Delft3D berekende waterstanden, stroomsnelheden en afvoerverdeling over het splitsingspunt.

Het gebruikte Delft3D-model is echter niet in detail afgeregeld op hydrodynamica en er zijn geen berekeningen uitgevoerd bij de hoogwaterreferentie. Omdat we naar relatieve effecten kijken is dit voor een kwalitatieve effectbeoordeling zoals in dit onderzoek is uitgevoerd geen probleem, maar voor een gedetailleerde effectbeoordeling wordt aanbevolen om D-Hydro te gebruiken.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Dit onderzoek laat zien dat de bodemerosie op de Rijntakken met verschillende maatregelen kan worden stopgezet: 1. suppleren (MP2); 2. meergeulenconcept met langsdammen en oevergeulen of nevengeul op de Waal (MP3/MP4); 3. verbreden zomerbed IJssel en 4. rivierverlenging op de IJssel. Elke methode kent een aantal voor- en nadelen.

Algemeen

Sedimentsuppleties met extern materiaal (MP2) zijn adaptief. Er kan ingespeeld worden op onzekerheden in de modelresultaten en toekomstige natuurlijke processen. Het meergeulenconcept (MP3 en MP4) is minder adaptief. De adaptiviteit zit bij dit concept in het regelbereik van de verdeling van afvoer tussen hoofdgeul en oevergeul en nevengeul. Het concept biedt echter wel grote meerwaarde voor meerdere rivierfuncties. In dit onderzoek is duidelijk geworden dat voor voldoende werking van het meergeulenconcept zeer ruime oevergeulen of nevengeulen nodig zijn, zeker op de Midden-Waal. De natuurlijke variant biedt vanuit alleen de opgave om de rivierbodemerosie te stoppen geen meerwaarde ten opzichte van de grijze langsdammen variant, maar maakt optimaal gebruik van de herinrichting voor natuurdoelen.

Voor de IJssel zijn – binnen MP4 - twee varianten bestudeerd: het meergeulenconcept op de Waal in combinatie met (1) zomerbedverbreding op de Boven-IJssel en (2) heraansluiting van het Zwarte Schaar, een oude afgesloten riviermeander. De zomerbedverbreding trekt extra water naar de IJssel en heeft een positief effect op de afvoerverdeling en bodemligging op de Boven-IJssel, maar versterkt de erosie in het Pannerdensch Kanaal en naar verwachting in de Midden-IJssel. Hier zijn aanvullende (verruimende) maatregelen nodig om deze impact te verkleinen. Het aansluiten van het Zwarte Schaar heeft juist een stabiliserend effect op het Pannerdensch Kanaal en de Midden-IJssel. Hiervoor is wel een regelwerk (of regelwerken) nodig die de waterstandverhoging bij lage afvoeren zoveel mogelijk beperkt. Combinatie van beide maatregelen op de IJssel is niet onderzocht.

Voor zowel MP3 als MP4 geldt dat extra sedimentmanagement in de vorm van suppleties en baggerwerkzaamheden een essentieel onderdeel is van de oplossingsrichting. De exacte invulling daarvan moet nog in een vervolgstudie worden verkend.

De overige bevindingen en aandachtspunten uit dit onderzoek zijn hier nader toegelicht per maatregelpakket, waarbij voor aanvullende punten wordt verwezen naar de tekstkaders aan het begin van paragrafen in hoofdstuk 5.

MP1: niets doen (referentiemodel)

MP1 is het maatregelpakket waarbij er geen aanvullende maatregelen worden uitgevoerd. Het laat zien dat de bodemerosie door zal gaan zonder interventie, met negatieve effecten op scheepvaart, natuur en waterverdeling tot gevolg.
Het in dit onderzoek verder verbeterde en toegepaste referentiemodel is goed in staat de bodemontwikkeling in de verschillende Rijntakken te reproduceren ondanks de gevoeligheid van het systeem voor modelkeuzes, zoals de hydrograaf.

De voorspelcapaciteit van het morfologische model wordt beperkt door de onzekerheden in de schematisatie, processen en toekomstige afvoeren. Bij het presenteren van absolute waarden moet deze onzekerheid worden aangegeven. DVR-studies hebben in het verleden echter laten zien dat het model zeer geschikt is voor een effectbepaling van maatregelen (Sloff et al, 2024). Het verbeterde model geeft met deskundige interpretatie de benodigde informatie om de effecten van maatregelpakketten op transporten en bodemveranderingen te bepalen.

MP2: suppleren

Suppleties zijn zeer adaptief wat wenselijk is gezien de onzekerheden in systeembegrip, de modelresultaten en toekomstige natuurlijke processen. Met de maatregel kan de bodemerosie worden gestopt, zoals ook in Duitsland is aangetoond door langjarige en grootschalige suppleties op bijvoorbeeld de Rijn en de Elbe. Door initieel een grote suppletie uit te voeren en die te onderhouden kan de rivierbodem naar verwachting ook goed op een niveau hoger dan het huidige worden onderhouden. Als de erosie wordt gestopt zijn de effecten op de overige functies ten opzichte van de huidige situatie neutraal. Het vaargeulonderhoud zal wel toenemen. Uiteraard is voor welke vorm van suppleties dan ook langjarig voldoende extern sediment noodzakelijk (sedimentbeschikbaarheid is in dit onderzoek niet beschouwd).

MP3: meergeulenconcept Waal met langsdammen en oevergeulen

Met het meergeulenconcept kan de bodemerosie gestopt worden door de transportgradiënt te verkleinen. Het meergeulenconcept is minder adaptief dan suppleren. Adaptiviteit kan vooral gevonden worden in hoogtes van de instroomopening. Deze maatregel biedt naast het stoppen van bodemerosie ook grote meerwaarde voor andere rivierfuncties: dat geldt voor met name de scheepvaart (grotere laagwaterdieptes), toename van laagwaterstanden wat gunstig is voor natuur/ecologie en het toewerken naar de gewenste afvoerverdeling over de riviertakken. De dimensies van de oevergeulen moeten toenemen in benedenstroomse richting en vooral op de Midden-Waal zijn ruime geulen nodig. De dimensies daar zijn veel groter dan die van de oevergeulen bij de huidige langsdammen benedenstrooms van Tiel. Het benodigde doorstroomprofiel van de oevergeulen neemt daarbij toe naarmate de versmalling groter is. Door deze grotere omvang zijn ook lokale morfologische effecten in het zomerbed te verwachten, die groter zijn dan bij de huidige langsdammen bij Tiel.

Berekeningen met een kleinere versmalling op de Midden-Waal in vergelijking met de Boven-Waal, tonen aan dat de oevergeulen op de Midden-Waal dan kleiner kunnen worden uitgevoerd om de erosiviteit te stoppen. Op de Boven-Waal moeten de oevergeulen dan juist weer ruimer zijn om de bodemerosie over de gehele Waal te stoppen. Als stoppen van de bodemerosie het belangrijkste doel is, ongeacht de neveneffecten, zijn voor MP3 dus ontwerpen denkbaar met minder ruime oever- of nevengeulen.

MP4: maximale synergie, meergeulenconcept op de Waal i.c.m. maatregelen op de IJssel

Voor MP4 zijn – in combinatie met het meergeulenconcept op de Waal – twee maatregelen op de Boven-IJssel geanalyseerd: zomerbedverbreding op de linker oever tussen km879 en De Steegse Haven (km890,6) en heraansluiting van het Zwarte Schaar net benedenstrooms van de brug bij Doesburg (km903). De effecten op de Waal zijn niet anders dan bij MP3, wat betekent dat MP4 eveneens in staat is de grootschalige bodemtrend op de Waal te stoppen. Beide maatregelen op de Boven-IJssel kunnen daar de bodemerosie te stoppen, of zelfs de bodem wat verhogen. De zomerbedverbreding trekt bovendien nóg meer water naar de IJssel dan MP3, maar heeft als neveneffect wel een toename van bodemerosie van het Pannerdensch Kanaal (t.o.v. MP1). De natuur profiteert door grote arealen uiterwaardnatuur en afgegraven oevers.

Aansluiting van het Zwarte Schaar levert wat minder aanzanding op de Boven-IJssel dan zomerbedverbreding (wat mogelijk nog te optimaliseren is door andere instellingen van het voorgestelde regelwerk), maar heeft als belangrijk pluspunt dat de bodemerosie op het Pannerdensch Kanaal gestopt kan worden.

8.2 Aanbevelingen en onderzoeksvragen

De berekeningen en analyses uit dit onderzoek geven aan dat stoppen van bodemerosie op de Waal en de IJssel mogelijk is met adaptieve (suppleties) of minder adaptieve ruimtelijke maatregelen (meergeulenconcept, rivierverruiming en -verlenging) waarbij de geometrie van de rivier wordt aangepast.

Op basis van dit onderzoek en gesprekken met experts volgt een aantal aanbevelingen die zijn uitgesplitst in (a) modelaanpak in algemene zin, specifiek voor (b) suppleties en (c) toepassing van het meergeulenconcept en (d) het uitvoeren van pilots en monitoring.

Modelaanpak

Het Delft3D model is in dit project gebruikt om maatregelen morfologisch te evalueren en in het verleden veelvuldig succesvol toegepast voor dit doel. Door onzekerheden in randvoorwaarden en modelconcepten zijn ook de resultaten onzeker. Door maatregelen adaptief te maken wordt een deel van deze onzekerheden ondervangen. Het advies is om met een gevoeligheidsanalyse inzicht te krijgen in de benodigde adaptiviteit voor zowel fysische als modelonzekerheden. Daarbij is het advies om ook gebruik te overwegen van D-Hydro met morfologische module, omdat met de D-Hydro modelschematisatie maatregelen gedetailleerder kunnen worden geschematiseerd en de hydrodynamische effecten nauwkeuriger worden bepaald (zie ook Bijlage B). Belangrijke processen die in dergelijke gevoeligheidsanalyses moeten worden beschouwd zijn onder andere:

- de toekomstige hydrograaf: de maatregelen moeten zowel functioneren gedurende droge als natte perioden.
- Hoge afvoeren (>8400 m^3/s bij Lobith) kunnen in potentie tot een andere ontwikkeling van het splitsingspuntengebied leiden (Chowdhury et al., 2023).
- Mobiliteit van het sediment bij lage versus hoge afvoeren.
- Vaste lagen en morfologische modellering daarvan, aangezien deze locaties de morfologische respons van hele trajecten beïnvloeden.
- Detaillering van de rekenmodellen, om grote nevengeulen in de uiterwaarden goed te kunnen schematiseren, inclusief de morfodynamiek bij aansluitpunten en in de geul zelf.

Sedimentsuppleties

Hiervoor gelden de volgende aanbevelingen, aandachtspunten en onderzoeksvragen:

- de beschikbaarheid (hoeveelheden en moment van vrijkomen) van voldoende geschikt suppletiemateriaal is een aandachtspunt.
- Onderzoek naar samenstelling en volumes en interacties daartussen. Een belangrijk aandachtspunt hierbij zijn de binnenbochten van de vaste lagen die in werkelijkheid momenteel sneller lijken te zakken dan de omliggende alluviale bodem.
- Onderzoek naar effectieve stortstrategieën, waarbij kan worden geleerd van operationele strategieën op de Rijn, de Elbe en de Donau met betrekking tot aanbrengen (dunne lagen effectiever) en timing.
- Een relatie leggen met vaargeulonderhoud waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van het beschikbare sediment.

Meergeulenconcept

Het meergeulenconcept grijpt grootschalig in op de rivier(geometrie) en meerdere processen die de afvoer- en sedimentverdeling tussen hoofdgeul en oever- of nevengeul bepalen zijn zeer lastig te kwantificeren met het state-of-the-art Delft3D-model (zie paragraaf 7.2). De maatregelen zijn zo omvangrijk, dat sterke morfodynamiek in aansluitgebieden en in de oevergeulen of nevengeulen wordt verwacht, wat tot grote beheerinspanning kan leiden.
Om deze onzekerheden te verkleinen geven we hier een aantal belangrijke aandachtspunten en onderzoeksvragen, die mogelijk mee te nemen zijn in de nog lopende monitoringscampagne van de bestaande langsdammen bij Tiel:

- hoe kunnen langsdammen en instroomconstructies zo ontworpen (en later geïmplementeerd) worden dat sedimentbulten en grote dynamiek zoveel mogelijk wordt beperkt?
- Wat is de gevoeligheid voor de langsdam- en oevergeulgeometrie in relatie tot de (model)onzekerheden?
- Wat is het benodigde regelbereik en op welke manier is dit maakbaar? Dit geldt voor het kunnen sturen van de verdeling van water en sediment tussen hoofdgeul en oever/nevengeul, maar ook voor het beheersen of stimuleren van bodem- en oeverdynamiek in de geulen.
- Sedimentatie in oevergeulen/nevengeulen:
    - welke processen spelen hierbij een rol?
    - Hoe kunnen deze processen op de juiste manier worden meegenomen in het model?
    - Wat zijn stuurknoppen voor de sedimentinstroom, is deze te beïnvloeden en hoe is sedimentatie in deze geulen effectief te onderhouden (baggertechnieken)?
    - Hoe verschilt de uitwisseling van water (en sediment) tussen de situatie met een oevergeul en langsdam en de situatie met een nevengeul achter een begroeid eiland?
- Implementatie van het meergeulenconcept nabij de vaste lagen.
- Benodigde uitbreiding van toepassing van het meergeulenconcept benedenstrooms van de huidige langsdammen bij Tiel.
- Zijn er mogelijkheden om de langsdammen en oevergeulen natuurlijker vorm te geven, om natuurwinst te halen, terwijl de geul dicht bij de hoofdgeul blijft en dus effectiever de bodemerosie bestrijdt?

Maatregelen Boven-IJssel

Het morfologische (2D-)gedrag van suppleties in de bochtige Boven-IJssel met een kleine breedte/diepte-verhouding is onzeker. Modelberekeningen lijken aan te geven dat een suppletie met fijn materiaal leiden tot ondiepere binnenbochten. Door grover materiaal te suppleren is dit effect (in de berekeningen voor MP2) gemitigeerd, maar dan moet wel rekening worden gehouden met de gradiënt in de korrelgrootteverdeling langs de tak. Te grof materiaal suppleren leidt namelijk tot (ongewenste) erosie van de binnenbocht. In dit onderzoek is als vuistregel voor voldoende mobiel materiaal het sediment dat in de buitenbocht ligt toegepast als suppletiemateriaal. Dit aspect vergt nader onderzoek en mogelijk een pilot.
De voorgestelde maatregelen uit MP4 op de Boven-IJssel zijn kansrijk, maar dienen verder gedetailleerd te worden. Voor de zomerbedverbreding kan onderzocht worden hoe de verbreding zo vormgegeven kan worden dat deze bijdraagt aan het vergroten van de bochtstralen wat het aantal ondieptes beperkt. Voor de maatregel aansluiten van het Zwarte Schaar moet vooral gekeken worden dat het regelwerk de wens van meer water naar de IJssel bij lage afvoer niet teniet doet en naar effecten op de scheepvaart (vaarafstanden).

Pilots en monitoring

Gezien de onzekerheden in de modellen, het functioneren van maatregelen, de toekomstige hydrodynamische condities en de morfologische processen van de rivier is het van belang om van tevoren zoveel mogelijk met pilots te experimenteren. Daarnaast is gedurende en na aanleg van mogelijke maatregelen intensieve monitoring nodig om te kunnen bijsturen en op te schalen.

9 Referenties

Becker, A (2023)
Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn. Hoofdrapport. Deltares rapport 11208437-000-ZWS-0008. Mei 2023.

Chowdhury et al. (2023)
Semicentennial response of a bifurcation region in an engineered river to peak flows and human interventions. Water Resources Research, 59(4).

Czapiga, M. J., Blom, A., & Viparelli, E. (2022).
Sediment Nourishments to Mitigate Channel Bed Incision in Engineered Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, 148(6), Article 04022009.

Deltares (2021)
Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal. Hoofdrapport. Rapportnummer 11204644-014-ZWS-0010. December, 2021.

Deltares (2023)
Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. In opdracht van Rijkswaterstaat. Rapportnummer 11209265-002-ZWS-0003.

Ecorys (2023)
Integraal Riviermanagement - Kengetallen kosten-batenanalyse. Rapport SWA/NZ 1001785rap, Rotterdam, 22 juni 2023

Frings, R., K. Banhold, I. Evers (2015)
Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas. RWTH Aachen University. Bericht 2015.019

Gensen, M. en Van Denderen, P. (2022)
Loopsnelheid bodemverstoringen: Op basis van vaargeulpeilingen Bovenrijn/Waal. HKV-rapport PR4597.10. Maart 2022.

Gensen, M. et al. (2025)
Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater: Maakbaarheid afvoerverdeling Rijntakken laagwater. HKV-rapport PR5289.10

HKV (2015)
Globaal ontwerp langsdammen - Rijnsplitsingspuntengebied en overige Rijntakken, HKV-rapport PR2758.20.

Kind J, Barneveld H, Gensen M (2020)
Memo Eenheidskosten IRM. Bijlage B van Kentallen kosten-batenanalyse Integraal Riviermanagement.

Kosters, A., Becker, A., Ottevanger, W., Chavarrias, V., Nunes, A.L. (2024)
Morphological model of the river Rhine: Partially calibrated (v0.5) model of the Waal branch. Deltares rapport: 11210364-003-ZWS-0007. Nov. 2024

Paarlberg, A.J., Omer, A.Y.A. en Yossef, M.F.M. (2021)
Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal. Delft3D simulations. HKV-rapport PR4153.10; Deltares rapport 11204644. September, 2021.

Rijkswaterstaat Oost-Nederland (2022)
Trajectindeling ten behoeve van monitoring van bodemtrends voor de Rijntakken. Memo 3 maart 2022.

Sloff, K. (2019)
Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares rapport 11203738-005-BGS-008. Dec. 2019.

Sloff, K. (2022)
Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken. Deltares Rapport 11208033-012-ZWS-0001, Dec. 2022.
Sloff, K., Paarlberg, A., Van Denderen, P., Barneveld, H, & Mosselman, E. (2023)
Onderbouwing beleidskeuze bodemligging IRM. Rapport Deltares en HKV. 20 april 2023.
Sloff, CJ, Becker A, Paarlberg, AJ, van Denderen, P (2024)
2D morfologisch model IRM. Deltares-rapport 1209264-00; HKV-rapport PR4987.10. Maart 2024.
Sloff, CJ, Becker A, (2024)
Memo afvoerreeksen KNMI-scenario's. Deltares-memo, 7 okt 2024.
Ylla Arbós, C., A. Blom, S. van Vuren, R.M.J. Schielen (2019)
Bed level change in the upper Rhine Delta since 1926 and rough extrapolation to 2050. Delft University, Nov 2019
Ylla Arbós, C., Blom, A., Sloff, C. J., & Schielen, R. M. J. (2023)
Centennial channel response to climate change in an engineered river. Geophysical Research Letters 50(8).
Ylla Arbós, C., A. Blom, R.M.J. Schielen, S. van Vuren, Y. Snoek (2024)
How can floodplain lowering and sediment nourishments help mitigate channel bed incision? Delft University, Jan 2024.

Bijlagen

A Modelschematisatie

A.1 Baselineschematisatie

Zie volgende pagina’s. Het document is opgesteld in het kader van het Grensregioproject.



1

Inhoud

- Opbouw referentiemodel
  - Baseline-referentie
  - Overwogen gebiedsaanpassingen
  - Overwegingen welke wel/niet meegenomen
  - Detail per maatregel
  - Wrap-up
- Schematisatie in model
  - Doorgevoerde veranderingen
  - Resultaat in Baseline en D3D-schematisatie (voor niet-verfijnde rooster)
  - Deze presentatie geen simulatieresultaten

2

Bouw Referentiemodel

Baselinereferentie

- DVR-IRM = j18_5-v2 =
  - baseline-rijn-j18_5-v1 + rt_zbhgt16_a1 + wl_nijmeg_a1
- Voorkeur voor j-model ipv beno
  - J-model gebruikt voor IRM-update en past beste bij veldsituatie
  - In Duitsland concept 'beno'-model niet bekend
  - RWS-ON eens met keuze j18 als basis
  - Daar (morfologisch) relevante maatregelen in splitsingspuntengebied in meenemen

3

Bouw Referentiemodel

Overwogen aanpassingen aan referentiemodel

- In overleg met RWS-ON zijn de volgende maatregelen overwogen om mee te nemen
  - 1. Kribben in Duitsland
  - 2. Zomerbedbodem NL (2020)
  - 3. OH Spijk
  - 4. KOP
  - 5. Meinerswijk
  - 6. Aanpassingen vaste laag Nijmegen (2021 aangepast)
  - 7. Vaste lagen Duits grondgebied
  - 8. Peilingen zomerbed Duitse Rijn tot Pan.Kop (2021)
  - 9. Nieuwe haven van de Kijfwaard
  - 10. Rivierklimaatpark IJsselpoort
  - 11. Sedimentsuppleties Boven-Waal en stortvakken
  - 12. Dijkverlegging Oraniendeich Emmerich

Voor 1-6 zijn Baseline (5 of 6) maatregelen beschikbaar

4

Bouw Referentiemodel
Overwogen aanpassingen aan referentiemodel

- Keuzes pragmatisch
- Ingestoken vanuit morfologische toepassing in het grensgebied
- Van een deel zijn Baseline(6) maatregelen beschikbaar, in dat geval omgezet naar Baseline5
  - Geen uitvoerige controle op 'aansluiting' e.d.
  - NB; bij Baseline5-maatregelen specifiek voor dit project, goed nadenken over naamgeving; moet geen eigen leven gaan leiden
- Baseline-versie
  - Baselineversie 5.3.3.1808 niet voor ArcGIS 10.6.1, daarom Baselineversie 5.3.4
  - Bodem in waterstandspunten tbv Delft3D!
- Roosters: br2, pan, wl2a, wl2b, wl2c, yac12, yac3, nr1a (br0 geen dekking in Baseline5)

5

Baseline-maatregelen
1. Actualisatie geometrie Duitse kribben



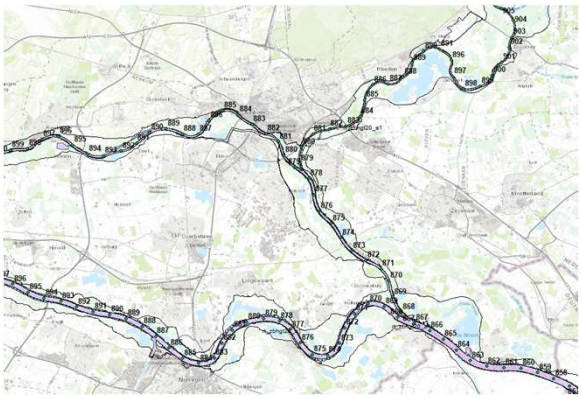
- rh_kribemm_a1, Baseline 6
- Kribben én kribvakbodems
- Voor D3D-4 is vooral kribhoogte relevant/belangrijk
- Kribstranden minder relevant en bovendien dynamisch, maar wel overgenomen uit Baselinemaatregel
- Let op: hier ligt een oevergeul (zie lufo)

6

Baseline-maatregelen

2. Actualisatie bodem in NL deel

- rt_zbhgt20_a1
- Baseline 5
- Deze is 1-op-1 in te mixen



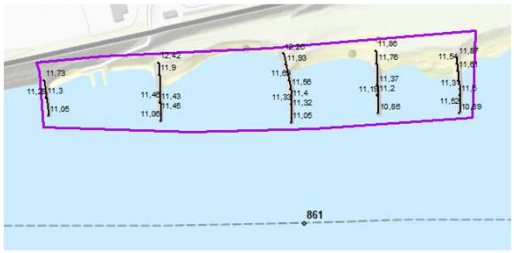
- N.b.
  - Er is overlap met Duitse (2021) peilingen, zie punt 8
  - Aanpassing vaste laag Nijmegen via 2022 NL-peilingen, zie punt 6

grensregio



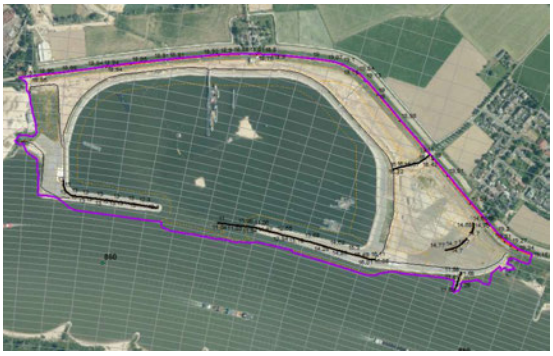
Baseline-maatregelen

3. Overnachtingshaven Spijk (1/2)

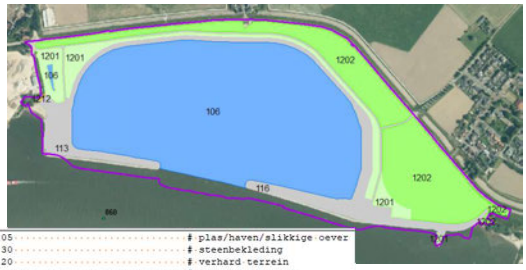


- br_ohspijk_a3, Baseline 6
- Benedenstrooms: 5 kribben, alleen overlaten aangepast, dus eenvoudig over te nemen

Baseline-maatregelen
3. Overnachtingshaven Spijk (2/2)



- OH Spijk
  - Maatregel bestaat uit veel elementen (hoogtelijnen/punten en ruwheid)
  - Geheel omgezet naar Baseline5
  - Check op relevante onderdelen: bodem haven, meestroomfrequentie en havendammen
  - Havendammen in bodem is belangrijk
- Voorstel
  - Ruwheid controleren: legger vs handboek
  - BL6 zo goed mogelijk omzetten naar BL5
  - RWS heeft variant beschikbaar gesteld waar maatregel in zit, als check gebruiken



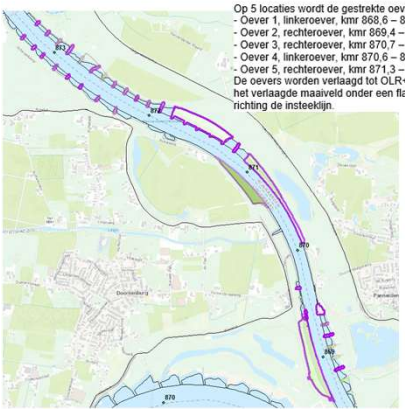

```
r_code = 106  a = 0.05                                  # plas/haven/slikkige oever
r_code = 113  a = 0.30                                  # steenbekleding
r_code = 116  a = 0.20                                  # verhard terrein
r_code = 1201 a = 0.06 b = 45.    c = 1.8 d = 0.1  # productiegrasland
r_code = 1202 a = 0.10 b = 12.    c = 1.8 d = 0.1  # natuurlijk gras/hooiland
r_code = 1212 a = 0.56 b = 0.23   c = 1.8 d = 0.1  # droge ruigte
```

HKV 9

9

Baseline-maatregelen
4. Krib/oeververlaging PK

- KOP = project Krib- en Oeververlaging Panner-densch Kanaal
- BASELINE 5 maatregel van het MIRT3 ontwerp (pk_kopmrt3_a2).
- Deze is 1-op-1 mee te nemen
- Aansluiting op referentie controleren (vooral bij oeververlagingen)



Metadata voor maatregel: pk_kopmrt3_a2

Beschrijving van de dataset

Wijzigingsbestanden van het Definitief Ontwerp van het project krib- en oeververlaging Panner-densch kanaal (KOP).

Samenvatting

Deze maatregel beschrijft het Definitief Ontwerp van het project krib- en oeververlaging Panner-densch Kanaal (KOP). Het DO bestaat uit een vijftal oeververlagingen en het verlagen van 35 kribben. Het DO is opgesteld tijdens de MIRT3 fase en is voortgekomen uit meerdere optimalisatie-slagen volgend op het Voorkeursalternatief uit de SNIP2A fase.

Op 5 locaties wordt de gestrekte oever verlaagd. De kenmerken per oever zijn als volgt:
- Oever 1, linkeroever, kmr 868,6 – 869,3;
- Oever 2, rechteroever, kmr 869,4 – 869,5, totale lengte 90 m;
- Oever 3, rechteroever, kmr 870,7 – 871,1, totale lengte 436 m;
- Oever 4, linkeroever, kmr 870,6 – 871,2, totale lengte 542 m;
- Oever 5, rechteroever, kmr 871,3 – 871,8, totale lengte 545 m.

De oevers worden verlaagd tot OLR+1,7 m op de verdedigde oeverlijn. Vanaf deze oeverlijn loopt het verlaagde maaiveld onder een flauw talud (flauwer of gelijk aan een helling van 1:10) op richting de insteeklijn.

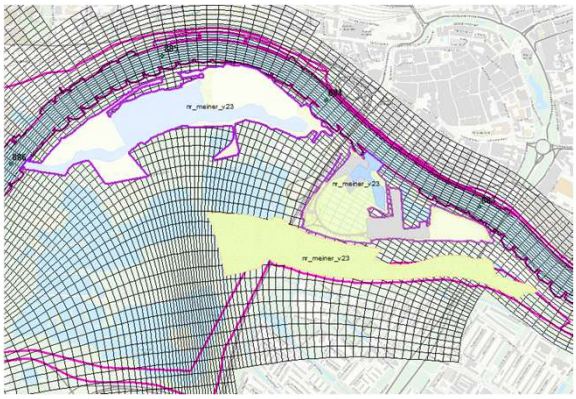
HKV 10

10

Baseline-maatregelen

5. Meinerswijk

- Vergunning (nr_meiner_v23)
- Baseline 5
- Past binnen enclosure: meenemen
- Ruwheid: legger naar handboek



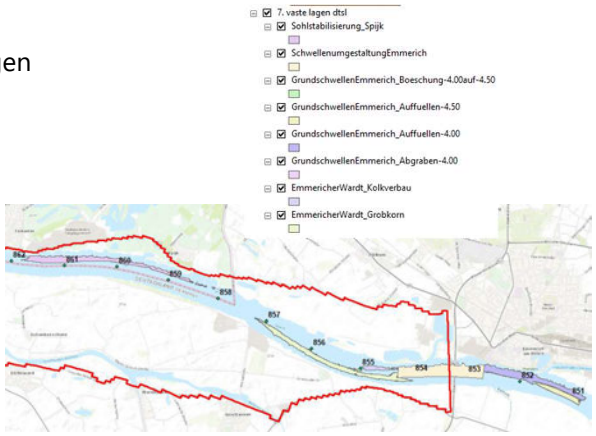
Baseline-maatregelen

6. Zomerbedmaatregel Rijntakken 2022, verlaging VL 2021

- BL6 zomerbedmaatregel Rijntakken 2022 om verlaging vaste laag Nijmegen (2021) mee te kunnen nemen
- Werkwijze:
  - Basis is 2020 bodem in NL-deel
  - rt_zbhgt22_a1 → bevat aangepaste hoogte vaste laag
  - Binnen contour 'ruwheidv' van vaste laag bodem overgenomen
  - N.B. In D3D Ruwheid cf IRM-model, dus ruwer (C40 ipv C50); Voor Spijk een zelfde strategie hanteren

Overige aanpassingen
7. Contour vaste laag Spijk en andere vaste lagen (dtsl) (1/2)

- Contour vaste laag Spijk en van andere vaste lagen (Kolkverbau + Grundschwellen Emmerich) in Duitsland:
  - Data van WSV
  - 01_Data_Workgroup\001-Geometrie Gewasserbett
  - \Grundschwellen-FixedLayers\Grundschwellen-FixedLayers.zip
- Let op: aantal polygonen overlappen
- Rode contour: grens Baselinedatabase (j18)
  - Alleen Spijk dus meegenomen in Baseline: ruwheidcode 134 (131-133 = nijmegen/st.andries/erlecom)



13

Overige aanpassingen
7. Contour vaste laag Spijk en andere vaste lagen (dtsl) (2/2)

- Werkwijze:
  - Polygonen op basis van info WSV
  - Deze ook in Baseline met aparte code zodat we flexibiliteit hebben om ruwheid te specificeren
  - Spijk
  - zelfde ruwheid als andere vaste lagen IRM-model, dus vaste laag iets ruwer dan zomerbed
  - Niet erodeerbaar in model (sedimentlaagdikte=0)
  - Voor overige vaste lagen (dus anders dan Nijmegen/Spijk) in dtsl alluviale ruwheid om schokken te voorkomen
  - Hoogte uit peilingen (tenzij aanleghoogte bekend, want in de meting mogelijk sediment er op dus mogelijk te hoog)
  - Vaste lagen reageren mogelijk te heftig ook naar benedenstrooms, daarom:
  - Grof materiaal, alleen grove fractie initieel
  - Nice to have: korrelgrootte checken in de word-documenten? (In 7zip. kaart + materiaal)

14

Overige aanpassingen
8. Multibeam-survey Duitse Rijn

- 01_Data_Workgroup\001-Geometrie Gewasserbett\Peilung 2021\
- Projectie (EPSG 25832)
- Aanname: geeft voldoende nauwkeurig hoogte vaste lagen in dtsl
- Br0 begint bij km825
- Metingen tot PanKop, dus overlap met Wat met overlappende deel in NL?
  - Verschilanalyse (gridcell-averaging)

3901_813.0_816.0_20210311_S_813.0_1_79398.asc
3901_816.0_819.0_20210628_S_816.0_1_80536.asc
3901_819.0_821.0_20210629_S_818.9_1_80489.asc
3901_821.0_823.0_20210630_S_821.0_1_80492.asc
3901_823.0_825.0_20210701_S_822.9_1_80626.asc
3901_825.0_827.0_20210715_S_825.0_1_81422.asc
3901_827.0_830.0_20210726_S_827.0_1_81420.asc
3901_830.0_835.0_20210728_S_830.0_1_81990.asc
3901_835.0_838.0_20210803_S_835.0_1_81969.asc
3901_838.0_843.0_20210804_S_838.0_1_82038.asc
3901_843.0_845.0_20210805_S_842.9_1_81937.asc
3901_845.0_847.0_20210809_S_844.9_1_81922.asc
3901_847.0_853.0_20210810_S_847.0_1_82543.asc
3901_853.0_854.5_20210811_S_853.0_1_81619.asc
3901_854.5_856.5_20210729_S_854.4_1_81970.asc
3901_856.5_859.0_20210816_S_856.5_1_81389.asc
3901_859.0_861.0_20210817_S_859.0_1_81309.asc
3901_861.0_863.0_20210818_S_861.0_1_81307.asc
3901_863.0_866.0_20210819_S_863.0_1_81288.asc
3901_866.0_868.0_20210823_S_865.9_1_81383.asc

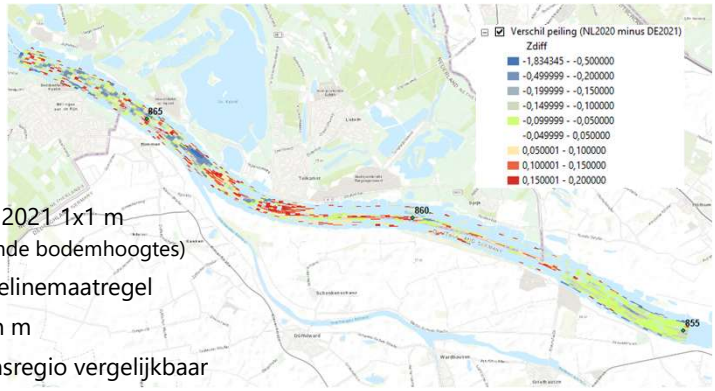
Bundeswasserstrasse (Nr.): Rhein, Hauptstrecke (3901) | Teilgebiet: ABZ Wesel | Stationskilometer 813.0 bis 816.0 | Datentyp: regelmäßige Quadratgitter-Stützpunkte (GRID) ohne Einbeziehung von Kanteninformationen | Messdatum (Beginn) 2021-03-11 | Projektname: 210311 8130 8160 | Auftragsname: Mehrzweckpeilung | Aufnahmeart Fächerlot | Koordinatensystem: EPSG: 25832, Streifen/Zone: 32, Lagestatus: 489, UTM-Koordinaten im System ETRS89, Nordrhein-Westfalen | Höhenstatus: Deutsches Haupthöhennetz (DHHN) 2016 | Höhenbezug: NHN | Zuständigkeit beim WSA Rhein

File Edit Options Encoding H
303485.0 5747521.0 5.59
303486.0 5747521.0 5.55
303486.0 5747522.0 5.47
303487.0 5747520.0 5.59
303487.0 5747521.0 5.53
303487.0 5747522.0 5.45
303487.0 5747523.0 5.36
303487.0 5747524.0 5.28

HKV 15

15

Overige aanpassingen
8. Multibeam-survey Duitse Rijn



- Vergelijking bodems in br2-rooster
  - Grid cell averaging
  - DE2021: zonal statistics obv DE-peilingen 2021 1x1 m
  - Alleen 'count>100' (anders langs randen vreemde bodemhoogtes)
  - NL2020: zonal statistics obv 2020 5x5 Baselinemaatregel
  - Verschil (Zdiff) is NL2020 minus DE2021 in m
  - Uitgangspunt: NAP en DHHN2016 in grensregio vergelijkbaar (wat door figuur bevestigd wordt)
- Gebruik DE2021 tot aan PanKop was gebaseerd op:
  - Weinig afwijking op de PanKop
  - Geen sprong br0->br2
  - Recentere peilingen
  - 1x1 ipv 5x5

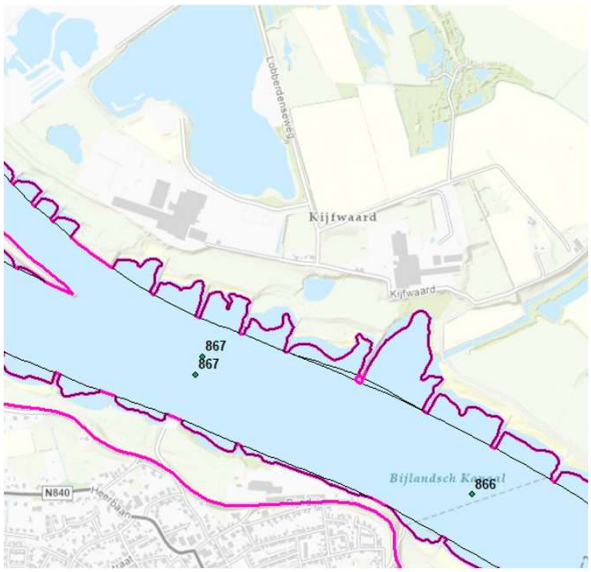
HKV 16

16

Overige aanpassingen

9. Nieuwe haven van de Kijfwaard

- Geen informatie beschikbaar, & kleinschalig
  - nemen we niet mee in modelschematisatie



17

Overige aanpassingen

10. Klimaatpark IJsselpoort

- Plannen staan nog niet vast
- Uiterwaardmaatregelen gaan pas meestromen bij relatief hoge afvoeren (KRW-geul Westervoort ca 6800 m3/s, Terrein de Groot ca 7000 m3/s, KWdam 80 cm verlaagd ca 7400 m3/s)
- Koppenwaardse dam en Marsweg: aanpassingen nog onzeker irt effecten RBK (Q10000)
- Zomerbedmaatregelen zijn kleinschalig/lokaal (VKA bevat geen Baselinemaatregelen NVO's)
- In Hondsbroeksche Pleij staat vanaf ca 5000 m3/s Lobith 1 schuif open. Uitstroming naar IJssel via duiker (niet in D-Hydro-model) en vanaf 6100 m3/s over Veerdam
- Maatregel niet direct in interessegebied voor grensgebiedproject
- Nog veel onzekerheiden, voorkeur: maatregel niet meenemen in grensregioproject

Alle genoemde afvoeren zijn Lobithafvoeren

18

Overige aanpassingen

11. Sedimentsuppleties Boven-Waal/ stortvakken/ dad

- Polygonen en volumes
- Voor aanmaken modelschematisatie (nog) niet relevant,
  maar voor het overzicht de beschikbare informatie hier wel opgenomen

19

Overige aanpassingen

11. Sedimentsuppleties Boven-Waal/ stortvakken/ dad

- Simulaties met baggeren/storten
  - Polygonen NL: De NR-Lek en IJssel niet verbeterd met niet-bagger-/niet-stort-polygonen, omdat die daar niet gedefinieerd zijn → beste startpunt is 'slim suppleren bovenwaal'
  - Polygonen Duitsland hierin ook beschikbaar (eerder afgestemd door Anke)
- Benodigde aanpassingen dtsl:
  - niet storten in het vak waar gebaggerd is
  - dieptecriterium voor baggeren is GIW-2,80m (GIW moeten we nog krijgen van WSV)
  - storten op plekken waar de diepte meer dan GIW-4,00m bedraagt, dat is de maximale storthorizon.
- Aanpassingen NL én D
  - de overdiepte bij het baggeren aanpassen naar een nog te bepalen waarde (wrs 30 cm bovenop 280, ipv eerdere 50cm)

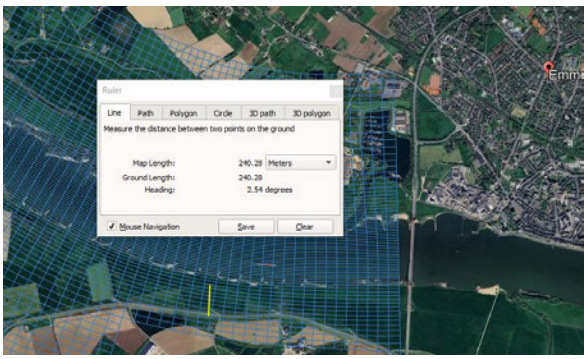
20

Overige aanpassingen
12. Dijkverlegging Oraniendeich bij Emmerich (1/3)

Tijdens dijkverlegging

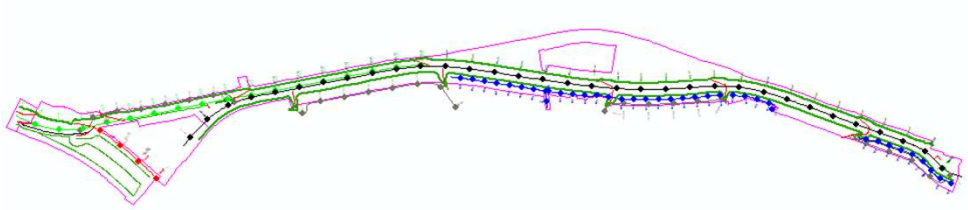


Dijk ca 240 naar binnendijks verplaatst, past in br2-rooster



Overige aanpassingen
12. Dijkverlegging Oraniendeich bij Emmerich (2/3)

- Ligging nieuwe dijk: in dwg ontbreekt projectie, dus lastig te gebruiken



- Past in rooster, relatief eenvoudig mee te nemen
- Checken verwachte meestroomfrequentie obv bestaande berekeningen, dit bepaalt gewenste nauwkeurigheid schematisatie bodemligging (hoogte)

Overige aanpassingen
12. Dijkverlegging Oraniendeich bij Emmerich (3/3)



- Hoogtes:
  - (Blatt 2) Lageplan 0+600 bis 1+300 mit Höhen.pdf
  - (Blatt 3) Lageplan 1+300 bis 2+000 mit Höhen.pdf

Hinweis:
Die dargestellte Topografie basiert auf der Bestandsvermessung MvO von 2022.
Die eingetragenen Ver- und Entsorgungsleitungen basieren auf der Bestandsvermessung oder wurden den Ausführungsunterlagen des Deichverbandes entnommen.

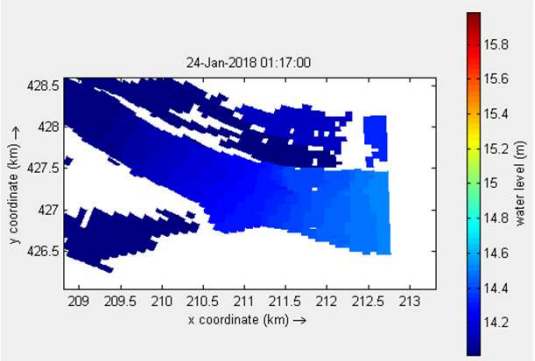
- Hoogtes erg moeilijk af te lezen en oude/nieuwe situatie lijkt 'gemixed'

HKV 23

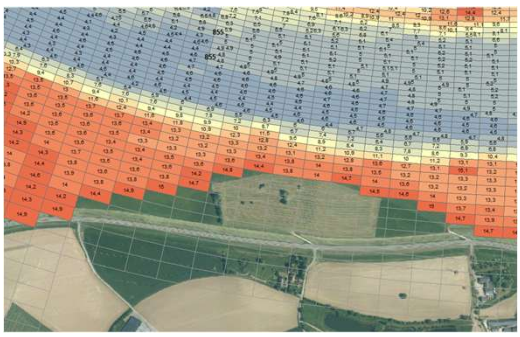
23

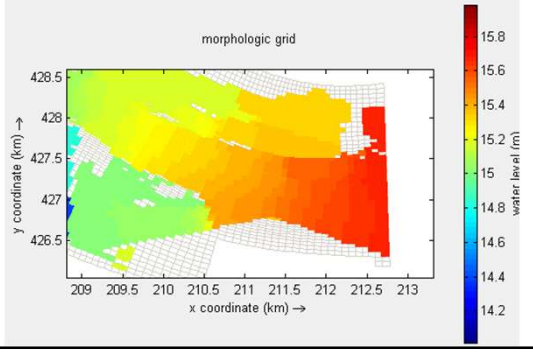
Baselinevariant referentie
Dijkverlegging Emmerich

discharge (m3/s)
1020
1294
1543
1954
2601
3384
4353
5506
7009



- Waterstand 2 hoogste afvoeren PR4987
- Stroomt bij 2 hoogste afvoeren mee

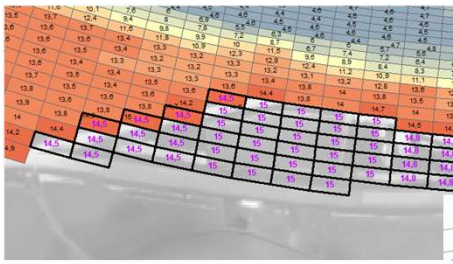




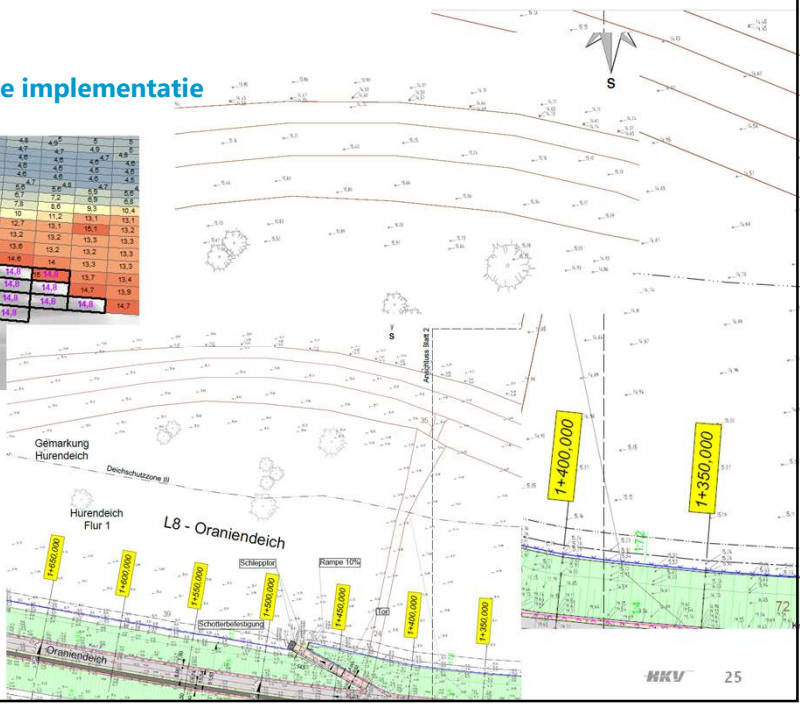
24

24

Baselinevariant referentie
Dijkverlegging Emmerich; tijdelijke implementatie





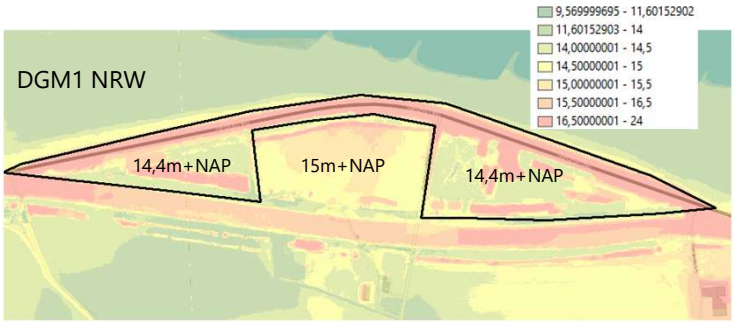


HKV 25

25

Baselinevariant referentie
Dijkverlegging Emmerich

- Nieuwe implementatie in Baseline (tbv verfijnd rooster) DGM Duitsland NRW = 2020 = bouwfase
- Luchtfoto:
  - Dijk afgegraven
  - Dijk tussen terrein: voormalige hoogte behouden
- Ruwheid: code 1202 conform omliggend terrein
- 1 heg en aantal bomen toegevoegd



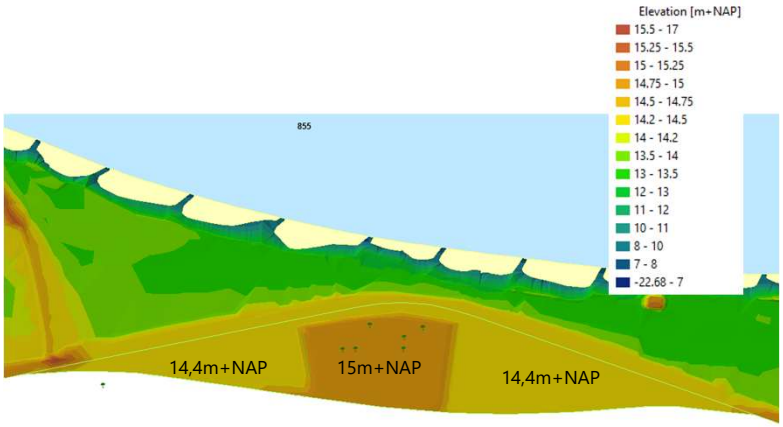


HKV 26

26

Baselinevariant referentie
Dijkverlegging Emmerich

- Resultaat in Baseline





HKV 27

27

Bouw Referentiemodel
Wrap-up (1/2)

- 1. Duitse kribben: BL6->BL5 omzetten, oevergeul aandachtspunt
- 2.+6. Zomerbedbodem NL. 2 rt20 via Baseline. Aanpassing VL Nijmegen handmatig (want = BL6, aanleghoogte)
- 3. OH Spijk, omzetten naar BL5-maatregel
- 4. + 5. KOP en Meinerswijk meenemen via Baseline; ruwheid checken bij grootschalige maatregelen

HKV 28

28

Bouw Referentiemodel

Wrap-up (2/2)

- 7. Vaste lagen Duitsland via polygonen en peilingen Duitsland (2021)
  - Spijk en Nijmegen als niet-erodeerbaar via sedimentdikte, ruwheid vaste laag C40
  - Overige vaste lagen met grofste fractie, ruwheid gelijk aan zomerbedruwheid, hoogte uit peilingen
  - Ruwheidspolygoon Spijk in Baseline
- 8. Duitse peilingen: tot aan PanKop (buiten Baseline om)
- 9. Kijfwaard niet meenemen
- 10. RKP niet meenemen
- 11. Suppleties Boven-Waal: is info, (later) relevant voor morfologische simulaties
- 12. Dijkverlegging Emmerich: via Baselinemaatregel

Baselinevariant referentie

Overzicht maatregelen Baseline

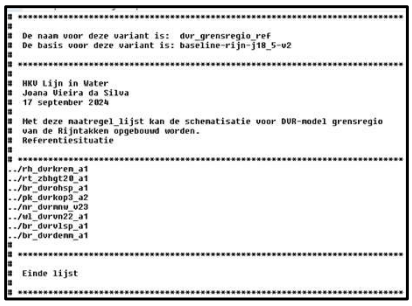
- Basis: J18_5-v2
  - p:\PR\4987.10\Archief\01_Baseline_inmixen\baseline\Rijn_5\j18_5-v2\
- In te mixen maatregelen
  - 1. Duitse kribben: P6_P5\br_dvrkrem_a1
  - 2. Zomerbedhoogte NL-deel: P5\rt_zbhgt20_a1
  - 3. OH-Spijk: P6_P5\br_dvrohsp_a1
  - 4. KOP: P5\pk_kopmrt3_a2
  - 5. Meinerswijk: P5\nr_meiner_v23
  - 6. Aanpassing hoogte vaste laag Nijmegen: P6\rt_zbhgt22_a1.zip → P5\dvr_bh22vln_a1
  - 7. Contour vaste laag Spijk, ruwcode=134 (sluit aan bij ruwkarak d3d)
  - 12. Dijkverlegging Emmerich

Baselinevariant referentie
Overzicht maatregelen Baseline

- Overige maatregelen
  - 8. Bodemhoogte Duitse Rijn: via python
  - 9. Haven Kijfwaard: niet
  - 10. RKP: niet
  - 11. bagger/storten: niet via Baseline

31

Bijpraatmoment 20/8
REFMODEL



- Nieuwe variant gemaakt vanuit j18_5-v2
- dvr_grensregio_ref

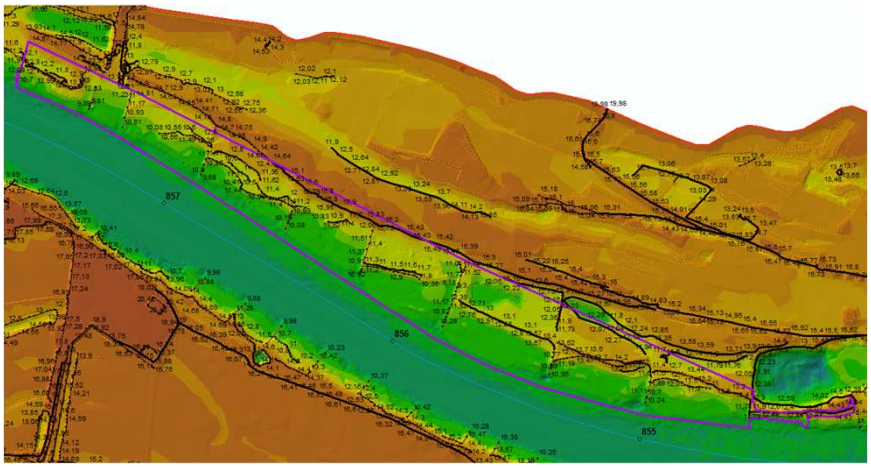
- NB:
  - Zomerbedhoogte br0 en br2 via python tussen vaste m-coordinaten (bij OH-spijk zorgen dat nieuwe havendam niet wordt overschreven, alleen min. 100 punten in cel)
  - Niet alle uiterwaarden/maatregelen afgedekt door rooster (Ellecomse polder); maar stromen nog niet mee, dus voor dit project geen problem
  - Voor IRM-bodemligging wordt zelfde model gebruikt

32

Baselinevariant referentie

Check Baseline; 1. Duitse kribben: P6_P5\br_dvrkrem_a1

- Kribben en hoogteaanpassingen meegenomen

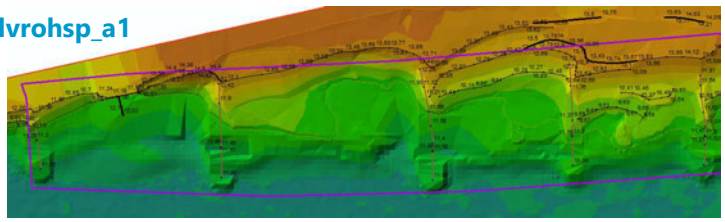


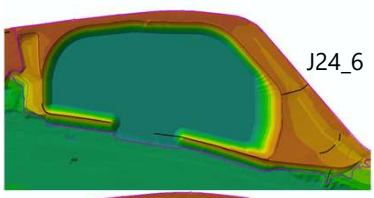
33

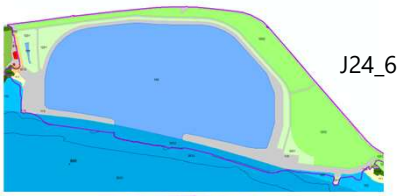
Baselinevariant referentie

Check Baseline; 3. OH-Spijk: P6_P5\br_dvrohsp_a1

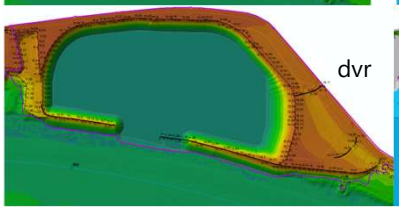
- Kribben thv km861 aangepast → OK
- OH-Spijk:
  - Bodem ziet er goed uit
  - Achtergebleven hwatvrij/gebouw → verwijderd
  - Klopt ruwheid uiteinde geleidedam? → ja, is scherm













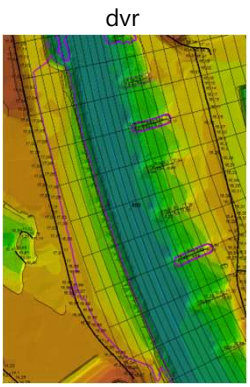
34

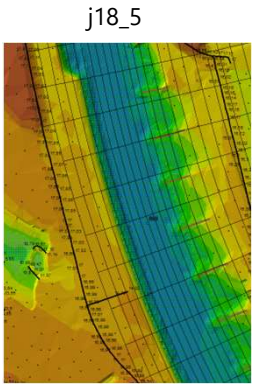
Baselinevariant referentie

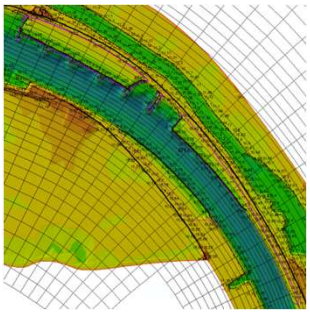
Check Baseline; 4. KOP: P5\pk_kopmrt3_a2

- naam aangepast naar dvr_kopmrt3_a2
- Ecotopen_ruwheid in handboekklassen
- Oeveraanpassingen doorgevoerd
  - Bij km869 geen optimale aansluiting op zombedhoogte (gefixed met een erase zbhgts rond de hv)
- Rooster bovenstrooms eigenlijk niet breed genoeg? (ook niet in j18)









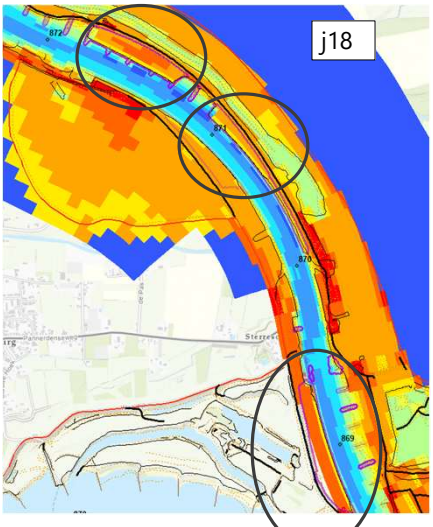
HKV 35

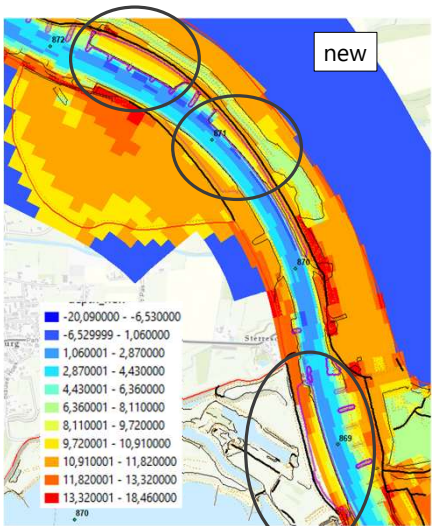
35

Baselinevariant referentie

Check Baseline. 4. Check bodem/overlaten KOP

- Bodem D3D, geprikte in waterstandspunten
- Grove rooster, pan
- Oeververlagingen goed doorgekomen (cirkels)





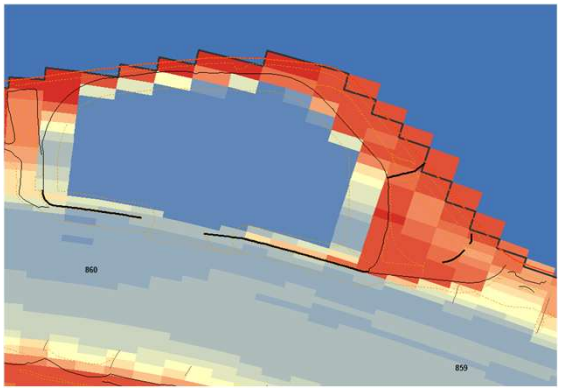
HKV 36

36

Baselinevariant referentie

Check Baseline. 5. Check bodem/overlaten Spijk

- Bodem D3D, geprikte in waterstandspunten
- Grove (originele) rooster, br2
- Havendam (per ongeluk) overschreven met DE-peilingen 2021; fixen
- Dit is opgelost (python)



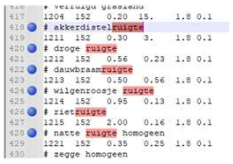
37

Baselinevariant referentie

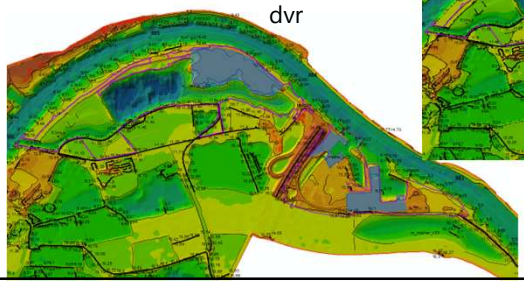
Check Baseline; 5. Meinerswijk: P5\nr_meiner_v23

- naam aangepast naar dvr_meiner_v23
- Ecotopen_ruwheid in leggerklassen → overnemen uit j24_6
- Riet/ruigte: 1215
- Bodem
  - Hwatvrij vanuit vergunning → bodem is al hoog, weglaten conform j-conventie







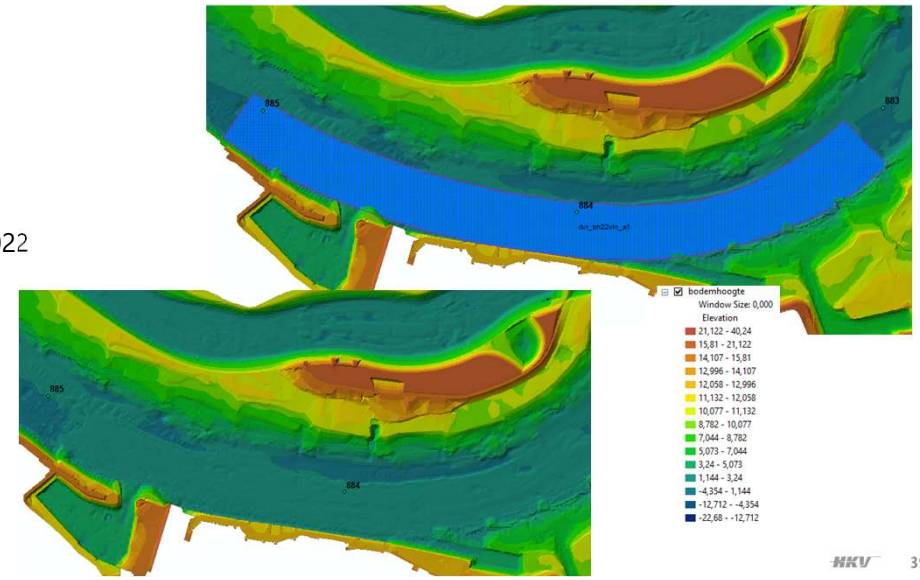


38

Baselinevariant referentie

Check Baseline. 6. Aanpassing VL Nijmegen 2021

- Obv BL6 maatr 2022



HKV 39

39

Bouw referentiemodel in Delft3D

Gemodelleerd gebied

- Interessegebied grensregioproject
  - Benedenranden hiernaast weergegeven
  - IJssel: tot yac12, dus geen yac3 (tot ~rkm920)
  - Waal wl2a+b, dus geen wl2c (tot ~rkm924)
  - Geen aanpassing stuwbeheer beschouwen
- Br0 vanaf ca 825



NB: er is later (september) besloten om yac3 en wl2c ook mee te nemen voor grensregiomodel; modeldomeinen IRM en grensregioproject zijn daarmee gelijk

HKV 40

40

Bouw referentiemodel in Delft3D
Basisbestanden

- Basis:
  - p:\PR\4987.10\Archief\05_morfologie\02_sims_morph_hydrograaf_oud_vs_nieuw\21_C50_ijslat_lent_qben_ldb_new_hydrograph\Q_base.zip\Q_base\source\
- Br0 uit pr4987 (want Baseline niet dekkend, zomerbedhoogte obv duitse peilingen)
- *.src overgenomen uit PR4987
  - Dep: 999 -> -999
- Ook weirs (Panoverlaat/ Lent) aanpassen: pan/wl2a/wl2c/yac3 (volgende slide)

Handmatige aanpassingen
weirs

- pan: PanOvl en HBP

```
2491:U    76    11    76    11    1.00  -17.28    1.00
2492:V    58    24    63    24    1.00  -13.36    1.00
2493:V    62   136    70   136    1.00  -99.99    1.00
```

- Wl2a: Lent

```
3626:U    32   184    32   184    1.00  -10.50    1.00
3627:U    32   185    32   185    1.00  -10.50    1.00
3628:U    32   186    32   186    1.00  -10.50    1.00
```

- Wl2c: vaste laag st andries in zomerbed verwijderd

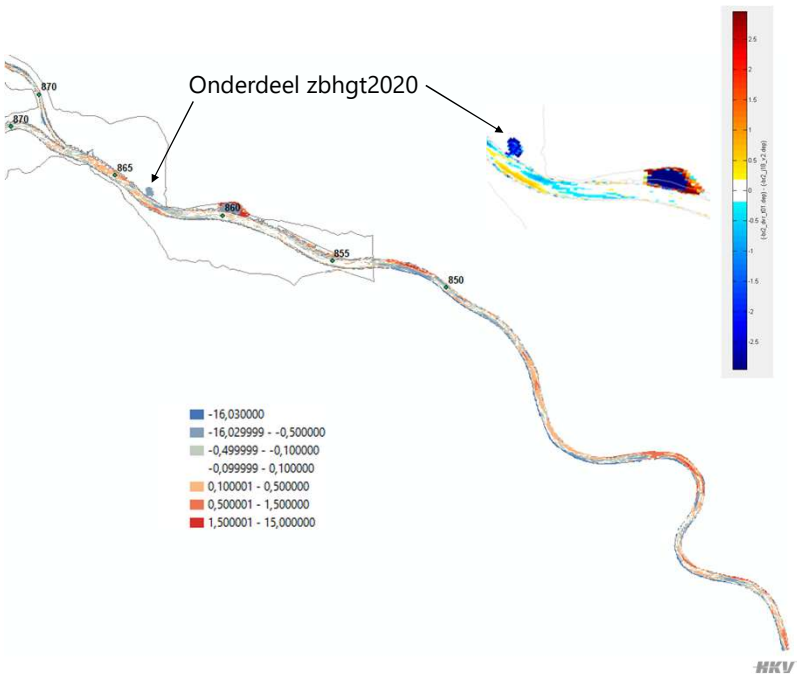
```
2009:V    22   332    22   332    1.00    0.12    1.00
2010:V    23    51    23    51    1.00    3.45    1.00
2011:V    24    51    24    51    1.00    3.50    1.00
2012:V    25    51    25    51    1.00    3.53    1.00
2013:V    26    51    26    51    1.00    3.52    1.00
2014:V    27    51    27    51    1.00    3.25    1.00
2015:U    32   116    32   116    1.00   -2.21    1.00
```

- Yac3 (brughoofd?)

```
8862:U    51  1090    51  1090    1.00   -0.94    1.00
8863:U    51  1091    51  1091    1.00   -1.26    1.00
8864:U    51  1343    51  1343    1.00   -1.56    1.00
8865:U    52  1342    52  1342    1.00   -1.82    1.00
8866:V    52  1342    52  1342    1.00   -1.34    1.00
8867:U    56   190    56   190    1.00   -2.00    1.00
```

Nieuwe bodemligging
REFMODEL

New minus j18

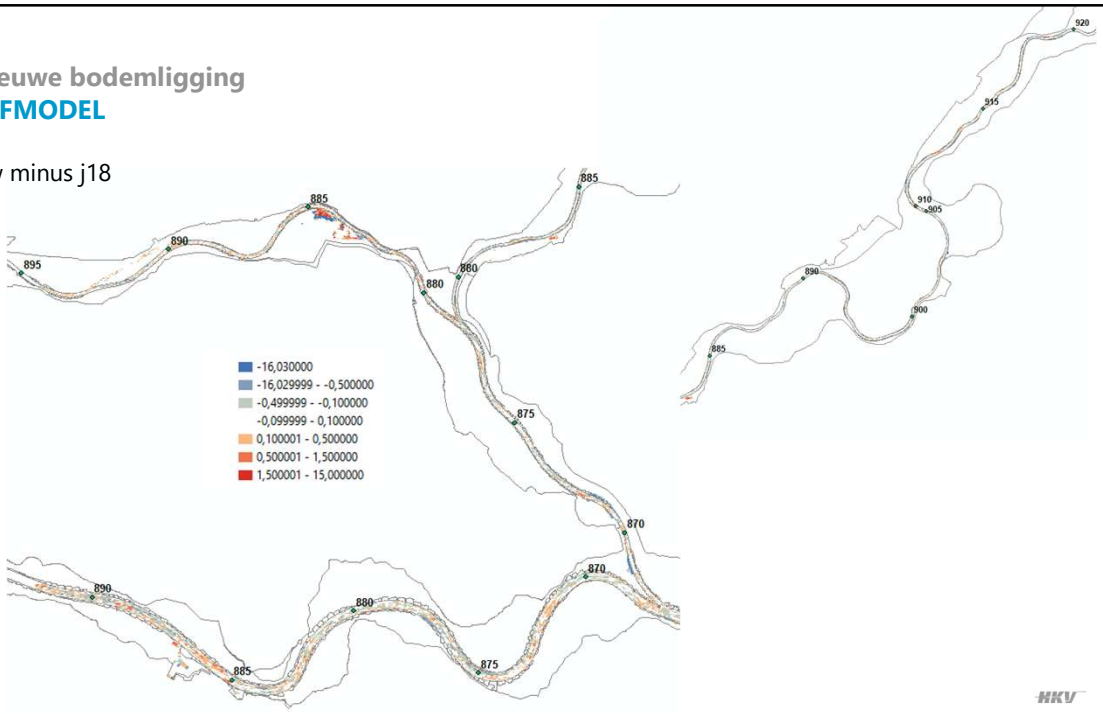


HKV 43

43

Nieuwe bodemligging
REFMODEL

New minus j18

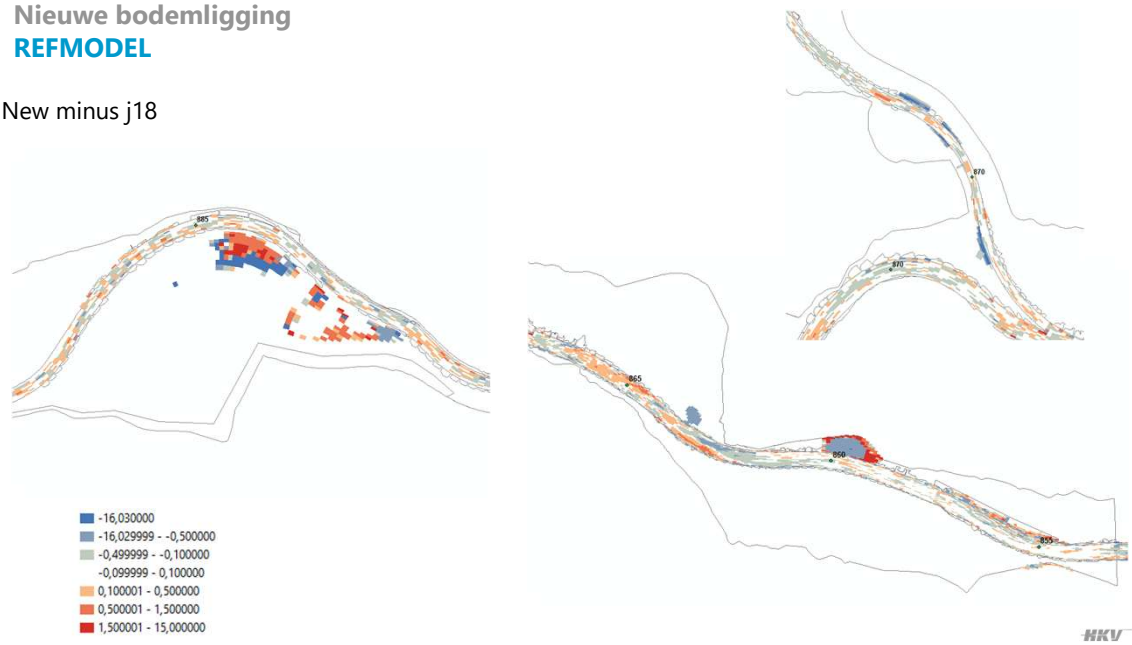


HKV 44

44

Nieuwe bodemligging
REFMODEL

New minus j18

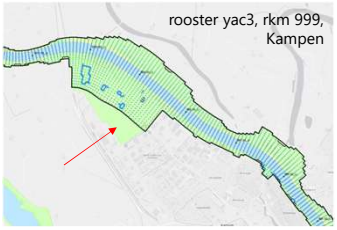


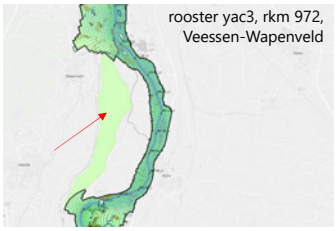
HKV 45

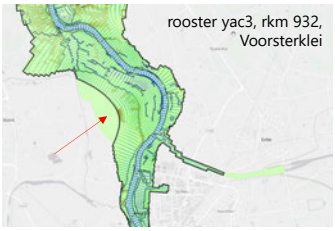
45

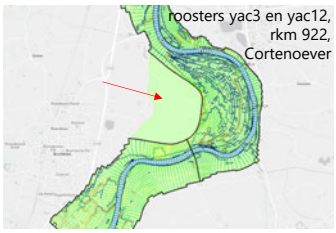
Baselinevariant referentie
Aandachspunten

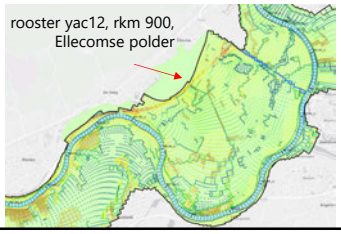
- yac12/3
  - Rooster dekt niet overal secties
  - Voor dit (morfologisch) model niet relevant







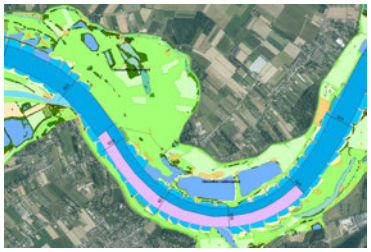




HKV 46

46

Baselinevariant referentie
Aandachtspunten



- Heeseltse middenplaat en uiterwaard
- Herinrichting (nevengeul) Heesselt niet in j18_5-v2
  - (rooster wl2c)

actueel lucthfoto



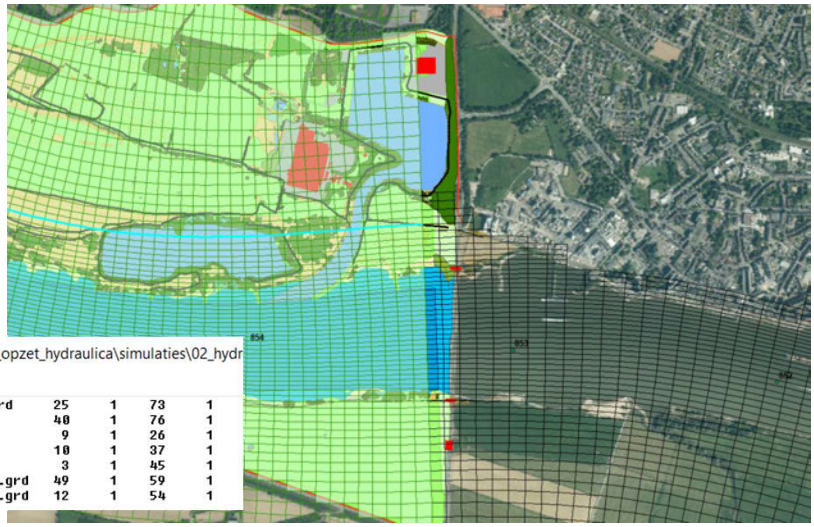
lucthfoto 2018



47

Baselinevariant referentie
Aandachtspunten – overgang br0->br2

- Klopt; komt door ontwerp roosters



Lister - [d:\HKV\pr5254_dvr_grensregio\Werkmap\02_opzet_hydraulica\simulaties\02_hydr

File Edit Options Encoding Help

br0.grd	15	383	63	383	br2_N32.grd	25	1	73	1
br2_N32.grd	53	290	89	290	pan.grd	40	1	76	1
br2_N32.grd	36	290	53	290	wl2a.grd	9	1	26	1
wl2a.grd	7	297	34	297	wl2b.grd	10	1	37	1
pan.grd	2	138	44	138	nr1a.grd	3	1	45	1
pan.grd	44	138	54	138	yac1a_N32.grd	49	1	59	1
yac1a_N32.grd	36	453	78	453	yac2a_N32.grd	12	1	54	1

HKV 48

48

A.2 Validatie hydrodynamica

Zie volgende pagina’s. Het document is opgesteld in het kader van het Grensregioproject.



1

Inhoud
Gebruikt model

- Zie eerdere pptx voor opbouw modelschematisatie
  - Voor testsimulaties rooster nog niet aangepast
  - Let op! Bodemhoogte bij dijkverlegging Emmerich nog niet 100% definitief (heeft mogelijk effect bij hoge Q)
- Focus validatie op
  - Waterstand van bovenrand br0-model tot aan PanKop (vergelijking met data WSV)
  - Afvoerverdeling splitsingspunt Pannerdensche Kop

HKV

2

Simulaties Referentiemodel

- Interessegebied grensregioproject
  - IJssel: tot yac12, dus geen yac3 (tot ~rkm920)
  - Waal wl2a+b, dus geen wl2c (tot ~rkm924)
  - Geen aanpassing stuwbeheer beschouwen
- Executables
  - Spinup hydrodynamica
  - Bug-fix bagger/stortmodule
- Calibrate the hydrodynamics roughly (check on discharge distribution, OLR/GLW, median water level)
  - Data van WSV

Indicatieve locaties benedenranden:

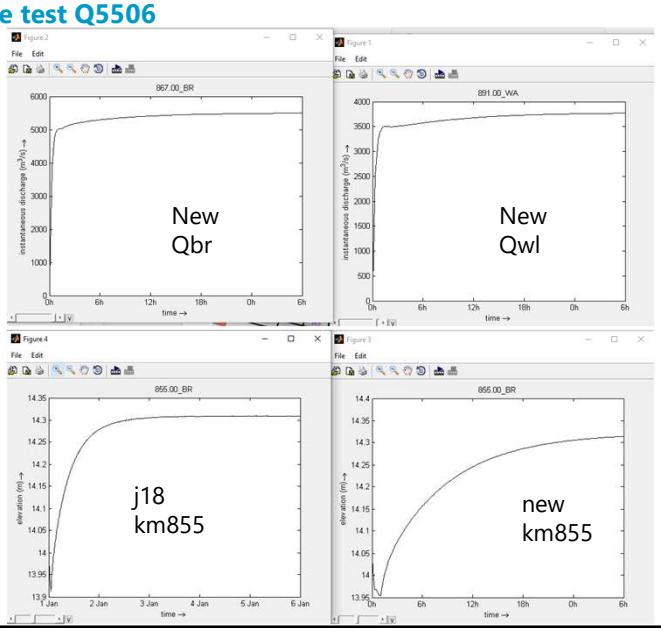


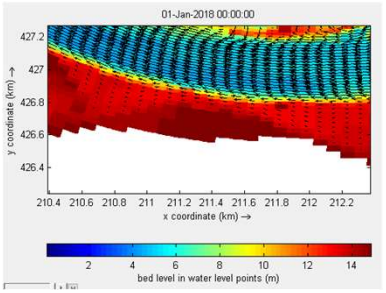
Let op: eind September 2024 besloten om wl2c en yac3 ook aan te sluiten, zie verderop

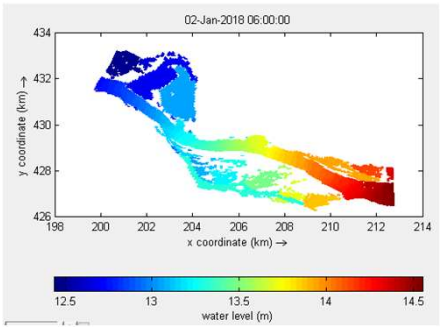
HKV

3

Baselinevariant referentie
Initiele test Q5506







HKV

4

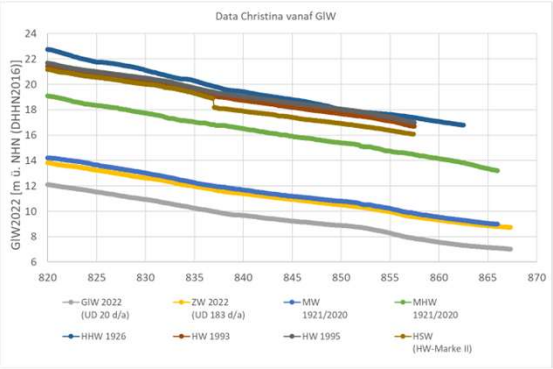
Inhoud
Data WSV

- Data WSV
  - Schattingen afvoer obv Betrekkingslijnen 2022.
  - Twee 'Mittelwassers' (ZW 2022 UD 183 d/a en MW 1921/2020) liggen dicht bij elkaar.
  - Hochwasser: MHW 1921/2020
  - Zie rechts
- Christina/WSV hebben meer info geleverd, zie volgende slide

- Ik heb wat schattingen gedaan obv Betrekkingslijnen 2022.
- Twee 'Mittelwassers' (ZW 2022 UD 183 d/a en MW 1921/2020) liggen dicht bij elkaar.
  - Waterstand data WSV km865
    - ZW 2022 : 8.87 m+NHN
    - MW 1921/2020: 9.05 m+NHN
  - Betrekkingslijnen 2022
    - Bij h=8,89 m+NAP op km865 hoort volgens BL2022 Qlob=2058 m3/s
    - Bij h=9,08 m+NAP op km865 hoort volgens BL2022 Qlob=2239 m3/s
- Hochwasser
  - Waterstand data WSV km865
    - HW 1921/2020 km865 = 13,35 m+NHN
  - Betrekkingslijnen 2022
    - Bij h=13,34 m+NAP op km865 hoort volgens BL2022 Qlob=6341 m3/s
- Volgens mij geeft dit al wel voldoende informatie om een globale modelvalidatie te doen. We dekken laagwater (Q1020), middenafvoeren (~Q2200) en hoge afvoeren (~6350) mooi af.

5

Inhoud
Data WSV



- [GlW2022] Rees 1031, Emmerich 1039
- [ZW2022] Rees 1998, Emmerich 1991
- [MHW1921/2020] Rees 6253, Emmerich 6323 (+70) (laatste: Christina via Email)

GlW

Vorläufige GlQ/GlW-Werte 2022 (20 Tage Unterschreitungsdauer)

Stand: 13.10.2021 aufgestellt: FSG Pegel	Rhein-km	GLQ 2002 Nach ZKR [m³/s]	GLQ 2012 nach AG (Jun2013) [m³/s]	GlQ 2022 20 Tage Unterschr. [m³/s]	GlQ 2022 - GlQ 2012 [m³/s]	GlW 2012 [cm]	GlW 2022 20 Tage Unterschr. [cm]	GlW 2022 - GlW 2012 [cm]
(IFFEZHEIM)			*ca. (500)*	*ca. (590)*	*-10*	*(118)*	*(119)*	*1*
MAXAU	362,320	585	609	599	-10	369	372	3
SPEYER	400,610	610	632	620	-12	241	237	-4
MANNHEIM	424,733					*160*	*155*	*-5*
WORMS	443,370	670	682	669	-13	72	68	-4
MAINZ	498,270	780	766	757	-9	168	171	3
GESTRICH	518,080					*87*	*92*	*5*
(BINGEN)	528,360					*(97)*	*(97)*	*0*
KAUB	546,230	750	784	773	-11	78	77	-1
KOBLENZ	591,490					*78*	*77*	*-1*
ANDERNACH	613,780	870	887	878	-9	93	91	-2
(OBERWINTER)	638,190					*(73)*	*(69)*	*-4*
Bonn	654,800	890	901	891	-10	141	142	1
Köln	688,000		941	931	-10	139	139	0
Düsseldorf	744,200		963	951	-12	97	91	-6
Ruhrort	780,800		1028	1011	-17	233	227	-6
Wesel	814,000		1041	1022	-19	177	174	-3
Rees	*837,400*		*1049*	*1031*	*-18*	*(120)*	*(118)*	*-2*
Emmerich	851,900		1058	1039	-19	84	74	-10

= ZQ/ZW

ZW

Vorläufige GlQ/GlW-Werte 2022 (183 Tage Unterschreitungsdauer)

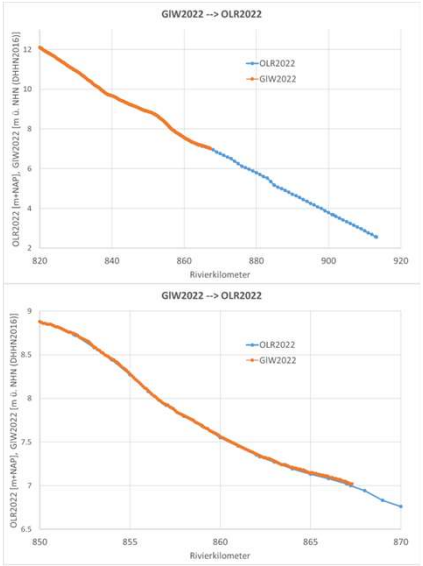
Stand: 13.10.2021 aufgestellt: FSG Pegel	Rhein-km	GLQ 2002 Nach ZKR [m³/s]	GLQ 2012 nach AG (Jun2013) [m³/s]	GlQ 2022 183 Tage Unterschr. [m³/s]	GlQ 2022 - GlQ 2012 [m³/s]	GlW 2012 [cm]	GlW 2022 183 Tage Unterschr. [cm]	GlW 2022 - GlW 2012 [cm]
MAXAU	362,320		1161	1141	-20	495	499	4
SPEYER	400,610		1185	1161	-24	363	362	-1
WORMS	443,370		1311	1291	-20	195	192	-3
MAINZ	498,270		1481	1466	-15	288	290	2
KAUB	546,230		1521	1507	-14	206	204	-2
ANDERNACH	613,780		1811	1785	-26	259	255	-4
Bonn	654,800		1811	1788	-23	286	285	-1
Köln	688,000		1861	1841	-20	293	293	0
Düsseldorf	744,200		1903	1871	-32	256	247	-9
Ruhrort	780,800		1987	1953	-36	397	388	-9
Wesel	814,000		2009	1971	-38	347	346	-1
Rees	*837,400*		*2031*	*1998*	*-33*	*(295)*	*(289)*	*-6*
Emmerich	851,900		2030	1991	-39	240	233	-7

6

Inhoud

Laagwater: vergelijking NL en DE info

- OLR2022 vs GIW2022
  - Sluiten op de grens goed op elkaar aan
  - Het verschil is hooguit enkele cm
  - Dit bevestigt nog een keer van NAP en DHHN2016 vrijwel gelijk zijn, in ieder geval in dit gebied



HKV

7

Afvoeren testsimulaties

- Q1020 [~GIW2022]
- Q2000 (~mediaan) [~ZW2022]
- Q6253/6323 [MHW1921/2020] (bron van 70 m3/s bij Emmerich (rivieras))
- Q7009 [hoogste afvoer D3D, huidige hydrograaf]

HKV

8

Randvoorwaarden en lateralen

```
IJssel
1020 3.39
2000 5.11
6323 8.06
7009 8.28
Bovenrijn-Waal
1020 1.64
2000 3.16
6323 6.84
7009 7.15
Pkan-NRijn-Lek
1020 6.0
2000 6.21
6323 9.76
7009 10.15
```

- BL2022 (normaal, geen uitsplitsing getij/meerpeil)

	Q1020	Q2000	Q7009	Q6253(6323)	
Nr1a	*Q=21,8*	*Q=117*	h=10,15	h=9,76	(rkm=894)
Yac12	h=3,39	h=5,11	h=8,28	h=8,06	(rkm=919,70)
Wl2b	h=1,64	h=3,16	h=7,15	h=6,84	(rkm=924,10) (hier is nog klein beetje getij)
OudeY	Q=0	Q=10,52	Q=36,8	Q=36,0 *	
QLent	Q= 0	Q=23.36	Q=0	Q=0	(1,5% Qwaal)
Ini	1020	1954	7009	7009	

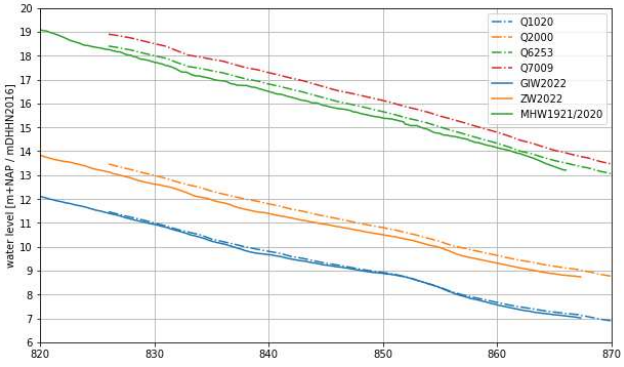
```
Q_Lentduiker = 0;
if Qcur > 1020 && Qcur < 5000
    Q_Lentduiker = 0.015*Qwaal;
end
```

* Q5506:35,5 Q7009:36,8 m3/s

HKV

9

Resultaat



- Q1020 [GIW2022]
- Q2000 (~mediaan) [ZW2022]
- Q6253/6323 [MHW1921/2020]
- Q7009

- DE: DHHN2016, NL: NAP
- Komt goed overeen, gegeven onzekerheid in exacte Q
- Lage Q goede overeenkomst, mediaan en MHW wat te hoog in model; verhang klopt
- Mogelijke verklaringen
  - "Hysterese"? (statistiek Q-h niet per definitie gekoppeld)
  - N.b. Rooster wordt nog verfijnd
  - Kribben/overlaten? (waarschijnlijk niet de oorzaak)

Volgende slide: meer gedetailleerde vergelijking

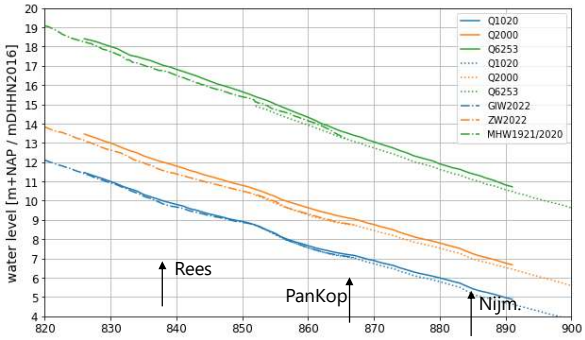
HKV

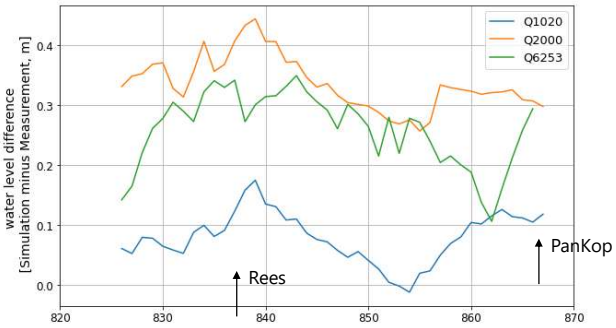
10

Resultaat

- Q1020 [GIW2022]
- Q2000 (~mediaan) [ZW2022]
- Q6253/6323 [MHW1921/2020]

- Boven, inclusief Waal (wl2a)
  - Dash-dot: WSV-metingen
  - Gestippeld: Betrekkingslijnen 2022
- Onder:
  - Verschil tot aan PanKop
  - Simulatie minus meting WSV





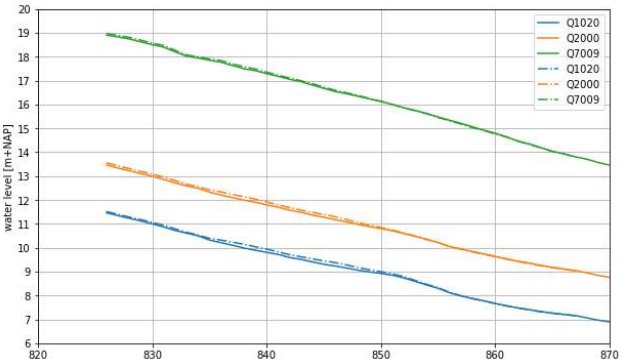
11

Resultaat

- Vergelijking met eerdere model (j18_5-v2)

- Q1020 [GIW2022]
- Q2000 (~mediaan) [ZW2022]
- Q7009

- 70_archief_hkv
  - \04_hydraulica\00_sims_hydro\09_Qdhydro\Q02000.zip
  - 05_morfologie\02_sims_morph_hydrograaf_oud_vs_nieuw\21_C50_ijslat_lent_qben_ldb_new_hydrograph\Q*



- Getrokken lijnen = nieuw
- Iets lagere waterstanden
- Vrijwel geen effect bij hogere afvoer
- Grootschalig zomerbedbodem DE aangepast, daardoor iets hogere waterstand

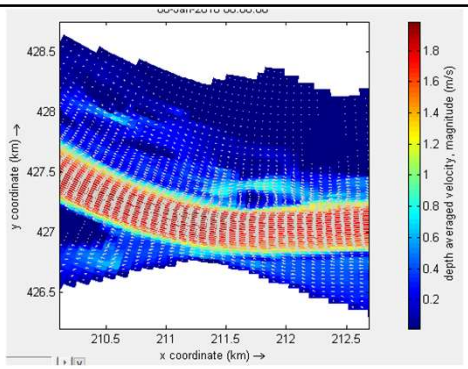
12

Resultaat: stroombeeld bij Q7009

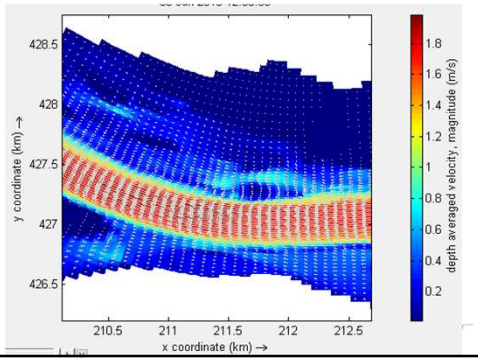
- Q7009
- Effect dijkverlegging Emmerich
- Onder met dijkverlegging
- Doet bij deze afvoer nog heel weinig

- N.B. bodemhoogte wordt nog gecheckt, maar zal op resultaat niet veel doen.

IRM-model



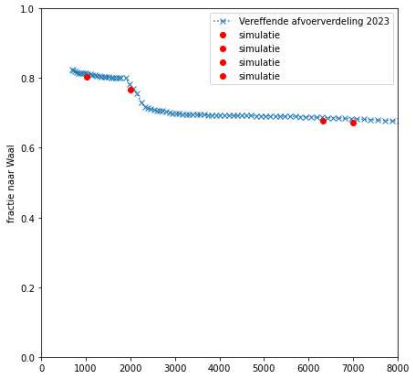
Model grensregio



13

Afvoerverdeling splitsingspunt

- Qbr vs Qwl (frac Qwaal)
- Vergelijking met metingen
  - Vereffende afvoerverdeling 2023
- Voor 4 nieuwe simulaties
- N.B. geen vergelijking met eerdere simulaties (want vrijwel geen verschil waterstand PKop



14

Simulaties Referentiemodel

Randvoorwaarden (model nog niet uitgebreid naar benedenstrooms)

- Nrlek: Qrand bij Qlob<2870, daarboven h_rand
- Alleen Q oude ijssel (Twentekanaal in yac3)
- Qduiker Lent, zie hiernaast
- Let op:
  - voor NR en BR moet Qtot nog naar Qpercell voor morfo
  - Tri-diag geeft voor _N32 domeinen nog een 'ERROR IO'

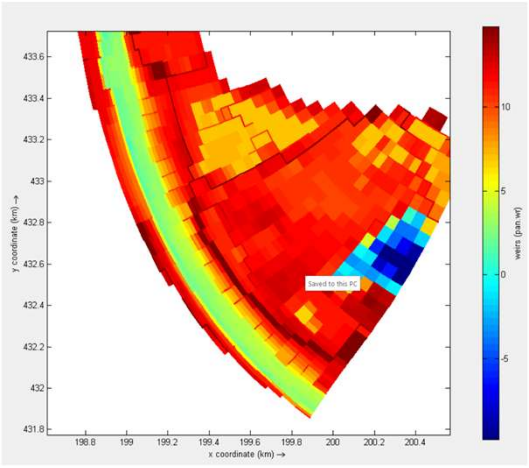
```
Q_Lentduiker = 0;
if Qcur > 1020 && Qcur < 5000
    Q_Lentduiker = 0.015*Qwaal;
end
```

15

Referentiemodel

Check kribben/overlaten

- Weirs hebben in .wr files –teken
- Dat is zelfde teken als dep files, lijkt te kloppen, zie ook figuur hier naast (Pannerdensch Kanaal)



16

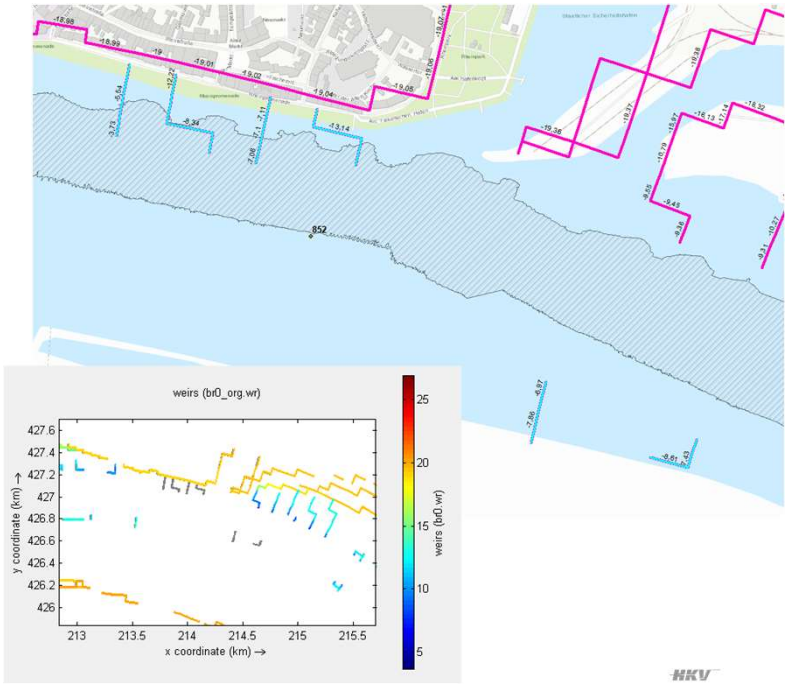
Referentiemodel
Uitbreiding met wl2c, yac3a/b/c

- Oktober 2024
- Benedenstroomse roosters toegevoegd, daarin geen roosterverfijning tov oorspronkelijke model, yac3 in 3 delen geknipt, Twentekanaal van rooster verwijderd
- Let op: in eerdere berekeningen: Oude IJssel ontbrak in yac1a.mdf/src
- Check op D3D-bodem: gelijk aan eerder, lijkt OK

17

Referentiemodel
Weirs br0 Emmerich

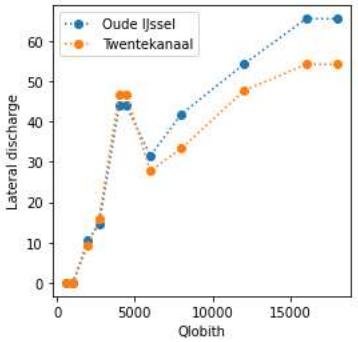
- Weirs Boven-Rijn verwijderd



18

Referentiemodel
Tabel met randvoorwaarden

- Betrekkingslijnen 2022 met IJ en WL gemiddelde van eb en vloed
- Lateralen Oude IJssel en Twentekanaal obv WAQUA j18



QLOB	Qwl	Qnr	Qij	hbenwl	hbennr	hbenij	Qng_lnt	Qlat_oij	Qlat_tk
1020	829.22	21.77	168.91	0.49	6.00	-0.26	0.00	0.00	0.00
1400	1125.89	24.83	249.28	0.63	6.00	-0.22	16.89	4.08	3.59
1630	1307.48	24.70	297.74	0.71	6.00	-0.21	19.61	6.55	5.76
2020	1566.44	127.79	325.76	0.82	6.23	-0.17	23.50	10.63	9.44
2500	1773.93	374.28	351.85	0.96	6.77	-0.13	26.61	13.36	14.09
3220	2243.79	531.33	444.92	1.22	7.52	-0.08	33.66	26.30	28.37
4350	3013.64	737.42	598.98	1.65	8.44	0.02	45.20	43.99	46.87
5800	3997.99	1008.87	793.06	2.25	9.45	0.13	0.00	33.17	30.22
8400	5659.00	1598.80	1142.20	3.36	10.76	0.30	0.00	43.15	34.82

- Qwl/nr/ij: afvoerverdeling (alleen Qnr nodig voor modelrvw)
- Hbenwl/nr/ij: benedenwaterstanden in m+NAP
- Qng_lnt: onttrekking/lozing instroomdrempel nevengeul Lent
- Qlat_oij/tk: laterale toestromingen (as rivier) Oude Ijssel en Twentekanaal

Referentiemodel
Initiele condities

- Obv Betrekkingslijnen 2022, centerkm
- Zeta0 in mdf bij hydraulisch inspelen, per domein

```
rkms_cen = {'br0'  : [852,'wl'],
            'br2'  : [860,'wl'],
            'wl2a' : [878,'wl'],
            'wl2b' : [907,'wl'],
            'wl2c' : [936,'wl'],
            'pan'  : [873,'nr'],
            'nr1a' : [885,'nr'],
            'yac1a': [890,'ij'],
            'yac2a': [915,'ij'],
            'yac3a': [932,'ij'],
            'yac3b': [958,'ij'],
            'yac3c': [986,'ij']}
```

br → wl → pan nr ijssel →

QLOB	br0	br2	wl2a	wl2b	wl2c	pan	nr1a	yac1a	yac2a	yac3a	yac3b	yac3c
1020	8.73	7.55	5.96	3.18	0.97	6.91	6.81	5.44	3.73	2.37	0.68	-0.21
1400	9.41	8.32	6.79	4.02	1.39	7.68	7.59	6.21	4.58	3.23	1.31	-0.11
1630	9.79	8.76	7.24	4.47	1.67	8.12	8.02	6.64	5.08	3.71	1.68	0.00
2020	10.32	9.29	7.72	4.95	2.01	8.51	8.27	6.95	5.45	4.12	2.02	0.10
2500	11.00	9.92	8.26	5.49	2.42	8.89	8.11	7.29	5.80	4.43	2.35	0.24
3220	11.95	10.90	9.17	6.36	3.08	9.75	8.57	8.10	6.64	5.30	2.97	0.56
4350	13.21	12.19	10.36	7.50	3.96	10.93	9.61	9.13	7.52	6.02	3.64	0.89
5800	14.54	13.56	11.53	8.59	4.96	12.07	10.63	10.08	8.27	6.61	4.33	1.43
8400	16.31	15.37	12.99	9.79	6.28	13.40	11.88	11.10	8.97	7.31	5.14	2.13

n.b. wl2c en yac3c verschil met benedenrand(waterstand) vrij groot doordat we voor benedenrand daar gemiddeld zomer/winter, eb/vloed nemen; goed evenwicht controleren

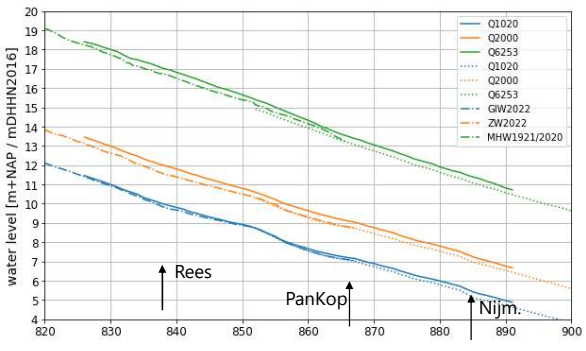
Referentiemodel
Lateralen obv WAQUA j18

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		600	1020	2000	2700	4000	4450	6000	8000	12000	16000	18000
2	Hollands_Duits_gemaal_Nijmegen	0	0	1.19	1.66	2.38	5.22	3.58	5.73	8.49	10.51	10.51
3	Land_van_Altena	0	0	0.78	1.67	1.57	2.99	2.35	3.38	5.7	6.85	6.85
4	gemaal_Kandia	0	0	0.81	1.53	1.62	3.53	2.43	3.32	4.44	5.38	5.38
5	Arnhem_ca	0	0	0.21	0.55	0.41	0.91	0.62	0.81	1.08	1.29	1.29
6	Heelsumsche_Beek_ca	0	0	1.32	3.05	2.64	5.35	3.96	5.25	8.79	10.57	10.57
7	GJH_Kuykgemaal_(ontlasting_Linge)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Gemaal_HA_van_Beuningen_(ontlasting_Linge)	-12.5	-12.5	-11.19	-12.5	-9.88	-11.66	-8.56	-3.6	1.88	2.88	2.88
9	Lopikerwaard	0	0	0.57	0.95	1.15	1.83	1.72	2.22	4.6	5.46	5.46
10	Bergambacht_en_de_Overwaard	0	0	1.35	2.72	2.69	4.82	4.04	4.16	6.55	7.76	7.76
11	Rozendaalsche_en_Beekhuizerbeek	0	0	0.17	0.32	0.33	0.75	0.5	0.66	0.87	1.05	1.05
12	Liemers_en_Bevermeer	0	0	1.33	2.6	2.66	6.1	4	5.17	6.91	8.23	8.23
13	Oude_IJssel	0	0	10.52	14.5	21.05	43.99	31.57	41.91	54.29	65.58	65.58
14	Leuvenheimsche_Soerensche_en_Groote_Beek	0	0	1.09	2	2.18	4.76	3.28	4.63	6.7	7.95	7.95
15	diverse_beken_gemalen_km_920_930	0	0	2.8	5.41	5.6	12.52	8.4	11	15.5	16.66	16.66
16	Twentekanaal_diverse_beken	0	0	9.25	16.03	18.5	46.87	27.75	33.39	47.68	54.25	54.25
17	diverse_beken_en_gemalen_km_930_940	0	0	1.12	2.25	2.23	5.05	3.35	4.14	5.86	6.57	6.57
18	diverse_beken_en_gemalen_km_944_957	0	0	1.45	2.79	2.89	6.05	4.34	5.72	8.47	9.83	9.83
19	diverse_beken_en_gemalen_km_975_985	0	0	3.28	6.61	6.57	12.95	9.85	11.1	15.73	18.22	18.22
20	diverse_gemalen_km_987_1002	0	0	0.16	0.25	0.33	0.47	0.49	0.99	1.92	2.23	2.23
21	Schipbeek	0	0	2.74	5.51	5.49	12.1	8.23	10.01	14.01	16.25	16.25

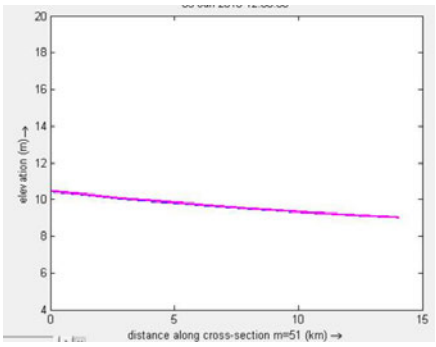
- Voor Q4000, Q4450 overgenomen

21

Referentiemodel
Check Q2000 (quick)



Einde simulatie over rivieras



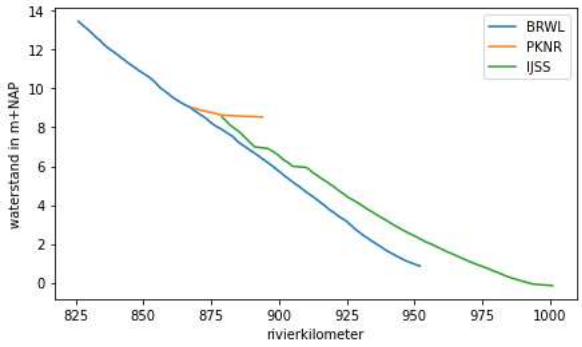
Br2
Roze: sim02, blauw sim04

22

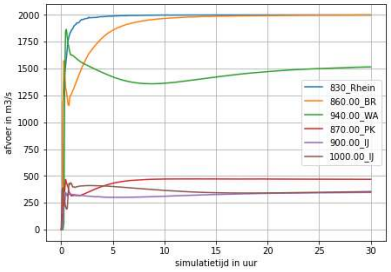
Referentiemodel

Q2000 complete model with correction bnd yac3c

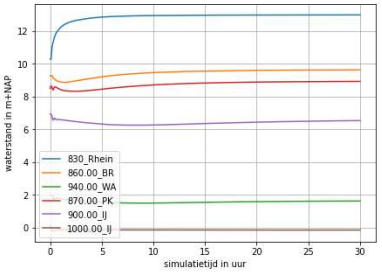
T=30 uur
Verhanglijn Q2000
Stroming van rechts naar links



Tijdreeks afvoer



Tijdreeks waterstand



23

B D-Hydro-analyse

MEMO

Aan: Projectteam IRM-bodemligging
Van: HKV, Sjoukje de Lange, Andries Paarlberg, Hermjan Barneveld
Datum: 6 december 2024
Projectnummer: PR5219.10
Onderwerp: Vergelijking sedimenttransport berekend op basis van Delft3D of D-Hydro-model

1 Introductie

1.1 Context

Voor dit project (IRM uitwerkingen rivierbodemligging) gebruiken we hetzelfde Delft3D-model als recent is opgezet voor het "Grensregioproject". De Delft3D-modelgeometrie (bodem, ruwheid, etc) is afgeleid uit een j18_5 modelschematisatie, aangevuld met enige maatregelen in het splitsingspuntengebied. De afvoerverdeling over de splitsingspunten en gradiënten in sedimenttransport op de riviertakken zijn afgeregeld op metingen.
In het voorliggende project worden maatregelen gedimensioneerd op de berekende sedimenttransportgradiënten die volgen uit de Delft3D-referentiesituatie. De modelschematisatie representeert echter een situatie van grofweg 6 jaar geleden, heeft een relatief grof rooster in de uiterwaarden, en bevat aannames tav het meenemen van bepaalde lateralen en het gedrag bij stuwen.
Rijkswaterstaat (RWS) werkt met D-Hydro (j24), waarbij de kunstwerken aangestuurd zijn via RTC. Het is daarom nuttig om de stroombeelden en het resulterende sedimenttransport van het meest actuele model (D-Hydro) te vergelijken met de uitkomsten van het te gebruiken D3D-model. Dat geeft inzicht of de transportgradiënt in Delft3D past bij de actuele situatie als berekend met D-Hydro, en maatregelen juist gedimensioneerd worden. Het is belangrijk om te benoemen dat dit alleen indicatief en richtinggevend gebruikt kan worden, omdat de instellingen van het sedimenttransportmodel een kalibratieresultaat is met Delft3D. Voor een toepassing met D-Hydro moet het sedimenttransportmodel eigenlijk herijkt worden.

1.2 Doel voorliggende analyse

Het hoofddoel is een inschatting van de effecten van de in Delft3D toegepaste grove en verouderde schematisatie op het ontwerp en het te verwachten morfologisch effect van toekomstige maatregelen. We schatten de sedimenttransportgradienten op basis van stroombeelden uit D-Hydro en uit Delft3D en we duiden onderliggende verschillen (geen uitputtende analyse), op basis van verschillen in modelschematisatie, verschillen in rooster, modelkeuzes, etc.
Dit levert de basis voor een discussie met RWS of en hoe we deze resultaten verder kunnen gebruiken in het project.

2 Methode

Het sedimenttransportmodel dat we toepassen in dit Delft3D-model is:

Meyer-Peter-Müller-formule (Meyer-Peter & Müller, 1948), in Delft3D gesimuleerd met de "general formula" per fractie:

$$\theta = \left(\frac{u}{C}\right)^2 \frac{1}{\Delta D_i}$$

$$s = \alpha 8 D_i \sqrt{\Delta g D_{50}} (\mu\theta - \xi\theta_{cr})^c$$

$$\xi = \left(\frac{D_m}{D_i}\right)^{Asklhe}$$

Met daarin

- *Asklhe* = macht in hiding-and-exposure-functie van Parker et al. (1982)
- C = Chézy-waarde ($m^{1/2}/s$)
- D_i = gemiddelde diameter van de sedimentfractie (D_i = sqrt($D_{bovengrens} \cdot D_{benedengrens}$)) (m)
- D_m = gemiddelde diameter van het sedimentmengsel (m)
- g = zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
- s = sedimenttransport per eenheid van breedte (zonder poriën) (m^2/s)
- u = stroomsnelheid (m/s)
- α = Acal = kalibratiecoefficient (-)
- Δ = relatieve soortelijke massa van sediment onder water
- μ = ribbelfactor (-)
- θ = Shieldsparameter (-)
- θ_{cr} = kritische Shieldsparameterwaarde voor begin van beweging (-)
- ξ = hiding-and-exposure-coëfficiënt (-)

De (kalibratie)coëfficiënten van bovenstaande transportvergelijking zijn, na recente update. Zie Sloff (2024) "Analyse en correctie DVR morfologie Pannerdensch Kanaal (003)", d.d. 2/DEC/2024, als volgt:

Tak	α (Acal) en μ in MPM gekalibreerd
Niederrhein/Bovenrijn	0,3 (ribbelfactor = 1,0)
Waal	0,25 (ribbelfactor = 1,0)
Pannerdensch Kanaal	0,4 (ribbelfactor = 1,0 *)
Nederrijn	0,4 (ribbelfactor = 1,0 *)
IJssel	0,338 (ribbelfactor = 1,0)

*) ribbelfactor voor 3 afvoeren in gestuwde bereik; Q1630: 1.6; Q2020: 1.9; Q2500: 1.6.

Voor de overige instellingen zie Sloff et al (2024: IRM model-update). De korrelgrootteverdeling en laagdiktes zijn overgenomen uit het D3D-model van Grensregioproject. Voor het berekenen van het sedimenttransport zijn stroombeelden uit Delft3D en D-Hydro nodig voor de afvoeren uit de 'gemiddelde IRM hydrograaf'. Deze hydrograaf en de afvoerniveaus zijn weergeven in Figuur 1.

De (hydraulische) Delft3D-berekeningen zijn uitgevoerd met hetzelfde model als voor het Grensregioproject. De D-Hydro-berekeningen zijn uitgevoerd met de D-Hydro-modelschematisatie 'dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a'. Op hoofdlijnen zijn de belangrijkste verschillen tussen het toegepaste Delft3D en D-Hydro-model:

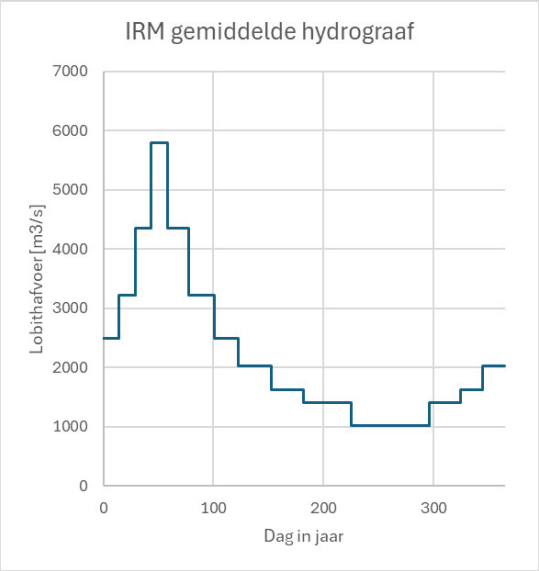
- Modelschematisatie in Baseline: j18 vs j24 (zie Bijlage A voor details)
- Benedenstroomse randvoorwaarden
- Rekenrooster: fijner in D-Hydro, zeker in uiterwaarden
- Modellering stuwen/ schuiven/ e.d.: in D-Hydro met RTC
- Lateralen: 89 in D-Hydro, alleen Oude IJssel en Twentekanaal in D3D
- Zomerbedruwheid: Constant C=50 $m^{1/2}/s$ in D3D, afvoerafhankelijk in trajecten in D-Hydro

Voor de D-Hydro berekeningen gebruiken we dimr_2.27.15.79378; dat is een voorloper van D-Hydro 2025.01 met een correctie voor fou files, geleverd door Deltares. Er zijn randvoorwaarden (inclusief lateralen) beschikbaar voor afvoeren S_1020, S_2000, S_4000, S_6000, S_8000, S10000. In overleg met RWS is er voor gekozen om het D-Hydro-model toe te passen met (geïnterpoleerde) randvoorwaarden vanuit deze beschikbare randvoorwaarden (en dus niet de randvoorwaarden uit D3D over te nemen).

Uit de fou output files is de stroomsnelheid in x- en y-richting uitgelezen, en geclipt naar het zomerbed met een 50 m buffer. De Chézy-waarde kan niet worden weggeschreven naar de fou-file, daarvoor is de laatste map-file gebruikt. Deze D-Hydro-output is, per domein, verwerkt. Ten eerste wordt het geprojecteerd op het D3D grid (nearest neigbour). Daarna wordt de stroomsnelheid ontbonden in m- en n-richting.

Gebruikte data stroombeelden

- Voor Delft3D: input = U, C=50
- Voor D-Hydro: input = U, C



Q Lobith (m^3/s)	Droog duration (d)	Gemiddeld duration (d)	Nat duration (d)
1020	75	71	5
1400	91	72	56
1630	65	49	51
2020	47	50	69
2500	31	36	63
3220	33	38	44
4350	16	34	36
5800	7	15	37
8400	0	0	4

* bron: Afvoerreeks-IRM-morfologie 20241011(v3).docx

Figuur 1. IRM gemiddelde hydrograaf (links), en afvoeren/duur (rechts).

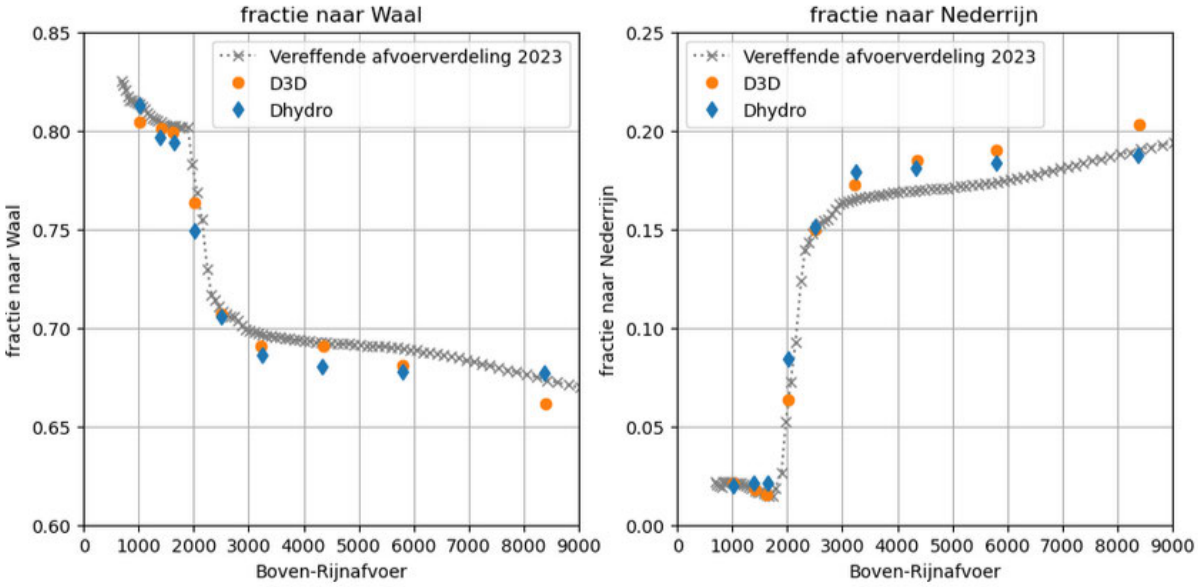
3 Resultaat

3.1 Hydraulica

3.1.1 Afvoerverdeling splitsingspunt

Figuur 2 geeft de afvoerverdeling op de splitsingspunten voor Delft3D en D-Hydro, inclusief de 'vereffende afvoerverdeling 2023'. Beide modellen komen goed overeen met elkaar en passen bij de metingen. Het grootste verschil ligt bij Q = 2020 m^3/s, waarschijnlijk door de verschillen in

stuwaansturing (vereffende afvoerverdeling versus RTC). Beide zijn wel passend bij de vereffende afvoerverdeling 2023.



Figuur 2. De afvoerverdeling in Delft3D, D-Hydro en de vereffende afvoerverdeling van 2023 bij het Bovenrijn – Pannerdense Kop – Waal – splitsingspunt (links) en het Pannerdense Kop – Nederrijn – Ijssel – splitsingspunt (rechts).

3.1.2 Stroombeeld

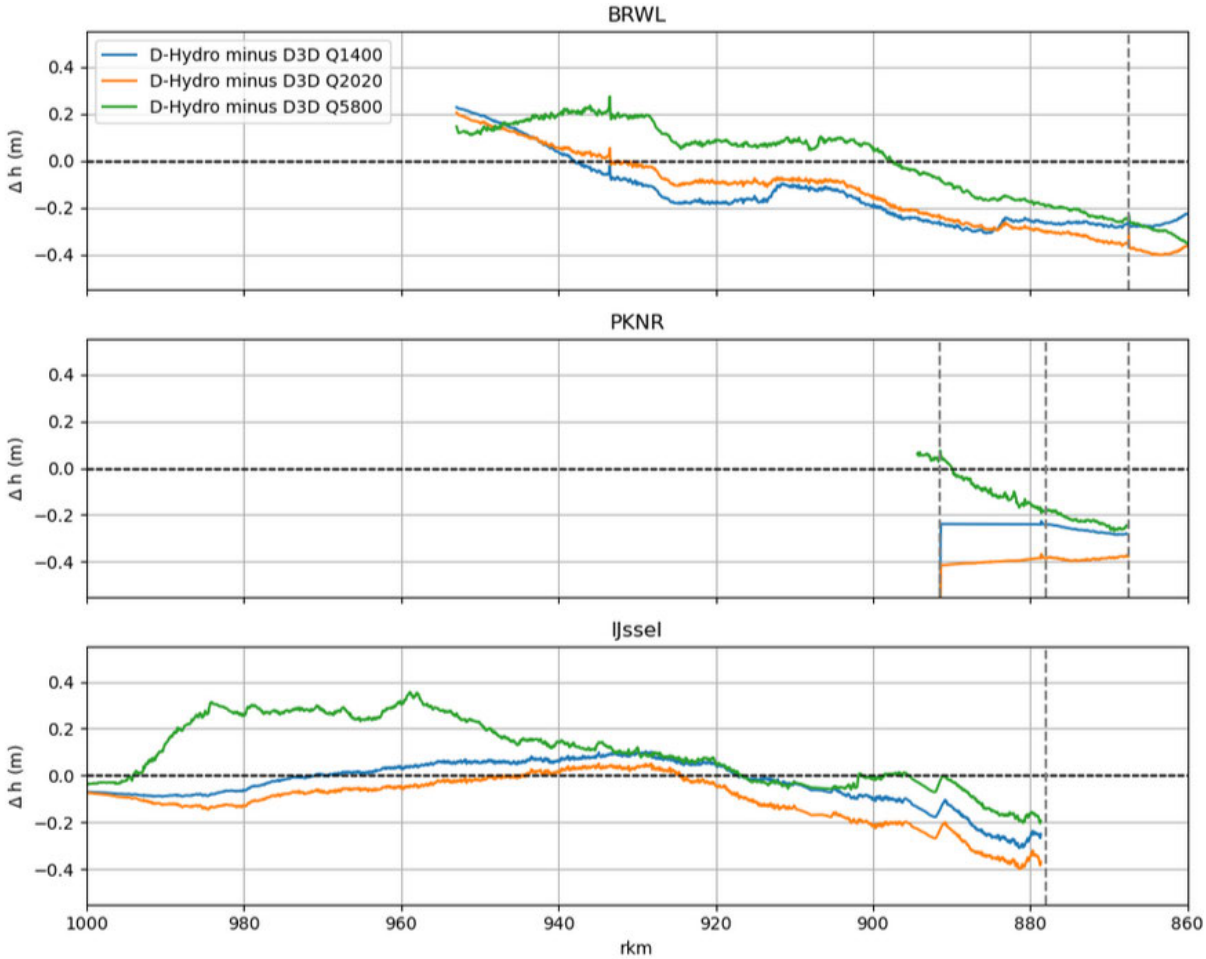
Figuur 3 geeft het verschil in waterstand voor 3 afvoeren.
Figuur 4 geeft het verschil in stroomsnelheid voor 3 afvoeren.

Wat opvalt:

- Voor Q1400 en Q2020 komen de stroomsnelheden behoorlijk goed overeen
- Met uitzondering van het Pannerdensch Kanaal en Nederrijn, waar de stroomsnelheid in D-Hydro groter is; dit is de onderliggende reden voor herkalibratie van transportparameters in Delft3D (ripple factor, zie Sloff (2024)).
- Voor Q5800 (hoogste afvoer in IRM gemiddelde hydrograaf) valt vooral op dat de stroomsnelheid in de Midden-Waal en Midden-IJssel in D-Hydro lager zijn dan in Delft3D. Dit kan verschillende oorzaken hebben:
    - Verschil in ruwheid (zowel zomerbed, zie volgende paragraaf, als winterbed)
    - Verschil in rooster in uiterwaard, wat resulteert in een andere verdeling in afvoer tussen zomer- en winterbed
    - Lokale maatregelen (deze lijkt minder waarschijnlijk omdat het verschil over grotere trajecten zichtbaar is).
- Het is niet helemaal duidelijk waarom de stroomsnelheden in de Beneden-IJssel in D-Hydro groter zijn dan Delft3D.
- Verschillen op de IJssel zijn mogelijk toe te schrijven aan lateralen, waarvan er vooral veel op de IJssel zijn (Bijlage B). Dit verklaart mogelijk ook de hogere waterstanden in de beneden-IJssel in D-Hydro voor de hogere afvoeren.

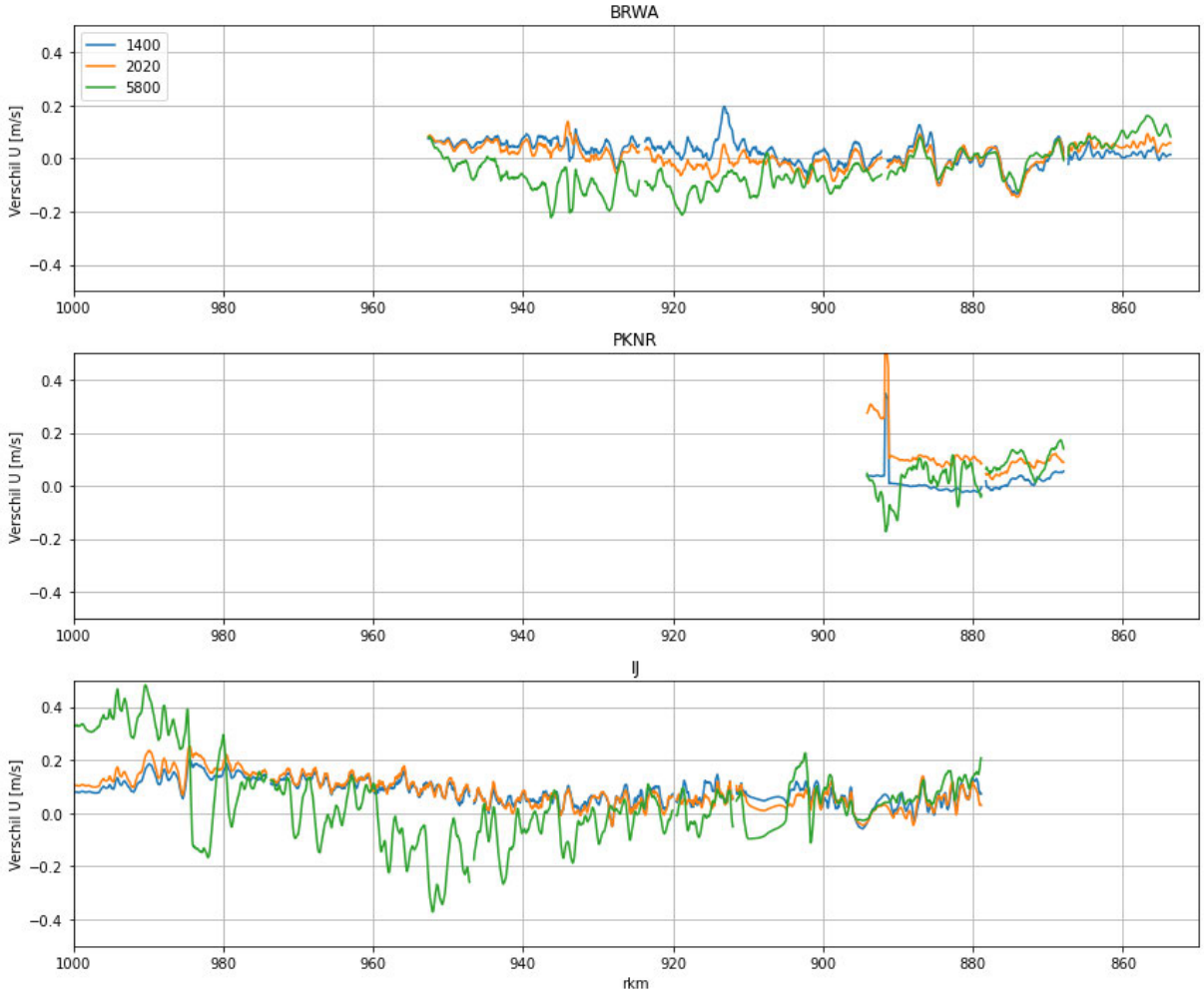
3.1.3 Zomerbedruwheid

In het gebruikte Delft3D-model is de zomerbedruwheid constant[1]: C=50 $m^{0.5}/s$. In D-Hydro is de waterbeweging (waterstand en in minder mate afvoerverdeling) gekalibreerd op de zomerbedruwheid met afvoerafhankelijke ruwheden in riviertrajecten. Figuur 5 geeft de zomerbedruwheid in het zomerbed in D-Hydro weer. Vooral bij hogere afvoeren is de ruwheid relatief hoog (lage Chézy). Ook opvallend is de relatief grote ruwheid in de benedenstroomse trajecten van de Waal en IJssel. De Chézy-coefficiënt is ook een variabele in de transportvergelijking. Vooral een lagere C (grotere ruwheid) heeft een groot effect op het sedimenttransport (eerdere analyse Kees Sloff in traject IRM modelupdate).

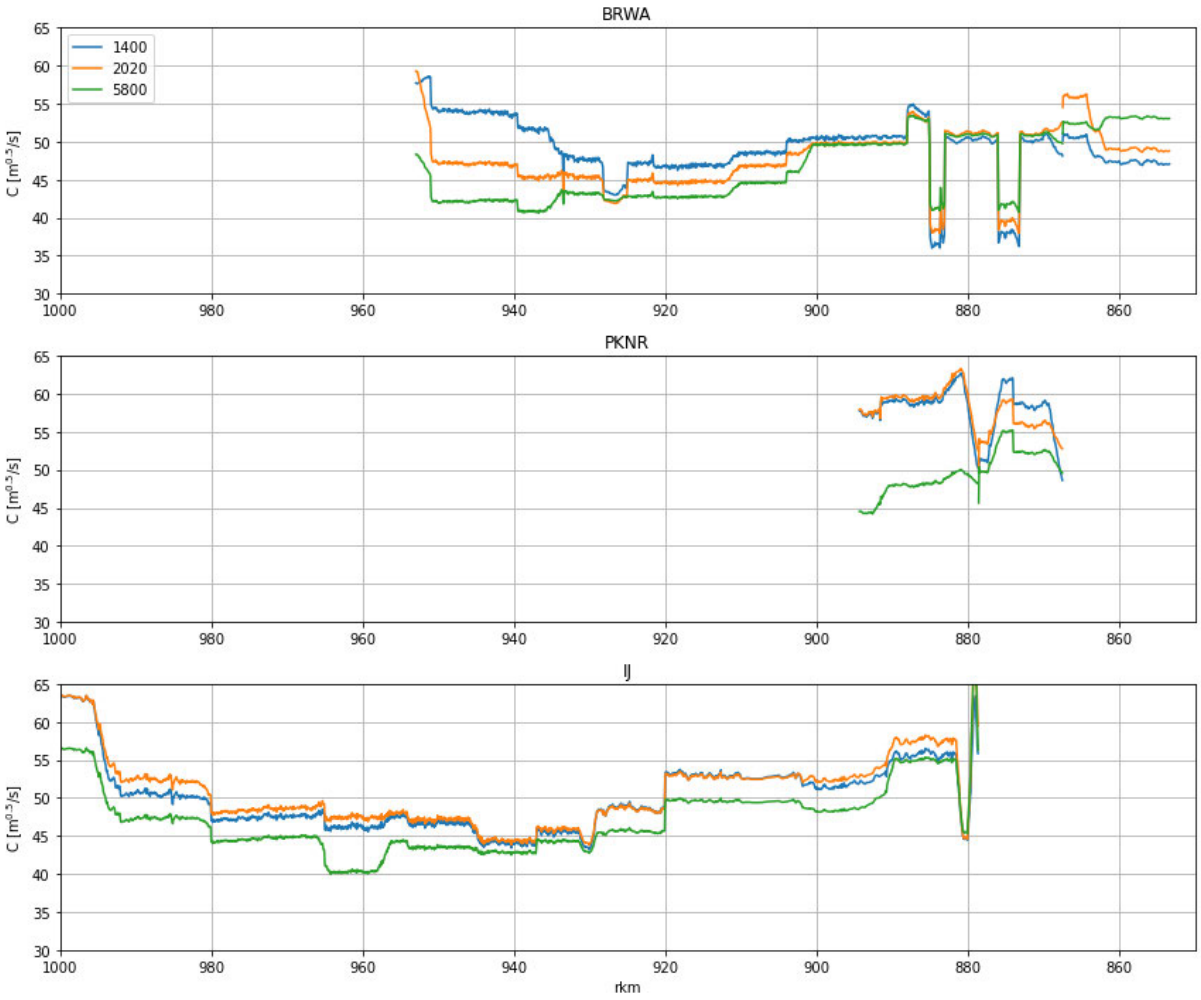


Figuur 3. Verschil in waterstand in de rivieras, D-Hydro minus Delft3D, voor 3 afvoeren. Verticale streeplijnen: bovenste figuur Pankop, middelste figuur Pankop, IJsselkop, stuw Driel, onderste figuur IJsselkop.

[1] Zie Sloff et al (2024) voor de achterliggende argumentatie voor deze constante ruwheid in het zomerbed. Een uitzondering zijn de vaste lagen die ruwer zijn gemodelleerd (C=40). Dit is voor de berekening van het sedimenttransport niet relevant omdat de initiële laagdikte op de vaste lagen gelijk aan 0 is.



Figuur 4. Verschil in stroomsnelheid in de rivieras, D-Hydro minus Delft3D, voor 3 afvoeren.



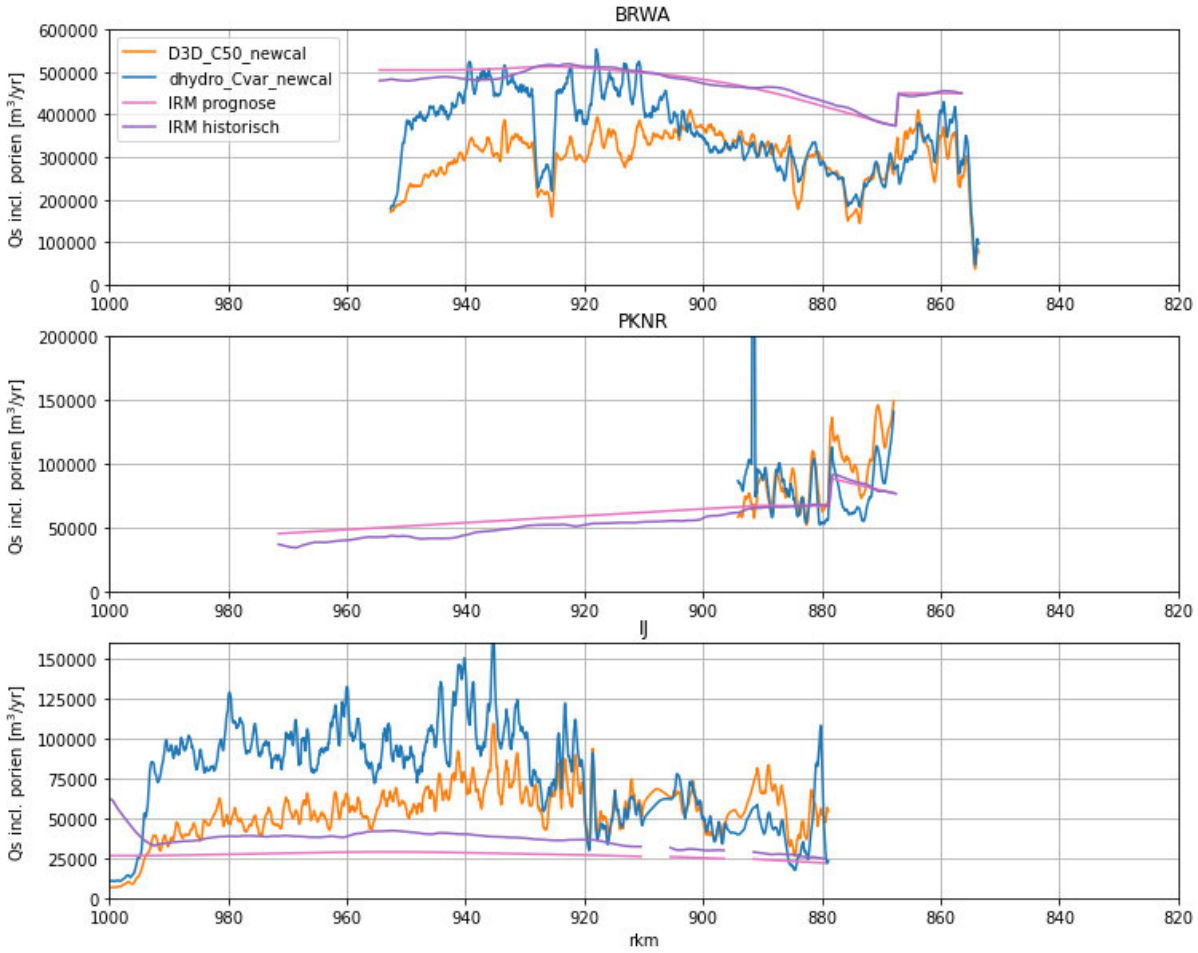
Figuur 5. De zomerbedruwheid in de rivieras in D-Hydro voor alle riviertrajecten per afvoer.

3.2 Vergelijking sedimenttransportgradiënt

Figuur 6 geeft de berekende transportgradiënt voor Delft3D (U(x,y), C =50) en D-Hydro (U(x,y), C(x,y)).

Wat opvalt:

- Het sedimenttransport op Boven-Rijn en Nederrijn zijn vergelijkbaar voor Delft3D en D-Hydro
- Op het Pannerdensch Kanaal geeft Delft3D een groter transport
- Op Waal en IJssel is in D-Hydro de gradiënt in benedenstroomse richting groter; vooral door grotere transporten in de benedenstroomse trajecten



Figuur 6. Vergelijking sedimenttransportgradiënt. Voor toelichting bij IRM prognose en historisch, zie Sloff et al (2024). Het berekende transport is inclusief poriën. Bovenrijn en Waal (top), Pannerdense Kop en Nederrijn (midden) en IJssel (onder). In het figuur staat een 10 punten moving average.

4 Analyse & Synthese

De transportgradiënt berekend met stroombeelden uit Delft3D (U(x,y), C =50) en D-Hydro (U(x,y), C(x,y)) verschillen. Echter, deze kunnen we eigenlijk onderling niet vergelijken, want:

- De gradiënt is een resultaat van Delft3D-kalibratie en dus niet vergelijkbaar met D-Hydro
- Ofwel: kalibratieparameters mag je niet zondermeer toepassen op D-Hydro stroombeelden, en
- Ofwel: toepassing van het sedimenttransportmodel met D-Hydro stroombeeld vraagt om een kalibratie van dit transportmodel, omdat de onderliggende modeluitgangspunten anders zijn

Wel kunnen er bepaalde lessen getrokken worden uit de stroombeelden:

- Een verschil in afvoerverdeling (dat vooral in het gestuwde bereik optreedt bij de IJsselkop) kan effect hebben op de sedimenttoevoer naar de benedenstroomse riviertakken; dit effect kan worden ingeschat met vuistregels.

- De stroomsnelheden in het gestuwde bereik zijn in D-Hydro waarschijnlijk realistischer dan in Delft3D, doordat in D-Hydro de stuwen via RTC gestuurd worden, terwijl in Delft3D een afvoer wordt opgelegd, waardoor de berekende waterstanden afwijken van gemeten waarden. Ook stroomsnelheden worden hierdoor beïnvloed.
- D-Hydro heeft een fijner rooster in de uiterwaarden en bevat aanvullende maatregelen (zie Bijlage A). Er is vooralsnog niet geanalyseerd of dit ook (lokaal) tot andere stroomsnelheden in het zomerbed leidt; omdat:
- Het vooral opvalt dat D-Hydro over langere trajecten een lagere stroomsnelheid oplevert bij Q5800 in de Midden-Waal en Midden-IJssel. Omdat dit lange trajecten zijn, ligt het niet voor de hand dat dit toe te schrijven is aan lokale maatregelen. Er lijkt geen duidelijk verband met (uiterwaard)maatregelen.
- Op de beneden-IJssel is de waterstand in D-Hydro hoger dan in Delft bij Q5800. Dit verschil is mogelijk toe te schrijven aan lateralen, waarvan er vooral veel op de IJssel zijn.

De resultaten van de berekeningen met Delft3D en D-Hydro zijn lastig objectief te vergelijken, door de verschillende uitgangspunten in de modellen. Het blijven appels en peren. Het effect van uitgevoerde maatregelen, die te kleinschalig zijn om in het Delft3D model goed weer te geven, komt niet duidelijk uit deze vergelijking naar voren. Het voorstel is om deze analyse hiermee af te ronden en de (dimensies van) maatregelen te baseren op de transportgradiënten uit Delft3D. Wel zal in de rapportage de nuancering van de maatregelen in relatie tot de grofheid van het Delft3D model worden benoemd.

A Verschillen in modelschematisatie Delft3D en D-Hydro

Modelschematisatie: D-Hydro is actueler (j24), terwijl D3D is afgeleid van j18.

- Verschillen kunnen optreden door ingrepen die tussen 2018-2024 zijn genomen en niet zijn doorgevoerd. Er is door RWS een modelschouw uitgevoerd om te analyseren welke maatregelen/veranderingen er relevant kunnen zijn voor de interpretatie van verschil in modelresultaten:
    - Waal: Bemmel: scherm haven is verplichting, nog niet aangelegd
    - Waal: gepland: geulen UWDH
    - Waal: geulen GOWA
    - Pannerdensch kanaal: Lobberden: insteekhaven, is al gerealiseerd
    - IJssel: RKP (in planvorming)
    - IJssel: Vaalwaard: kadeverlaging en geulen, is al gerealiseerd
    - IJssel: kmr 929,5 LO: gebied niet actueel
    - IJssel: Rammelwaard: aantakking KRW onvolledig
    - IJssel: Deventer: oeverwal tussen zomerbed en Bolwerksplas te laag
    - IJssel: Hengforderwaarden: aantakking zit niet op juiste locatie (anders aangelegd dan gepland)
    - IJssel: Katerstede: benedenstroomse aantakking KRW ontbreekt
    - IJssel: oevererosie Welsum
    - IJssel: aantakkingen KRW Buitenwaarden Wijhe ontbreken
    - IJssel: Zalk: oevererosie
    - IJssel: Onderdijkse waard: oevererosie en RvdR-geulen anders aangelegd dan gepland
    - IJssel: kmr 992 RO: nieuwe krib van X-blocks ontbreekt
    - IJssel: kmr 993,5 RO: oevererosie
    - IJssel: Kampen: nieuwe haven ontbreekt
- In D3D zijn, ten opzichte van j18_5-v2 aanvullende maatregelen in de grensregio (Bovenrijn en PK) doorgevoerd: De referentieschematisatie voor Delft3D is 1-op-1 overgenomen uit het "Grensregioproject". Dit is j18_5-v2 = baseline-rijn-j18_5-v1 + rt_zbhgt16_a1 + wl_nijmeg_a1, met aanvullend o.a. OH-Spijk, KOP, zomerbedbodem 2020 NL, zomerbedbodem 2021 voor Boven-Rijn tot aan Pannerdensche Kop, Meinerswijk, aantal kribben in Duitslands bij Emmerich. Voor details, zie 2024_11_29_modelschematisatie_referentie.pdf

Benedenstroomse randvoorwaarden. Er zijn potentiële verschillen in benedenstroomse randvoorwaarden. Er wordt vooral op IJssel effect hiervan verwacht.

Rekenrooster: D-Hydro heeft een fijner en nauwkeuriger rooster, vooral in uiterwaarden. Dit kan als gevolg hebben dan uiterwaardmaatregelen kunnen in andere manier tot uiting komen, en daardoor leiden tot een andere afvoerverdeling zomer/winterbed.

Stuwen Nederrijn: Deze worden in beide modellen op andere manier geschematiseerd. In D3D wordt bij lage afvoeren een vereffende afvoerverdeling (2023) opgelegd, en bij hoge afvoeren wordt een waterstand opgelegd. In D-Hydro worden de stuwen real-time aangestuurd (RTC).

Lateralen: In D-Hydro worden veel meer lateralen (89) meegenomen. In D3D zitten alleen twee lateralen langs de IJssel (Oude IJssel en Twentekanaal).

Zomerbedruwheid: In D3D wordt een standaard ruwheid van C = 50 $m^{0.5}/s$ opgelegd, behalve bij de vaste lagen. In D-Hydro wordt per traject gebruik gemaakt van afvoerafhankelijke gekalibreerde ruwheden.

B Verschillen in modelschematisatie Delft3D en D-Hydro

Lateralen en onttrekkingen/lozingen in Delft3D (zie Sloff et al 2024 voor toelichting.

QLOB	Qng_lnt	Qlat_oij	Qlat_tk
1020	0	0	0
1400	17	4	4
1630	20	7	6
2020	23	11	9
2500	27	13	14
3220	34	26	28
4350	45	44	47
5800	0	33	30
8400	0	43	35

Qng_Lnt = onttrekking/lozing nevengeul Lent, Qlat = laterale toestroming, oij = Oude IJssel, tk = Twentekanaal.

Belangrijkste lateralen in D-Hydro
(Alleen met > 5 m3/s onttrekking of lozing voor een afvoerniveau)

Qlat_all3 - DataFrame

Index	1020	1400	1630	2020	2500	3220	4350	5800	8400
DR_852.4_L_Gemaal_Kalflack	0.36	0.72449	0.945102	1.319	1.775	2.459	3.47825	4.631	5.246
WL_883.4_L_Gemaal_Hollandsch-Duitsch-Het-Meertje	0.39	0.777755	1.01245	1.4104	1.9	2.6344	3.7275	4.96	5.622
WL_887.0_L_Sluis_Weurt	5.1	3.86306	3.11439	1.8746	1.025	-0.2494	-2.2425	-4.78	-5.714
NR_926.3_R_Inlaat_Kromme-Rijn	-4.13	-4.64571	-4.95786	-5.4516	-5.25	-4.9476	-4.48525	-3.927	-1.432
LE_929.0_R_Sluis_Prinses-Irenesluizen	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17	-19.17
LE_950.0_R_Sluis_Prinses-Beatrixsluizen	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83	-6.83
IJ_901.8_R_Beek_Oude-IJssel	2.83	5.66837	7.38633	10.2994	13.885	19.2634	27.2705	36.304	41.126
IJ_942.3_R_Beek_Schipbeek	0.2	0.897959	1.32041	2.0369	2.9225	4.2509	6.14675	8.039	9.91
IJ_977.7_L_Gemaal_Veluwe-Grote-wetering-Wapenveld	1	2.00041	2.60592	3.6328	4.9	6.8008	9.63	12.82	14.52
TK_3.3_R_Beek_Twentekanaal-Sluis-Eefde	-0.15	1.62592	2.70082	4.5732	8.01	13.1652	21.1335	31.008	35.97
AR_70.8_C_Sluis_Prins-Bernhardsluis-noord	0	1.33388	2.14122	3.4761	4.3425	5.6421	7.66425	10.209	11.756
AR_71.3_C_Sluis_Prins-Bernhardsluis-zuid	-0	-1.33388	-2.14122	-3.4761	-4.3425	-5.6421	-7.66425	-10.209	-11.756

C Overzicht uitgevoerde iteraties schematisatie meergeulenconcept

Deze bijlage geeft een overzicht van de uitgevoerde optimalisatiestappen richting varianten LD-v12 en LD-v16 die zijn gerapporteerd in paragraaf 5.3 van de hoofdtekst.



1

Kort overzicht aanpassingen aan langsdammen

v6: eerste morfologische som
- 40m versmalling
- Ligging gebaseerd op Globaal Ontwerp Langsdammen
- Drempel OLR + 0.5m; Langsdam OLR + 2m
- Bodemhoogte oevergeulen obv vuistregeltool

v8: tweede morfologische som na vele hydrodynamische iteraties
- Stroomlijnen in- en uitstroom langsdammen
- Start langsdam 1 op BW verplaatst in benedenstroomse richting
- Korte langsdammen bij rkm 891 en 895 weggelaten
- Ligging langsdammen 3 en 4 op BW aangepast
- Bodem oevergeulen BW & MW verlaagd; oevergeulen verbreed op MW

v10
- Terugleggen langsdammen bij rkm 891 en 895
- Verlagen en verbreden oevergeulen teruggelegde langsdammen
- 2e deel langsdammen verlagen tot OLR voor langsdammen 1-4 op BW

v11
- Verlaging drempelhoogte vanaf rkm 887.5 (OLR ipv OLR + 0.5m)

v12*
- Verdere aanpassing drempelhoogtes (tot rkm 890: OLR + 0.25m, vanaf rkm 890: OLR + 0.1m)
- Sediment management oevergeulen en erosiekuil rkm912

v15
- 20m versmalling vanaf rkm 887 ipv 40m versmalling
- (zelfde oevergeulbodemhoogte als v12)

v16*
- Verlagen bodemhoogte oevergeulen op BW

* Deze simulaties zijn opgenomen in het hoofdrapport

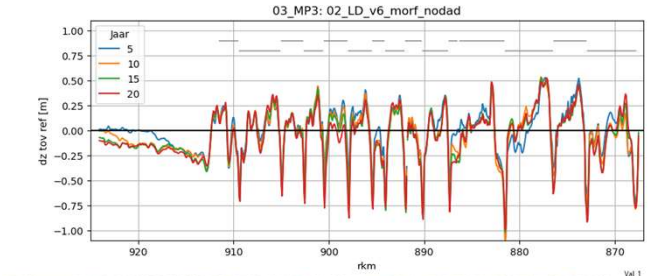
HKV

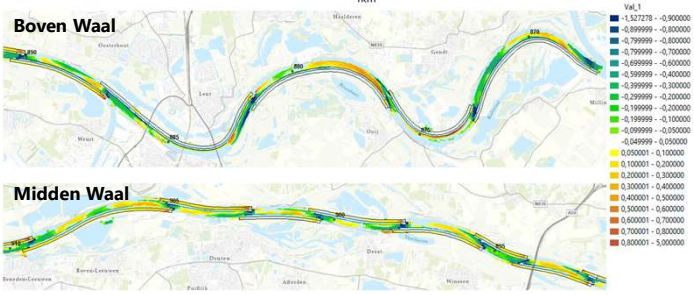
2

LD-v6

- Erosiegaten bij overgangen leiden tot grote bodemdynamiek (spijkers). Gaten leggen ontwikkeling op?
- Nog te weinig onttrekking door oevergeulen, vooral op MW
- Erosie 2e deel langsdammen op BW
- Korte langsdammen (rkm 891 en 895) werken niet?
- Sterke sedimentatie oevergeulen beperkt effectiviteit van het concept

Bodemligging in de tijd tov referentie



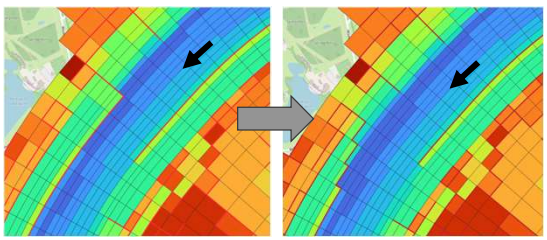


3

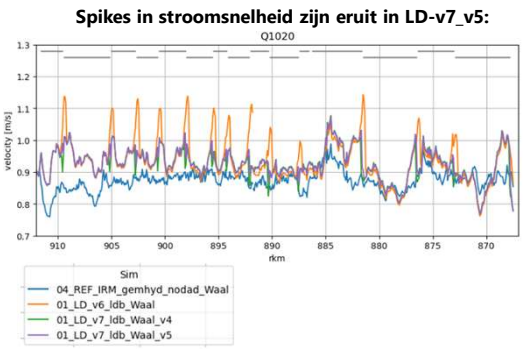
LD-v7_v5

Hydrodynamische iteraties die leiden tot LD-v8
Oplossen spijkers

- Spijkers veroorzaakt door stroomsnelheidspieken op de overgangen bij lage afvoeren
- Opgelost door stroomlijnen in- en uitstroom.



Spikes in stroomsnelheid zijn eruit in LD-v7_v5:

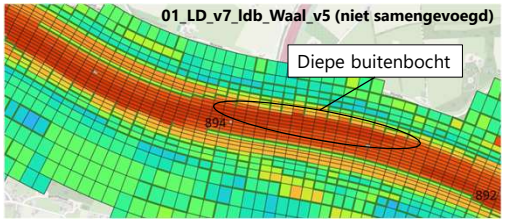


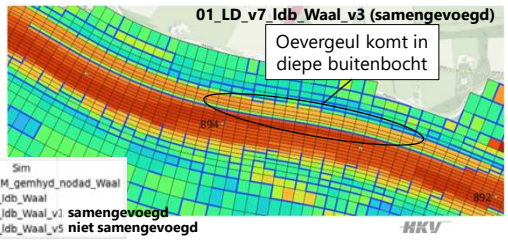
4

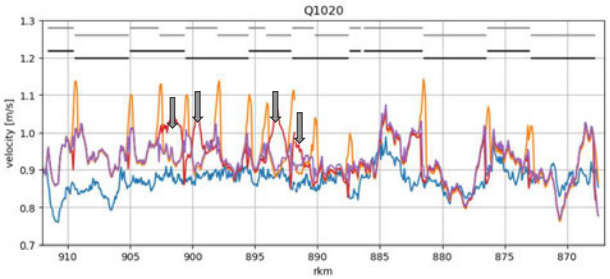
LD-v7_v3

Hydrodynamische iteraties die leiden tot LD-v8
Samenvoegen langsdammen Midden Waal

- Langsdammen per twee samengevoegd op de Midden Waal (nieuw: zwarte lijntjes in figuur)
- Reden: minder langsdamovergangen (deze zijn complex!) en voorkomen korte langsdammen die niet lijken te werken
- Door samenvoegen komt een deel van de nieuwe langsdam in de diepe buitenbocht. Dit leidt tot een relatief grote afname in doorstroomoppervlak en dus pieken in stroomsnelheid, vooral tijdens lage afvoeren.
- Resulterende erosiekuilen zijn ongewenst, dus zijn de langsdammen uiteindelijk niet samengevoegd.







HKV

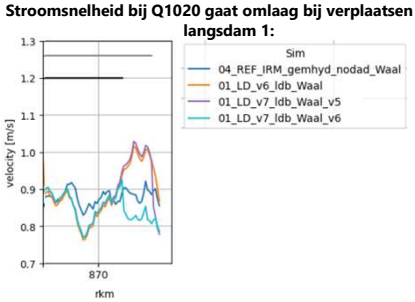
5

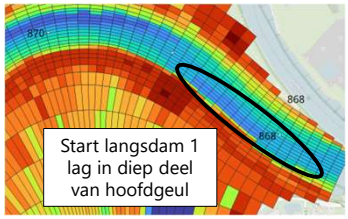
LD-v7_v6

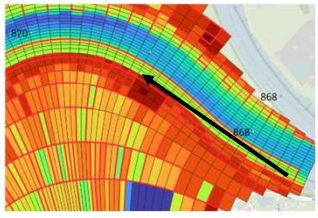
Hydrodynamische iteraties die leiden tot LD-v8
Aanpassen ligging langsdammen 1, 3 en 4 op BW

- Een deel van de erosie bij de start van langsdammen 1, 3 en 4 wordt veroorzaakt doordat een deel van de langsdam in een dieper deel van de hoofdgeul ligt.
- Dit zorgt voor een relatieve afname in doorstroomoppervlak en dus verhoging van de stroomsnelheid.
- De volgende aanpassingen in ligging zijn gedaan:
  1. Start langsdam 1 is verplaatst van rkm 867.5 naar 869
  2. Start langsdam 3 is verplaatst van rkm 876.5 naar 877 (einde langsdam 2 verplaatst mee)
  3. Start langsdam 4 is verplaatst van rkm 881.5 naar 882.5 (einde langsdam 3 verplaatst mee)

Stroomsnelheid bij Q1020 gaat omlaag bij verplaatsen start langsdam 1:







Note: in dit plaatje is de instroom nog niet gestroomlijnd

HKV

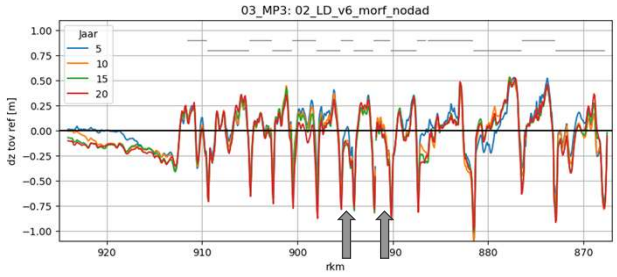
6

LD-v7_v7

Hydrodynamische iteraties die leiden tot LD-v8
Weglaten korte langsdammen bij rkm 891 en 895

- Korte langsdammen lijken niet goed te werken (zie erosie in figuur). Daarom is besloten om eens te kijken wat er gebeurt als die langsdammen worden weggelaten.
- Langsdammen bij rkm 891 en 895 zijn daarom weggelaten.

Bodemligging in de tijd tov referentie (LD-v6)



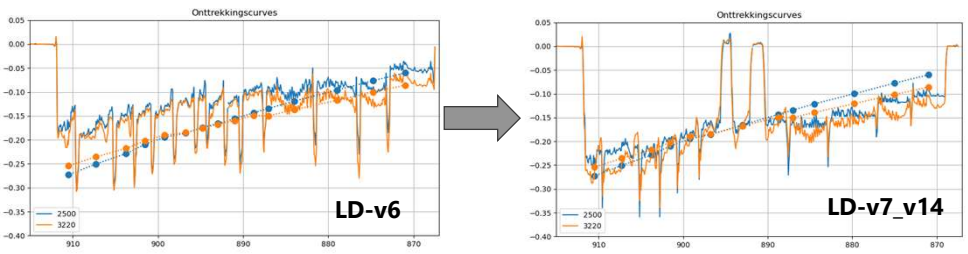
HKV

7

LD-v7_v14

Hydrodynamische iteraties die leiden tot LD-v8
Verlagen bodemhoogte oevergeul + verbreden oevergeulen MW

- Hogere onttrekking oevergeul nodig want we zien nog te weinig aanzanding.
- We zien ook dat de oevergeulen niet zoveel onttrekken als de vuistregeltool berekent.
- Het matchen van de onttrekkingscurves met de vuistregeltool (gestippelde lijn) vraagt om de volgende aanpassingen:
  1: verlagen bodemhoogtes oevergeulen
  wl2a: LD 1, 2, 3, 4, 5 (-2m), 5 (-3m)
  wl2b: allemaal -1m, behalve laatste 2 langsdammen (zelfde bodemhoogte als LD-v6)
  2: verbreden oevergeulen MW (vanaf rkm 890): één cel extra erbij richting uiterwaard (80m => 100m breed)
  uitleg: op de MW werden oevergeulen zo diep dat extra verdiepen weinig effect meer had op het onttrekkingspercentage. Daarom zijn ze hier verbreed



HKV

8

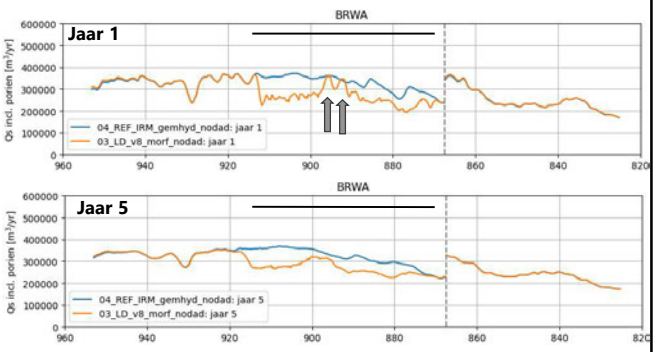
LD-v8

- Spijkers op overgangen weg!
- LD-v8 slaagt erin om het jaarlijks sediment transport langs het langsdammentraject ongeveer constant te krijgen in jaar 1
- Behalve rond rkm 891 en 895; door weglaten langsdammen

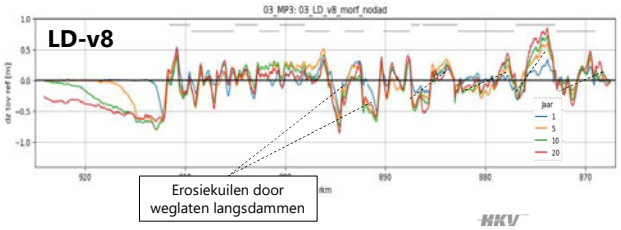
Sediment transport niet meer vlak na verloop van tijd door:

1. Bulten als gevolg van weglaten langsdammen
2. Erosiekuil benedenstrooms van langsdammen (trekt waterstanden omlaag in langsdammentraject)

Jaarlijks sediment transport



Bodemligging tov referentie

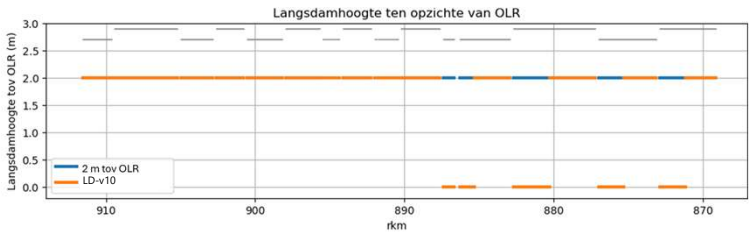


9

LD-v10

Aanpassingen tov LD-v8:

- Terugleggen langsdammen bij rkm 891 en 895 (*erosiekuilen onwenselijk en het verstoort de trends in sediment transport*)
- Verlagen en verbreden oevergeulen teruggelegde langsdammen (-0.5 meter tov LD-v6; verbreed zoals de andere oevergeulen in de MW naar 100m).
- 2e deel van langsdammen 1-4 op BW verlaagd tot OLR (*voorkomen erosietrend langs 2e deel van deze langsdammen*)

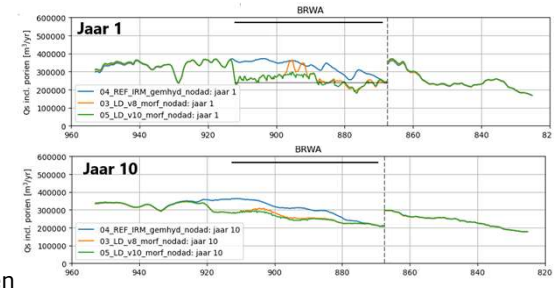


10

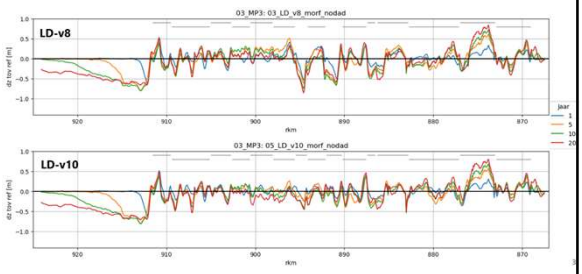
LD-v10

Resultaten
- Bulten in sediment transport eruit.
- Sediment transport nog niet helemaal recht in jaar 1. Hoger op de MW dan op BW.
- Sedimentatie oevergeulen en erosiekuil bij rkm 912 lijken grote impact op effectiviteit langsdammen te hebben over tijd.
- Minder erosie 2e deel langsdammen 1-4 op BW (vooral bij langsdammen 1 en 3)

Jaarlijks sediment transport



Bodemligging tov referentie

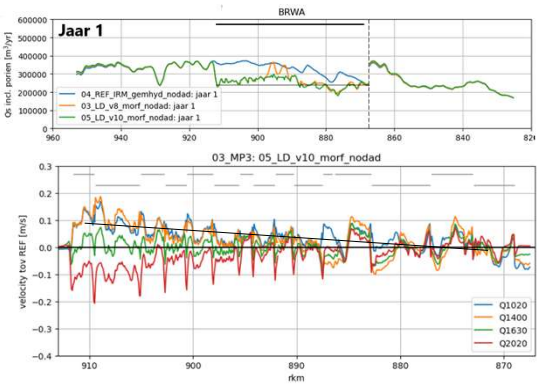


11

LD-v10

Sediment transport in jaar 1 is hoger op MW dan in BW
- Dit komt doordat het sediment transport tijdens lage afvoeren in jaar 1 duidelijk hoger is op de MW dan op de BW (tijdens hoge afvoeren gelijk of zelfs lager op MW).
- Dit patroon is ook terug te zien in de stroomsnelheden tov referentie tijdens lage afvoeren. Deze zijn hoger in de MW.
- Er wordt te weinig onttrokken door de oevergeulen op de MW tijdens lage afvoeren (Q1400, Q1630)!
- Oplossing: verlagen drempelhoogte MW

Jaarlijks sediment transport



12

Matchen onttrekkingscurves tijdens lage afvoeren op MW

LD-v10: vorige morfologische som (drempels op OLR + 0.5m)

LD-v11: drempels vanaf rkm 890 op OLR

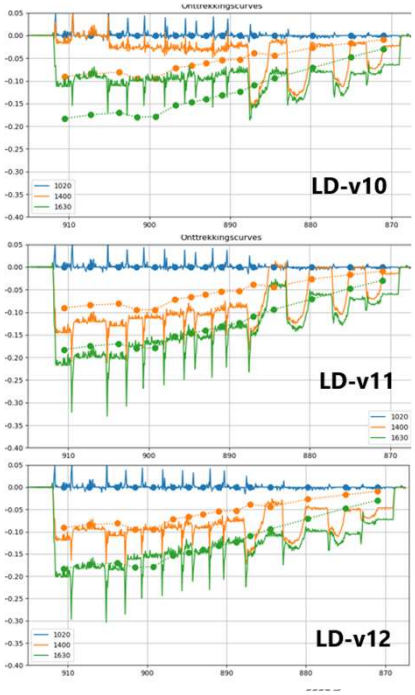
Resultaat: meer onttrekking dan LD-v10 tijdens Q1400 en Q1630 maar iets te veel, meer dan berekend met VRT (stippellijn)

LD-v12:

- Drempels tot rkm 890 op OLR + 0.25m

  Drempels op BW ook verlaagd => voorkomen van hogere stroomsnelheden BW tijdens lage afvoeren als gevolg van omlaag getrokken waterstanden door aanpassingen MW.
- Drempels vanaf rkm 890 op OLR + 0.1m

  Iets hoger dan in LD-v11 omdat iets te veel werd onttrokken



13

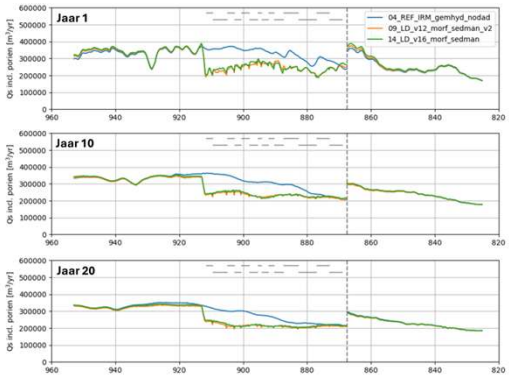
LD-v12

Aanpassingen tov LD-v10

- Aanpassing drempelhoogtes: tot rkm 890: OLR + 0.25m, vanaf rkm 890: OLR + 0.1m
- Sediment management oevergeulen (terugstorten in hoofdgeul) en opvullen erosiekuil rkm 912

Resultaten

- Sediment transport blijft nu veel constanter over tijd
- Zie rapport



14

LD-v16

LD-v16 is een extra variant waarbij de versmalling door de langsdammen op de MW maar 20m is in plaats van 40m.

De volgende aanpassingen zijn gedaan tov LD-v12

- 20m versmalling vanaf rkm 887 ipv 40m versmalling. Oevergeulen daar nu 3 cellen breed in plaats van eerder 4 cellen

  Note: LD 6 (rkm 887.5-890) in de BW was in LD-v12 ook al 3 cellen breed; deze oevergeul is in zijn geheel één cel verschoven richting de uiterwaard en de bodem is 0.5m opgehoogd.
- Verlagen bodemhoogte oevergeulen op BW
  LD 1-4: -0.5m, LD 5: -1m

  Dit is nodig omdat de kleinere versmalling op de MW zorgt voor lagere waterstanden op de BW tijdens lage afvoeren dan in LD-v12. Dit zorgt voor hogere stroomsnelheden. Om daarvoor te compenseren is de bodemhoogte van de oevergeulen op de BW verlaagd.

Resultaten: zie rapport

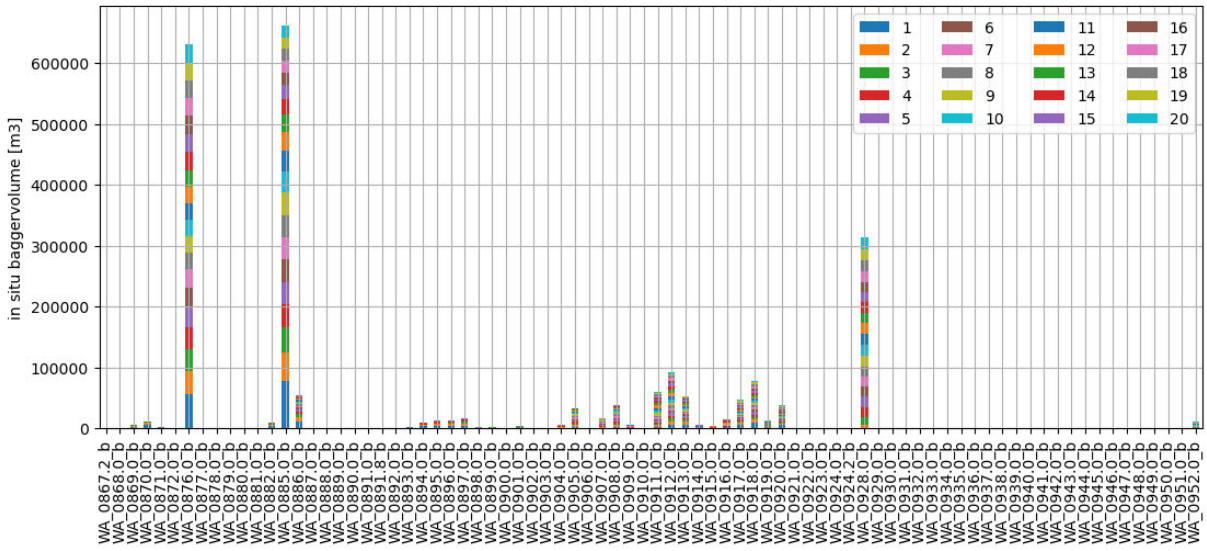
HKV

15

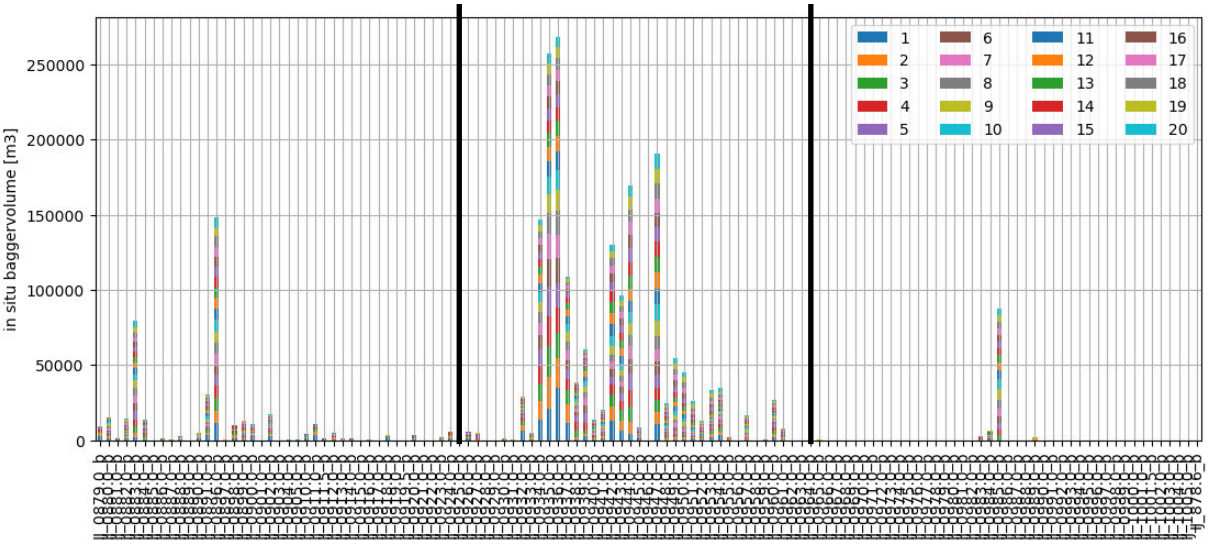
D Ruimtelijke spreiding vaargeulonderhoud referentie

Ruimtelijke spreiding baggervolume voor referentie (MP1). Voor Waal en IJssel. Stromingsrichting van links naar rechts. De getallen in de legenda geven de simulatiejaren aan.

Waal:



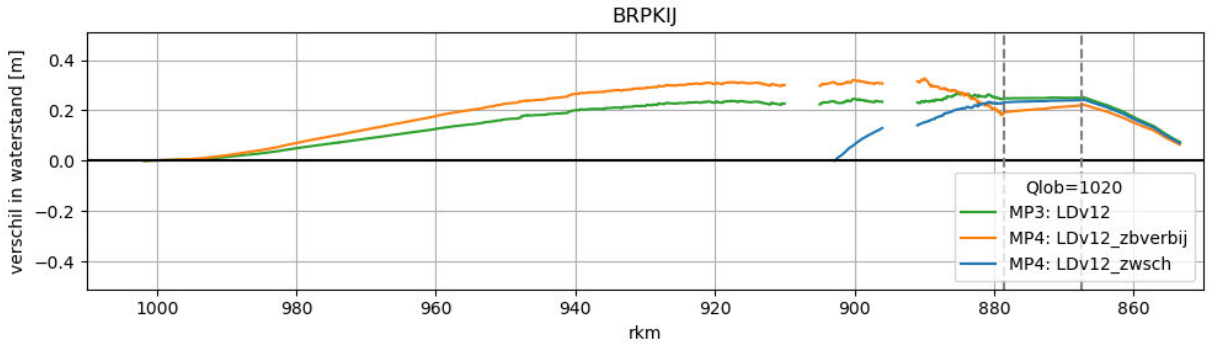
IJssel (Tussen verticale zwarte lijnen: morfologische eenheid ‘Midden-IJssel’):



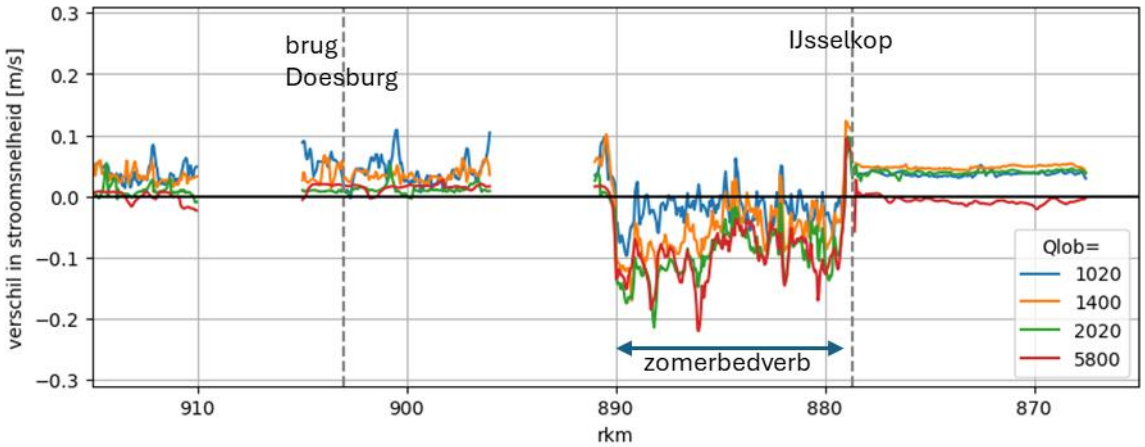
E Initieel hydraulisch effect MP4

E.1 Zomerbedverbreding IJssel

Figuur 9.1 geeft het initiële effect op de waterstand bij OLA weer van MP3 LDv12 (groen) en LDv12 gecombineerd met zomerbedverbreding op de IJssel (oranje). Door de toename van de IJsselafvoer neemt de waterstand toe op de gehele IJssel. In het gebied met zomerbedverbreding (km 879-890) neemt de waterstand in bovenstroomse richting af. Bij Q1400 is dit beeld gelijk (niet getoond). Het effect op de stroomsnelheid bij een aantal afvoerniveaus is gegeven in Figuur 9.2. Hierin is duidelijk te zien dat in het gebied met zomerbedverbreding de stoomsnelheid afneemt, vooral bij hogere afvoeren. Op het Pannerdensch Kanaal is bij lage en middenafvoeren wordt de stroomsnelheid juist groter (meer afvoer, zelfde dwarsprofiel), net als benedenstrooms van de zomerbedverbreding (door toename in afvoer).



Figuur 9.1 Initieel effect ten opzichte van de referentie voor MP3 LDv12 en MP4-maatregelen op waterstand in de IJssel bij OLA.

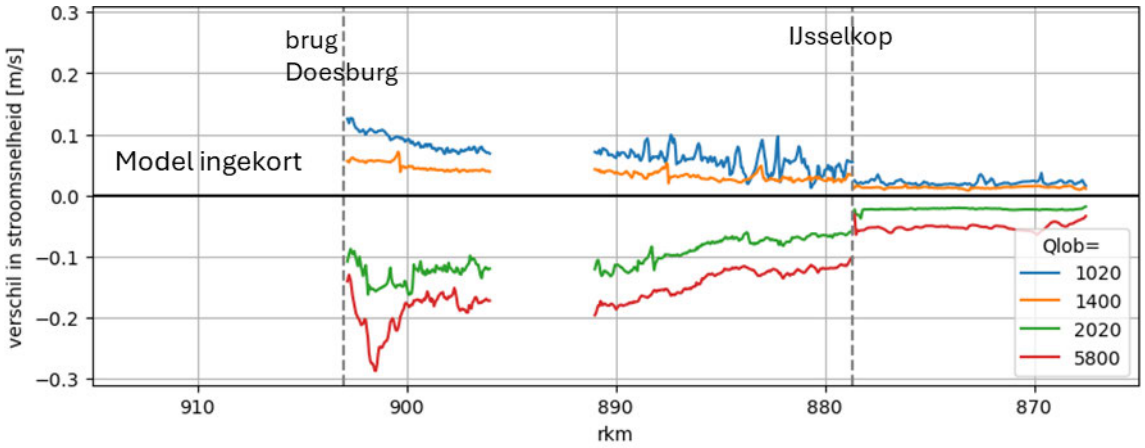


Figuur 9.2 Initieel effect ten opzichte van de referentie voor MP4-zomerbedverbreding op de stroomsnelheid in het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Stroming is van rechts naar links.

E.2 Aansluiten het Zwarte Schaar

Figuur 9.1 geeft het initiële effect op de waterstand bij OLA weer van MP3 LDv12 (groen) en LDv12 gecombineerd met het aansluiten van het Zwarte Schaar (blauw). Het effect op de stroomsnelheid bij een aantal afvoerniveaus is gegeven in Figuur 9.3. Bij lage afvoeren (Q1020/1400) levert de

combinatie van referentiewaterstand en afvoertoename door maatregelen op de Waal tot een steil waterstandsverhang en grotere stroomsnelheid; dit is een conservatieve benadering. Bij midden- en hoge afvoeren levert de maatregel een afname van de stroomsnelheid in het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel.



Figuur 9.3 Initieel effect ten opzichte van de referentie voor MP4-aansluiting Zwarte Schaar op de stroomsnelheid in het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Stroming is van rechts naar links.

F Gegevens effectbepaling rivierfuncties

Deze bijlage bevat onderbouwende grafieken die zijn gebruikt voor de effectbepaling van rivierfuncties in hoofdstuk 6.

In alle figuren: steeds ten opzichte van ‘T0’ in de referentiesituatie. Zowel voor afvoer als waterstand.

Figuur 9.4 toont het effect op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. De bedoeling van de maatregelpakketten is om bij laagwater meer afvoer naar de IJssel te krijgen. Bovenste figuur laat initieel effect zonder morfologische ontwikkeling zien, onderste ontwikkeling na 10 jaar. Zwarte lijn is daar de referentie, waarin de afvoer naar de Waal bij alle afvoeren, door doorgaande bodemerosie in met name de Waal, met ca 25 m^3/s toeneemt en de IJsselafvoer navenant afneemt. Figuur 9.5 geeft een detail van dit figuur voor de Waal en IJssel bij lage en middelhoge Lobithafvoeren.

Figuur 9.6 initieel effect op de waterstand voor maatregelpakket MP4 LDv12-zomerbedverbreding IJssel.

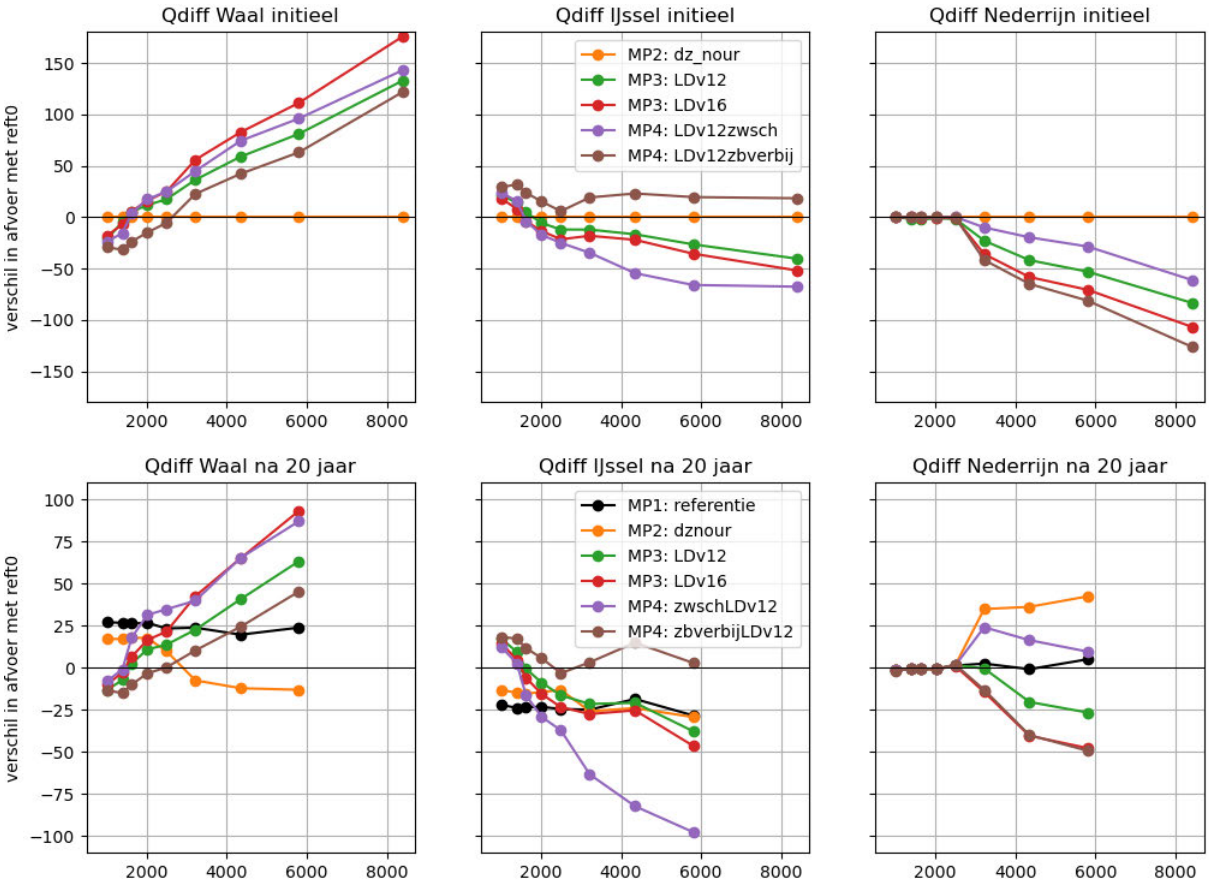
Figuur 9.7: effect op waterstand bij lage afvoeren (Q1020 en Q1400), zowel initieel als na 20 jaar morfologische ontwikkeling.

Figuur 9.8: initieel effect op de waterstand bij Q8400 voor maatregelpakketten waarbij de riviergeometrie initieel wordt aangepast.

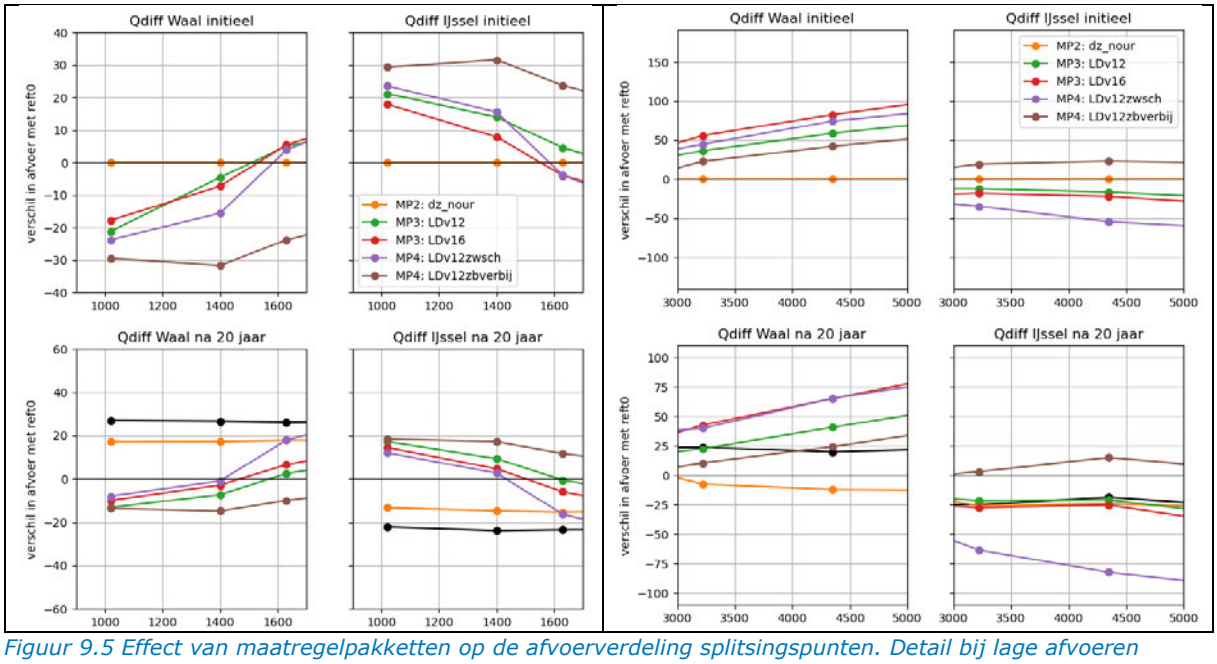
Figuur 9.9 en Figuur 9.10: effect op waterstand bij Q4350 tbv beoordeling effect op inundatiefrequentie.

Figuur 9.11 en Figuur 9.12: inschatting effect MP3 (oevergeulen) op dwarsstroomsnelheid.

F.1 Figuren afvoerverdeling splitsingspunten

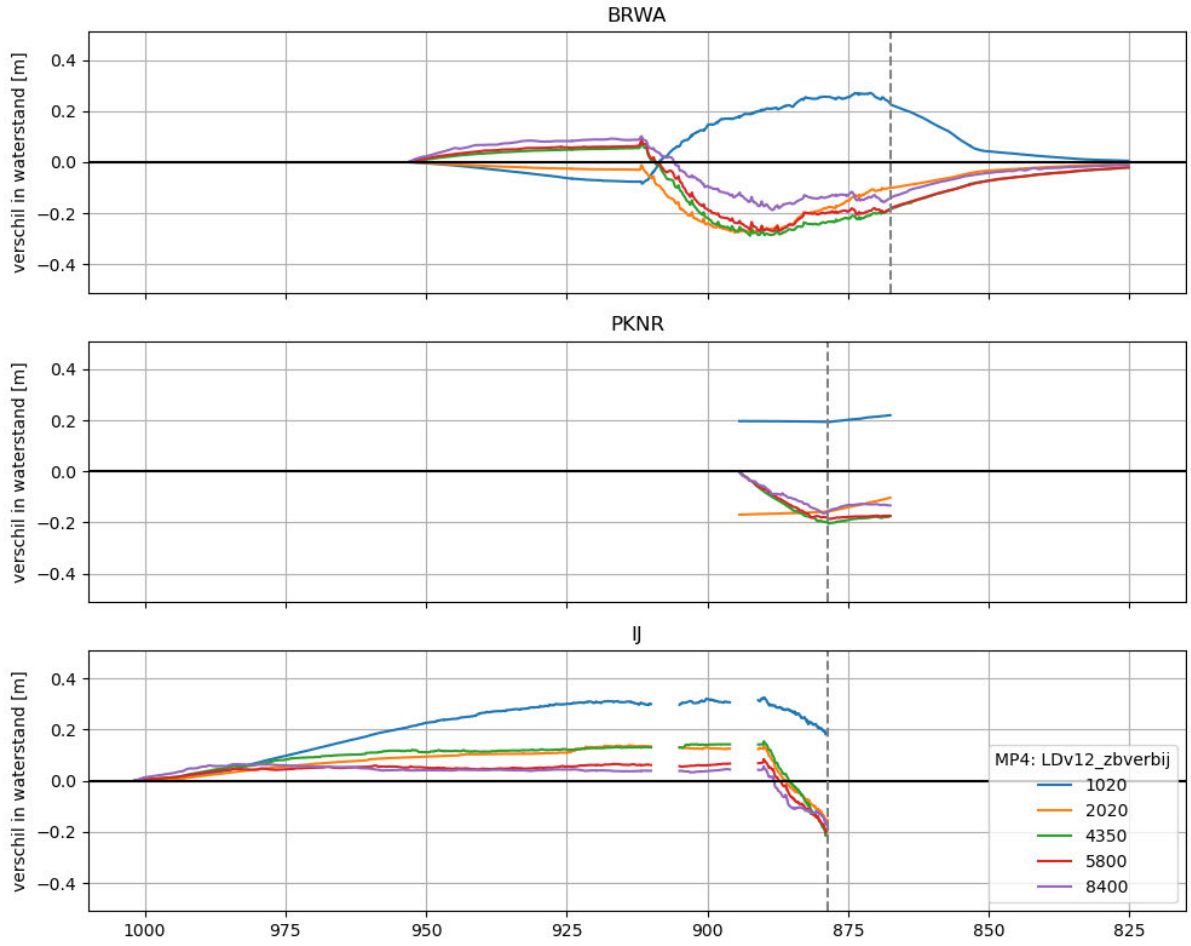


Figuur 9.4 Effect van maatregelpakketten op de afvoerverdeling splitsingspunten. Bovenste rij: initieel effect op afvoerverdeling, onderste rij, effect na 20 jaar. Steeds ten opzichte van de referentiesituatie.

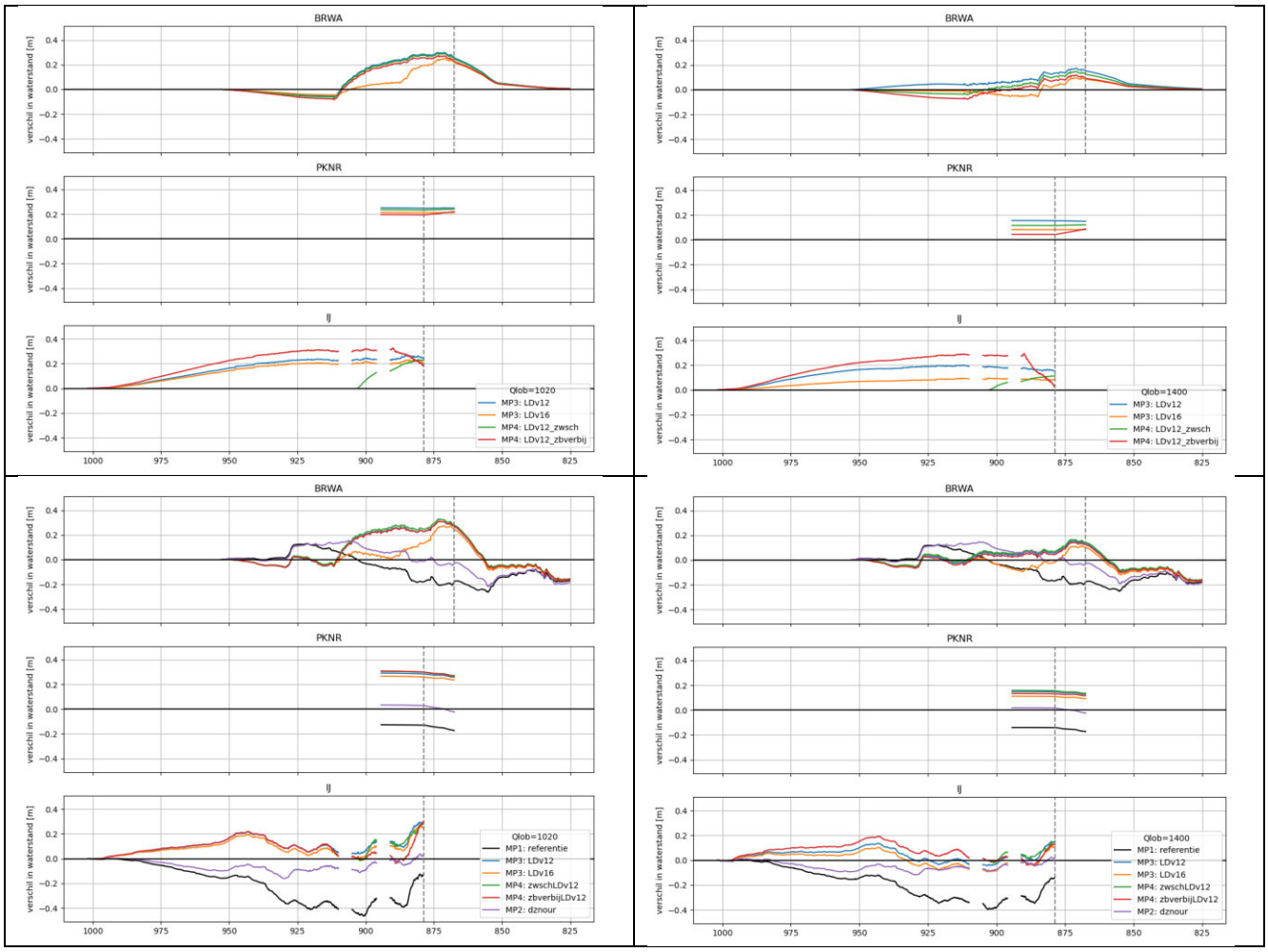


Figuur 9.5 Effect van maatregelpakketten op de afvoerverdeling splitsingspunten. Detail bij lage afvoeren (links) en middelhoge afvoeren (rechts).

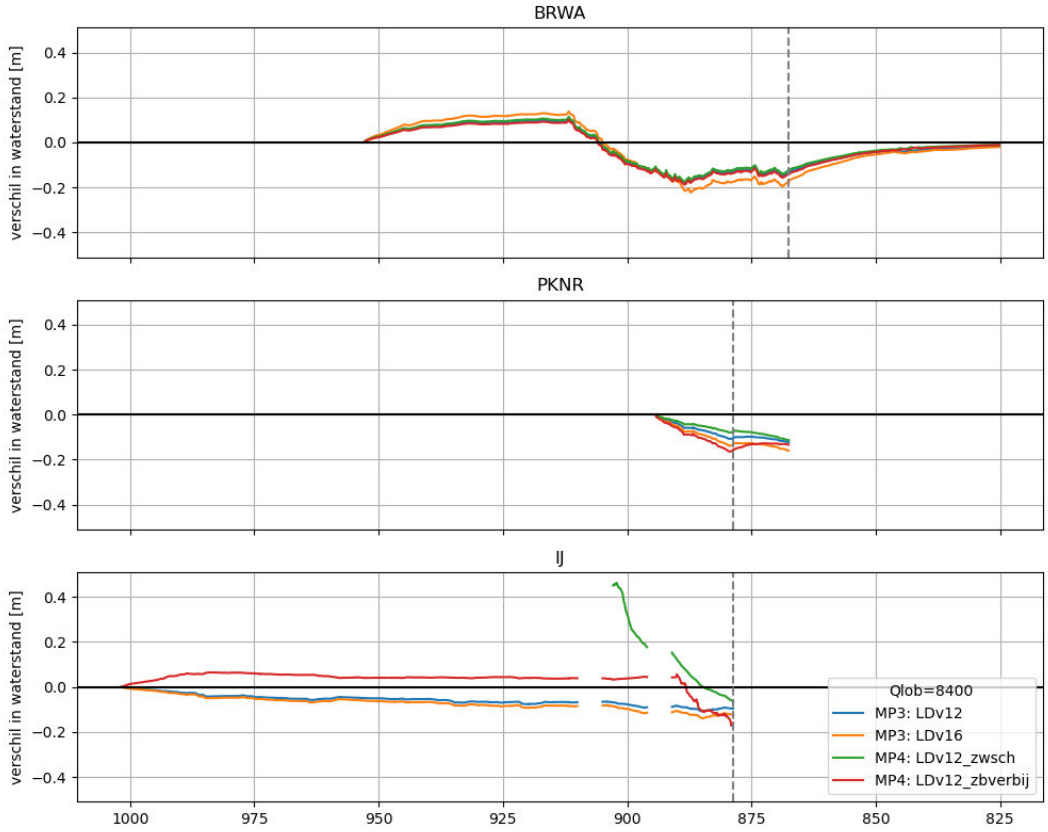
F.2 Figuren waterstanden



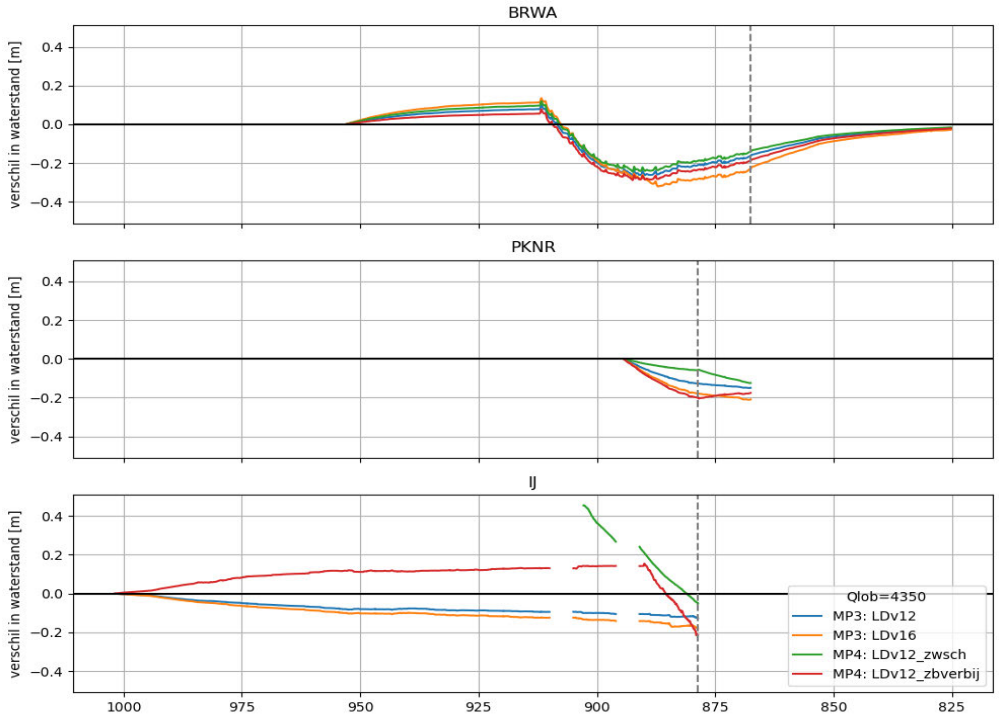
Figuur 9.6 Initieel effect van maatregelpakket MP4 LDv12-zomerbedverbreding IJssel op de waterstand in de Rijntakken, bij een aantal afvoerniveaus.



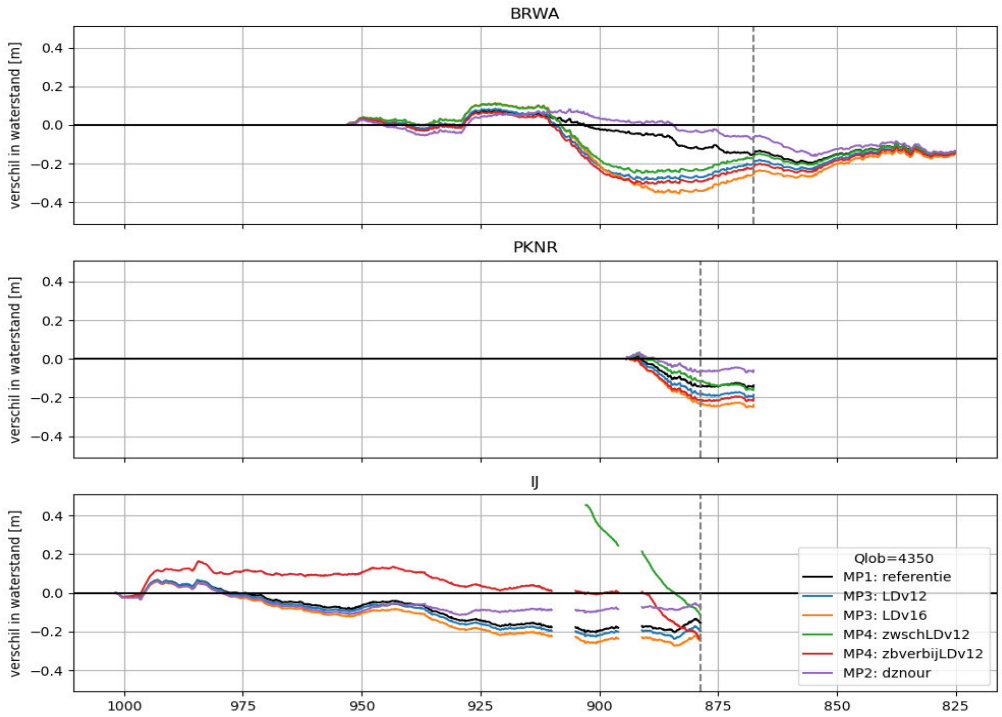
Figuur 9.7 Effect op waterstand bij Q1020 (links) en Q1400 (rechts). Boven initieel en onder na 20 jaar bodemontwikkeling.



Figuur 9.8 Initieel effect op de waterstand bij Q8400 voor maatregelpakketten waarbij de riviergeometrie initieel wordt aangepast.



Figuur 9.9 Effect op waterstand bij Q4350, initieel.

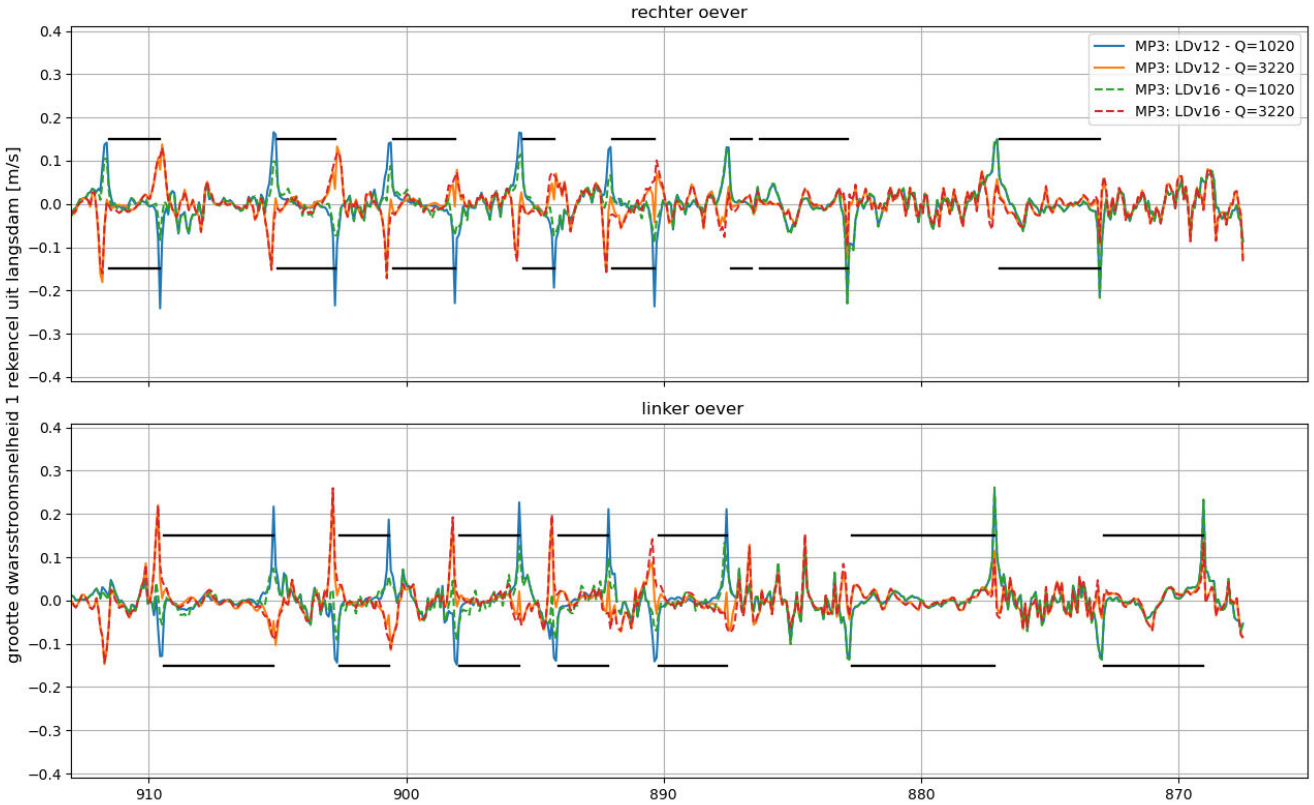


Figuur 9.10 Effect op waterstand bij Q4350, na 20 jaar morfologsiche ontwikkeling.

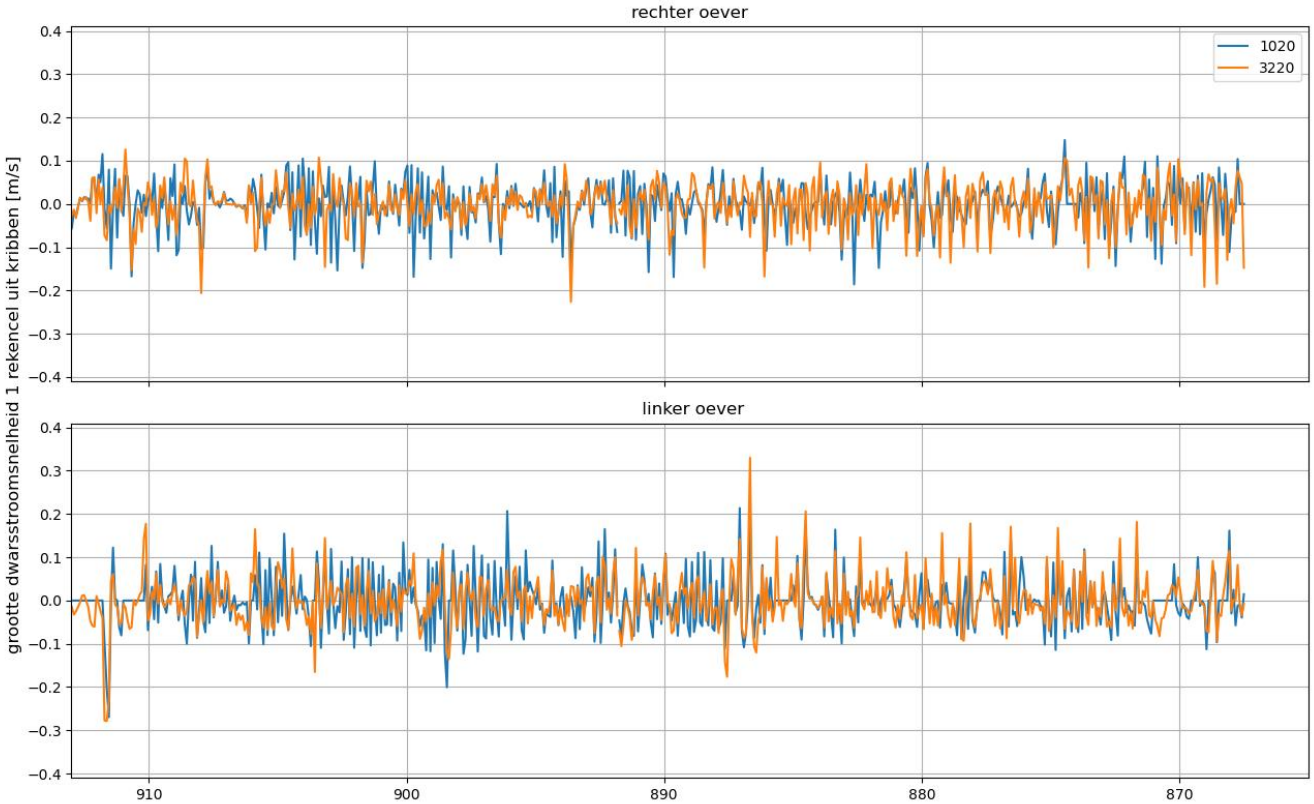
F.3 Dwarsstroming MP3

Het rekenrooster van Delft3D volgt het verloop van het zomerbed en ligt daarmee min of meer parallel aan de normaallijn. Daarom gebruiken we voor een inschatting van de grootte van de dwarsstroomsnelheid de "U-component" van de stroomsnelheid over twee constante "M-lijnen" langs de linker- en rechterzijde van de rivier. Figuur 9.11 geeft de dwarsstroomsnelheid voor MP3 LDv12 (overal 40 m versmalling) en LDv16 (versmalling Midden-Waal gereduceerd). Ter vergelijking toont Figuur 9.12 de dwarsstroming in de referentiesituatie.

De dwarsstroming bij MP3 is maximaal ca 25 cm/s, en is het grootste bij Q1020 door de versmalling en daaraan gerelateerde inlaatconstructie die de stroming richting het zomerbed drukt. Dit is iets meer dan in de referentiesituatie, waar de dwarsstroming vooral gerelateerd is aan kribben. De mate van versmalling (LDv12 vs LDv16) lijkt niet veel invloed te hebben op de grootte van de dwarsstroming.



Figuur 9.11 Inschatting dwarsstroming voor MP3 (initieel) (M-lijnen 17 en 23). De horizontale zwarte lijnen geven locaties van langsdammen aan. Stroming in dit figuur is van rechts naar links.



Figuur 9.12 Inschatting dwarsstroming in referentie (initieel) (M-lijnen 15 en 25). Stroming in dit figuur is van rechts naar links

HKV lijn in water BV

Locatie Lelystad
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Locatie Delft
Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

Locatie Amersfoort
Berkenweg 7
3818 LA Amersfoort

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl