

Slim suppleren Boven-Waal



Slim suppleren Boven-Waal

Auteur(s)

Anke Becker

Slim suppleren Boven-Waal

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer J. Sieben
Referenties	
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-12-2021
Projectnummer	11206792-014
Document ID	11206792-014-ZWS-0001
Pagina's	156
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anke Becker	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Anke Becker	Kees Sloff	Bianca Peters	

Samenvatting

Het Boven-Waal traject daalt sneller dan het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Boven-IJssel. Als gevolg daarvan verschuift de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop bij lagere rivierafvoeren langzaam naar de Waal. Voortzetting van deze trend kan in combinatie met klimaatsverandering in de toekomst impact op de zoetwaterbeschikbaarheid en scheepvaart in Nederland hebben.

In dit rapport wordt onderzocht hoe effectief een suppletie op de Boven-Waal is voor het stabiliseren van de afvoerverdeling, wat de nevenbaten en neveneffecten ervan zullen zijn en hoe deze middels slim ontwerp geoptimaliseerd kunnen worden. Het is een vooronderzoek, dus geen kosten-batenanalyse of ontwerp, maar een advies over de ontwerprichting en effectiviteit aan de hand van een aantal scenario's. Voor dit onderzoek zijn verschillende opties (geometrie, plaatsing, samenstelling) voor een suppletie in de Boven-Waal doorgerekend in het morfologische "DVR-model" van de Rijntakken en beoordeeld op hun invloed op de morfologische ontwikkeling, de afvoerverdeling en op de rivierfuncties hoogwaterveiligheid, scheepvaart en natuur. Op basis daarvan worden aanbevelingen gemaakt voor de ontwerpknoppen ligging, geometrie en samenstelling van een suppletie op de Boven-Waal.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Doel en afbakening	10
1.3	Leeswijzer	10
2	Numerieke modellering van de suppletie	11
2.1	Uitgangspunt	11
2.2	Aanpassingen in het DVR-model	11
2.2.1	Zomerbedbodem	11
2.2.2	Bodemligging bij Erlecom	11
2.2.3	Randvoorwaarden	11
2.2.4	Actieve laagdikte	12
2.2.5	Bagger- en stortpolygonen	12
2.2.6	Uitbreiding met domeinen wl2b en wl2c	14
2.3	Inspelen van het model	14
2.4	Varianten van de suppletie	14
3	Effect van de suppletie	17
3.1	Effect van de suppletie op de morfologische ontwikkeling	17
3.1.1	Morfologische ontwikkeling op korte en lange termijn	17
3.1.1.1	Morfologische ontwikkeling in de referentieberekening zonder suppletie	17
3.1.1.2	Morfologische ontwikkeling voor de suppletievariant 1	17
3.1.1.3	Variant 2: profielvolgend	22
3.1.1.4	Variant 3: suppletie als vaste laag	23
3.1.1.5	Variant 4: grovere suppletie	23
3.1.1.6	Variant 5: grovere suppletie als semi-vaste laag	23
3.1.1.7	Variant 6: suppletie bocht bij Haalderen	24
3.1.1.8	Discussie van de resultaten	24
3.1.2	Toevoegen van sediment aan het benedenstroomse systeem	24
3.1.3	Vergelijking met reeds aangelegde suppleties Boven-Rijn	26
3.1.4	Invloed van modelkeuzes	27
3.1.4.1	Afvoerverdeling in het DVR-model	27
3.1.4.2	Invloed van de randvoorwaarden	28
3.2	Effect van de suppletie op de afvoerverdeling bij laagwater	29
3.2.1	Effect op de afvoerverdeling bij laagwater	29
3.2.2	Resultaten van andere studies	32
3.3	Effect van de suppletie op de rivierfuncties	32
3.3.1	Hoogwaterveiligheid	32
3.3.2	Scheepvaart	33
3.3.2.1	Baggerlast	33
3.3.2.2	Vaardiepte bij laagwater	36
3.3.2.3	Verandering in dwarsstroming	39

3.3.2.4	Hinder voor de scheepvaart tijdens de uitvoering en na aanleg	40
3.3.3	Inundatiefrequentie uiterwaarden en instroom van nevengeulen	43
4	Conclusies en aanbevelingen	44
5	Literatuur	47
A	Details over de modelschematisatie	48
A.1	Bodemligging bij de vaste laag Erlecom	48
A.2	Randvoorwaarden benedenranden	52
A.3	Invloed van de actieve laagdikte op de sedimentsamenstelling	53
A.3.1	Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,06$	53
A.3.1.1.	D10	53
A.3.1.2.	D50	55
A.3.1.3.	D90	57
A.3.2	Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,12$	59
A.3.2.1.	D10	59
A.3.2.2.	D50	61
A.3.2.3.	D90	63
A.3.3	Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,25$	65
A.3.3.1.	D10	65
A.3.3.2.	D50	67
A.3.3.3.	D90	69
A.3.4	Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,12$ en aangepaste bodemligging bij bodemkribben Erlecom	71
A.3.4.1.	D10	71
A.3.4.2.	D50	73
A.3.4.3.	D90	75
B	Schematisatie van de suppletievarianten	78
B.1	Ligging, geometrie en volume van de suppletievarianten	78
B.2	Samenstelling van de suppletievarianten	78
B.3	Mobiliteit van het bodemmateriaal	80
B.4	Varianten met minder mobiel sediment	86
B.4.1	Variant 3: vaste laag	86
B.4.2	Variant 5: Semi-vaste lagen module	86
C	Resultaten: morfologische ontwikkeling	87
C.1	Ontwikkeling van de absolute bodemligging (langsprofielen)	87
C.1.1	Referentie	87
C.1.2	Variant 1	88
C.1.3	Variant 2	89
C.1.4	Variant 3	90
C.1.5	Variant 4	91
C.1.6	Variant 5	92
C.1.7	Variant 6	93
C.2	Ontwikkeling van de relatieve bodemligging t.o.v. de referentie (langsprofielen)	93
C.2.1	Variant 1	94
C.2.2	Variant 2	95

C.2.3	Variant 3	96
C.2.4	Variant 4	97
C.2.5	Variant 5	98
C.2.6	Variant 6	99
C.3	Vergelijking tussen de varianten (langsprofielen)	99
C.3.1	Variant 2 en variant 1: geometrie	100
C.3.2	Variant 3 en variant 1: vaste laag	101
C.3.3	Variant 4 en variant 1: grover materiaal	102
C.3.4	Variant 5 en variant 4: semi-vaste lagen module	103
C.3.5	Variant 6 en variant 1	104
C.3.6	Variant 6 en variant 2	105
C.3.7	Referentie zonder en met semi-vaste lagen module	106
C.3.7.1.	Absolute bodemligging	106
C.3.7.2.	Relatieve bodemligging	107
C.4	Ontwikkeling van de relatieve bodemligging t.o.v. de referentie (2D-kaarten)	108
C.4.1	Variant 1	108
C.4.2	Variant 2	109
C.4.3	Variant 6	110
D	Animaties morfologische ontwikkeling	111
E	Effect op de afvoerverdeling	112
E.1	Waal-afvoer relatief t.o.v. de afvoer bij Lobith	112
E.2	Verschil in Waal-afvoer tussen variant en referentie: verloop in de tijd voor lage afvoeren	113
E.2.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	113
E.2.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	113
E.2.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	113
E.2.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	114
E.2.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	114
E.2.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	114
E.2.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	114
E.2.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	115
E.2.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	115
E.3	Verschil in Waal-afvoer tussen variant en referentie: voor alle afvoerniveaus en verschillende momenten in de berekening	116
F	Invloed op waterstanden	117
F.1	Waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 1 direct na aanleg	117
F.1.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	117
F.1.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	117
F.1.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	117
F.1.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	118
F.1.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	118
F.1.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	118
F.1.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	118
F.1.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	119
F.1.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	119
G	Invloed op stroomsnelheden	120

G.1	Absolute stroomsnelheid in langsricting direct na aanleg	120
G.1.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	120
G.1.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	121
G.1.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	122
G.1.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	123
G.1.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	124
G.1.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	125
G.1.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	126
G.1.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	127
G.1.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	128
G.2	Absolute stroomsnelheid in dwarsricting direct na aanleg	129
G.2.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	129
G.2.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	130
G.2.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	131
G.2.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	132
G.2.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	133
G.2.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	134
G.2.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	135
G.2.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	136
G.2.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	137
G.3	Vershil in stroomsnelheid in langsricting direct na aanleg	138
G.3.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	138
G.3.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	139
G.3.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	140
G.3.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	141
G.3.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	142
G.3.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	143
G.3.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	144
G.3.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	145
G.3.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	146
G.4	Vershil in stroomsnelheid in dwarsricting direct na aanleg	147
G.4.1	$Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$	147
G.4.2	$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$	148
G.4.3	$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$	149
G.4.4	$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$	150
G.4.5	$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$	151
G.4.6	$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$	152
G.4.7	$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$	153
G.4.8	$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$	154
G.4.9	$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$	155

1 Inleiding

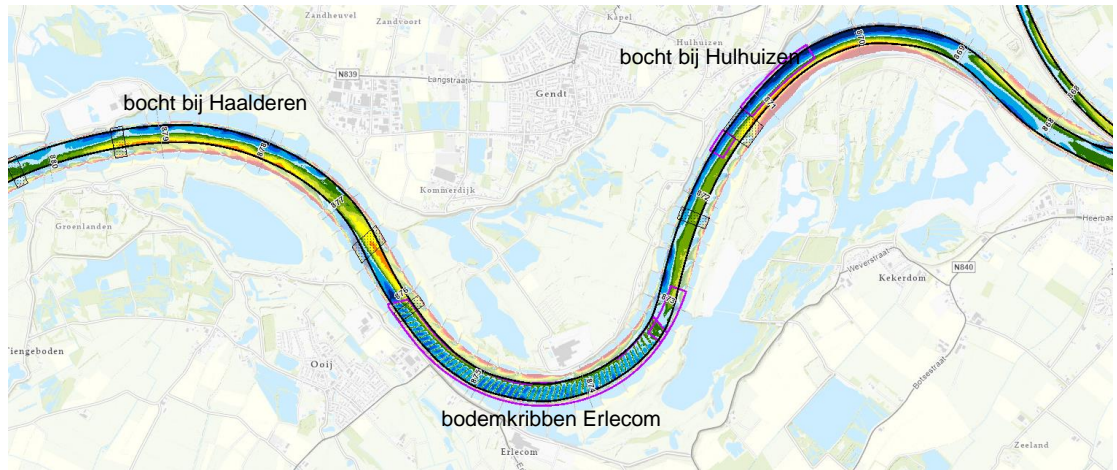
1.1 Achtergrond

Het Boven-Waal traject (Figuur 1) daalt sneller dan het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Boven-IJssel. Als gevolg daarvan verschuift de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop bij lagere rivierafvoeren langzaam naar de Waal. Voortzetting van deze trend kan in combinatie met klimaatsverandering in de toekomst impact op de zoetwaterbeschikbaarheid en scheepvaart in Nederland hebben.

De afvoerverdeling wordt vooral bepaald door de ontwikkeling van waterstanden in de afstromende takken van de riviersplitsing. Een afname van de waterstand in één van de takken leidt tot toename van afvoer naar die tak (zodanig dat de waterstand weer overeenstemt met de waterstand in de andere tak). In de Boven-Waal komt deze (relatieve) waterstandsval voort uit de sterke bodemerrosie, wat er dus toe leidt dat meer water naar de Waal gaat stromen.

Suppletie in de Boven-Waal kan een maatregel zijn om dit te voorkomen. In dit onderzoek worden verschillende opties (geometrie, plaatsing, samenstelling) voor een suppletie in de Boven-Waal onderzocht. De onderzochte varianten zijn suppleties over relatief korte trajecten (orde 2 km) waar overdiepte beschikbaar is. Waterstanden bij de riviersplitsing worden door stuwkrommes over het algemeen beïnvloed door profielveranderingen die optreden over een traject van orde 10 tot 20 km. Stabiliseren van de bodemligging door suppletie op een langer traject zou nog meer effect op de afvoerverdeling hebben. Voor het stabiliseren van de afvoerverdeling met maatregelen over kortere afstanden is het belangrijk dat deze niet leiden tot versterking van erosie of extra sedimentatie op andere delen van het hele traject. Ook mogen ze niet leiden tot een te grote afname van de waterstand bij lage afvoer (OLA), om te voorkomen dat de vaardiepte in gevaar komt.

Het hoofddoel van de suppletie is het beïnvloeden van de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop door meer water richting het Pannerdensch kanaal en dus de IJssel te sturen. Daarnaast voegt de suppletie sediment toe aan het systeem en vermindert daardoor erosie benedenstrooms op de Waal. Bij plaatsing in de buitenbocht bij Hulhuizen of Haalderen kan de suppletie bovendien een positief effect hebben op de ondiepte in de binnenbocht naast de suppletie. Er moet echter wel rekening mee worden gehouden dat de suppletie een langzaam stroomafwaarts migrerende sedimentatiegolf opwekt, die op benedenstroomse trajecten kan leiden tot tijdelijke verondieping (bijvoorbeeld op de MGD-locatie tussen rkm 876-877).



Figuur 1 Interessegebied in de Boven-Waal. Het zwarte polygoon toont de vaargeul, de paarse polygoonen zijn niet-stortlocaties, en de met stippels gevulde polygoonen zijn niet-baggerlocaties. Bron: Waterdieptekaarten Rijntakken (RWS-ON).

1.2 Doel en afbakening

Met dit onderzoek moet de vraag worden beantwoord hoe effectief een suppletie op de Boven-Waal is voor het beïnvloeden van de afvoerverdeling, wat de nevenbaten en neveneffecten ervan zullen zijn en hoe deze middels slim ontwerp geoptimaliseerd kunnen worden. Het is een vooronderzoek, dus geen kosten-batenanalyse of ontwerp, maar een advies over de ontwerprichting en effectiviteit aan de hand van een aantal scenario's.

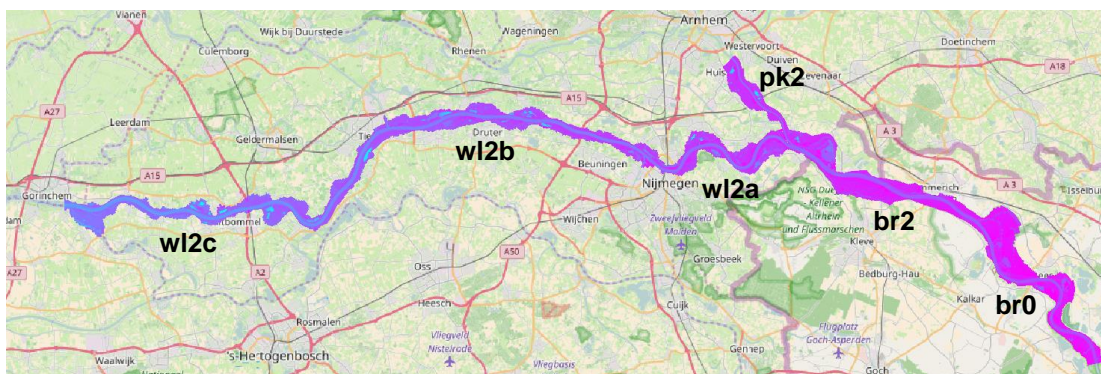
1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de opzet van het numerieke model dat voor deze analyse is gebruikt en laat zien hoe de onderzochte suppletievarianten erin geschematiseerd zijn. Hoofdstuk 3 analyseert de invloed van de suppletie op de morfologische ontwikkeling, de afvoerverdeling bij laagwater en de rivierfuncties. Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 4.

2 Numerieke modellering van de suppletie

2.1 Uitgangspunt

Voor deze studie is een morfologisch model van een stuk Niederrhein (vanaf Xanthen), de Waal en het Pannerdensch Kanaal gebruikt (Figuur 2). Uitgangspunt is het DVR-model delft3d_4-rijn-2017-v1 gebaseerd op Baseline-rijn-j16_5-v1, dat in 2017 is gebouwd voor een studie over de suppletiepijot op de Boven-Rijn (Niesten et al., 2017). Dat model dekt de Niederrhein, Boven-Rijn, het Pannerdensch Kanaal en de Waal tot achter Nijmegen (domein wl2a).



Figuur 2 Modelgebied.

2.2 Aanpassingen in het DVR-model

2.2.1 Zomerbedbodern

In de Boven-Rijn, het Pannerdensch Kanaal en Waal-domein wl2a is de zomerbedbodern vervangen door multibeam peilingen uit 2020, ontvangen van RWS-ON¹.

2.2.2 Bodemligging bij Erlecom

In de eerste modelberekeningen voor het inspelen van de bodemligging (paragraaf 2.3) viel op dat de bodern in de binnenbocht naast de vaste laag bij Erlecom vrij snel erodeert, duidelijk sneller dan de erosietrend van orde 30-40 cm in 5 jaar die volgens onderzoek van Sloff (2019) en van White en Blom (2020) te verwachten is. Om de erosietrend in het model af te remmen is de bodemligging van de vaste laag in het model aangepast. Dit is in detail beschreven in Bijlage A.1.

2.2.3 Randvoorwaarden

Op de bovenrand van het model bij Xanthen/Niederrhein (domein br0) is net als in het DVR-model een afvoer opgelegd. Dit is een synthetische afvoerhydrograaf, die bestaat uit een serie van constante afvoeren en gebaseerd is op de gemiddelde jaarlijkse afvoerhydrograaf van de Rijn (Ottevanger et al., 2015).

¹ 2020 - 02 JP Boven-Rijn Waal XYZ ascii grid data.xyz, 2020 - 02 JP Pan Kanaal Neder-Rijn Lek XYZ ascii grid data.xyz

Op de benedenranden (IJsselkop en rkm 953/Gorinchem, deeldomeinen pk2 en w12c) werden in het oorspronkelijke DVR-model waterstanden opgelegd. In deze studie is dat niet mogelijk omdat de suppletie de afvoerverdeling beïnvloedt en de waterstand op de benedenrand bij gelijke Boven-Rijn-afvoer in de loop der tijd verandert. Daarom zijn er in eerste instantie Qh-relaties opgelegd. Omdat de berekende waterstanden en afvoeren op de benedenranden instabiel werden is uiteindelijk op de benedenrand van de Waal toch een waterstandsrand opgelegd. Om te voorkomen dat deze de resultaten in het interessegebied op de Boven-Waal beïnvloedt is het model tevens uitgebreid met deeldomeinen w12b en w12c (paragraaf 2.2.6).

De Qh-relatie voor de IJsselkop en de waterstandsrand voor rkm 953 op de Waal zijn afgeleid van berekeningen met het meest recente beschikbare SOBEK3-model van de Rijntakken: sobek-rijn-j19_5-v1 (Agtersloot et al., 2019). De afvoerverdeling over de splitsingspunten is in dit model afgeregeld op de afvoerverdeling in het bijbehorende WAQUA-model. De waterstanden bij de IJsselkop worden door het SOBEK3-model beter voorspeld dan door het WAQUA-model, dat in het bereik van middelgrote afvoeren de waterstanden met orde 30 cm overschat.

De waarden voor de afvoeren en waterstanden worden getoond in Bijlage A.2.

2.2.4 Actieve laagdikte

De actieve laagdikte is, net als in de berekeningen voor de suppletiepijlot Boven-Rijn (Niessen et al., 2017), gekoppeld aan de waterdiepte volgens

$$D_{act} = \alpha H$$

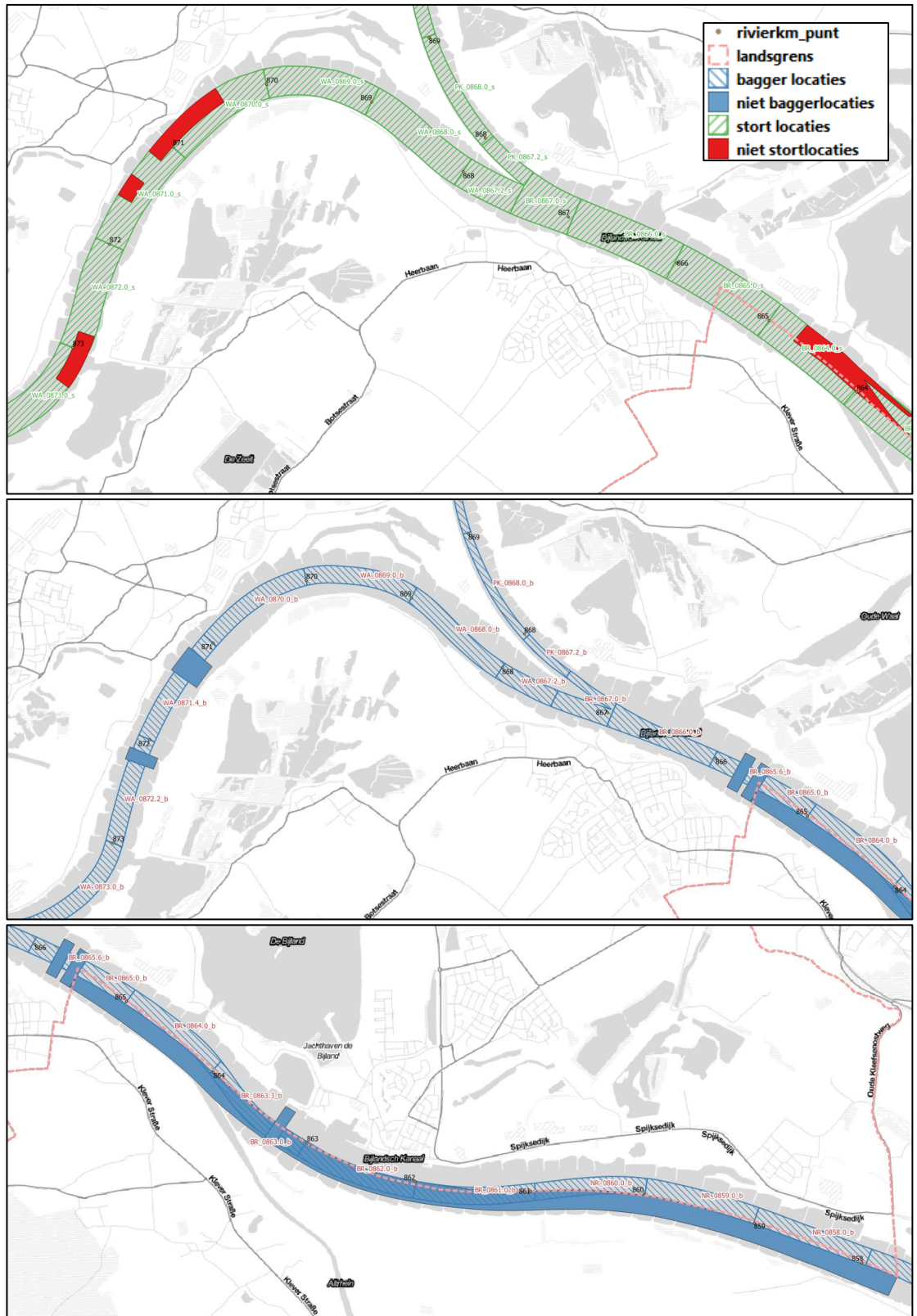
Als minimale actieve laagdikte is 0,5 m aangehouden, omdat dat in eerdere projecten realistische resultaten voor de Waal en Boven-Rijn oplevert (Niessen et al., 2017).

Er is voor verschillende waarden van α (0,06, 0,12 en 0,25) gekeken hoe de sedimentsamenstelling tijdens het inspelen van samenstelling en bodemligging (paragraaf 2.3) verandert. Met alle waarden van α ontwikkelt het model de geobserveerde gradiënten in korrelgroottes bij het splitsingspunt en in de Waalbochten (zie Bijlage A.3²). Bij een kleinere α ontwikkelen de gradiënten sneller. Wanneer sprake is van een ruimtelijk of temporele gradiënt in stromingscondities en sedimenttransportcapaciteit, zal in principe zowel een verandering in bodemligging als een verandering in bodemsamenstelling optreden. Door de gelijktijdige aanpassing van samenstelling en bodemligging worden de gradiënten geneutraliseerd met een bepaalde snelheid afhankelijk van menging en transport. Als de actieve laag erg dun wordt gekozen, dan is aanpassing van samenstelling dominant, en zal de bodem weinig verandering laten zien. Als de laagdikte erg dik is dan gebeurt het omgekeerde. Voor de Rijntakken zijn er onvoldoende (tijdsafhankelijke) bodemsamenstelling gegevens om vast te stellen welke tijdschalen er gelden. De keuze wordt daarom vooral bepaald door de overeenstemming van de ingespeelde samenstelling te vergelijken met de ruimtelijke verdeling van korreldiameters die zijn bepaald op basis van monsternamen in november 2019. De waarde van 0,12 geeft goede resultaten en wordt daarom aangehouden.

2.2.5 Bagger- en stortpolygonen

De bagger- en stortpolygonen in het DVR-model zijn aangepast om rekening te houden met bekende niet-bagger- en niet-stort-locaties (Figuur 3). Het Duitse deel van de Boven-Rijn tussen rkm 857,7 en rkm 865,5 is in de beschikbare data aangegeven als een niet-baggerlocatie (zie Figuur 3, onderin). We gaan er echter van uit dat dit alleen aangeeft dat RWS er niet baggert, omdat het op Duits grondgebied ligt. Dit stuk is daarom niet uit de baggerpolygonen van het DVR-model verwijderd.

² De figuren in Bijlage A.3 tonen de samenstelling na afloop van de tweede inspeelstap, vgl. paragraaf 2.3.



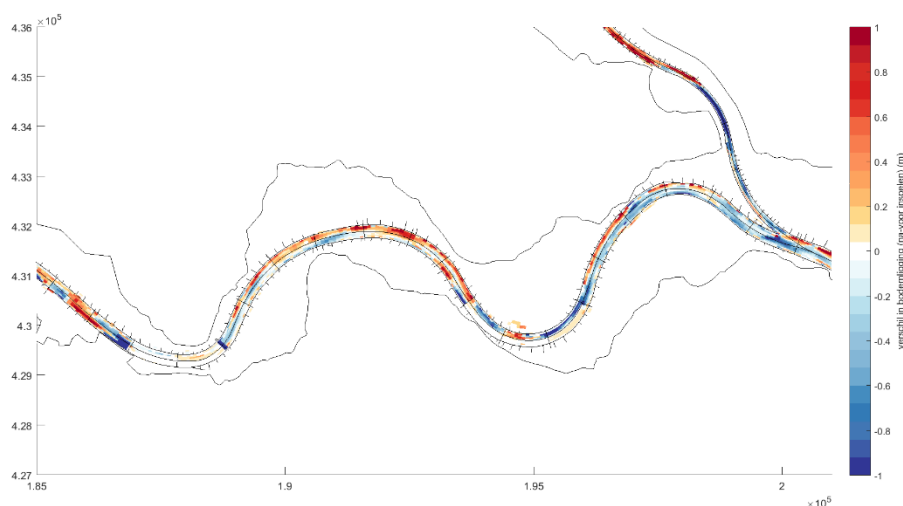
Figuur 3 Aangepaste bagger- en stortpolygonen die rekening houden met niet-bagger-/stortlocaties.

2.2.6 Uitbreiding met domeinen w12b en w12c

Voor een betere stabiliteit van de randvoorwaarden is het model uiteindelijk uitgebreid met de Waal-domeinen w12b en w12c. Deze zijn gebaseerd op delft3d_4_dvr-rijn-2014-v1 dat is gebruikt voor de pakket som Waal (Sloff et al., 2014). Deze later toegevoegde domeinen rekenden in de pakket som Waal nog met uniform sediment. Voor deze studie is er gegradeerd sediment toegepast, waarbij de korrelsamenstelling (voor het inspelen, zie paragraaf 2.3) gelijk gezet is aan de samenstelling op de benedenrand van domein w12a. De zomerbedbodem (voor het inspelen) is in deze domeinen niet vervangen door de multibeampeilingen uit 2020.

2.3 Inspelen van het model

Om een sterke initiële reactie van het model te voorkomen, wordt er niet gerekend met de exacte bodemligging zoals die gemeten is, maar met een ingespeelde bodem. De eerste inspeelstep betreft de sedimentsamenstelling. De initiële modelinvoer bevat een uniforme verdeling van sedimentfracties. De korrelgrootteverdeling is ingespeeld over een periode van vijf jaar zonder morfologische veranderingen. De tweede inspeelstep is het morfologisch inspelen met de ingespeelde korrelgrootteverdeling als invoer. Het model wordt morfologisch ingespeeld over een periode van vijf jaar. De resulterende bodem en samenstelling worden gebruikt als invoer voor alle volgende sommen. De resulterende bodem verschilt op sommige locaties vrij sterk van de initiële bodem uit de peilingen (Figuur 4).



Figuur 4 Verschil tussen de berekende bodemligging na 5 jaar inspelen en de bodemligging uit de peilingen.

2.4 Varianten van de suppletie

De volgende varianten van de suppletie zijn doorgerekend:

- variant 1) buitenbocht Hulhuizen – opgevuld tot OLR-3,5 m, samenstelling zoals natuurlijk sediment (zie Bijlage B.2)
- variant 2) buitenbocht Hulhuizen – profielvolgend, dikte 1 m (tot max. OLR-4,5 m), samenstelling zoals natuurlijk sediment
- variant 3) als 1), maar dan als niet erodeerbare (vaste) laag
- variant 4) als 1), maar dan met grover materiaal (zie Bijlage B.4.2)
- variant 5) als 4), maar dan met gebruik van het nieuwe semi-vaste lagen module in Delft3D
- variant 6) opvullen van de erosiekuil benedenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom in combinatie met een profielvolgende suppletie van 1 m dikte in de buitenbocht bij Haalderen

Varianten 1 en 2 bevatten een vergelijkbare hoeveelheid materiaal. Op die manier kan onderzocht worden wat de invloed van de geometrie op het effect van de suppletie is. Beide suppleties beginnen benedenstreams op dezelfde rivierkilometer. Variant 1 loopt minder ver door naar bovenstreams dan variant 2 (Figuur 5). De dikte aan de bovenstreamse kant is vrij groot en er ontstaat een abrupte overgang in de bodemligging, omdat er bovenstreams van deze suppletievariant ook nog vrij veel ruimte onder OLR-3,5 m beschikbaar is.

Met varianten 3 t/m 5 wordt de invloed van de samenstelling van het suppletiemateriaal onderzocht, waarbij variant 3 (schematisatie als vaste laag) een bovengrens aangeeft door de volledig immobiele suppletie. De vaste laag wordt in Delft3D via een speciaal algoritme berekend, waarbij deze is geschematiseerd door roostercellen zonder initiële sedimentdikte. In variant 5 wordt onderzocht hoe de suppletie zich in het model gedraagt als het nieuwe semi-vaste lagen module wordt gebruikt (Chavarrias et al., 2020, en Chavarrias & Ottevanger, 2021). Deze module zou beter rekening moeten houden met de aanwezigheid van immobiel sediment doordat er een tussen actieve laag en onderlagen een tussenlaag wordt toegevoegd waarin de hoeveelheid immobiel sediment uit de actieve laag wordt bijgehouden (in plaats van menging met de onderlaag). Er moet nog worden onderzocht hoe goed dat voor praktijktoepassingen werkt. De simulatie van variant 5 in dit onderzoek is daarvoor een eerste stap.

Naast de modelvarianten met suppleties zijn er 2 referentiesituaties doorgerekend, één met standaardinstellingen van het DVR-model en één met het semi-vaste lagen module. Die laatste wordt als referentie voor variant 5 gebruikt, de eerste als referentie voor alle overige varianten.

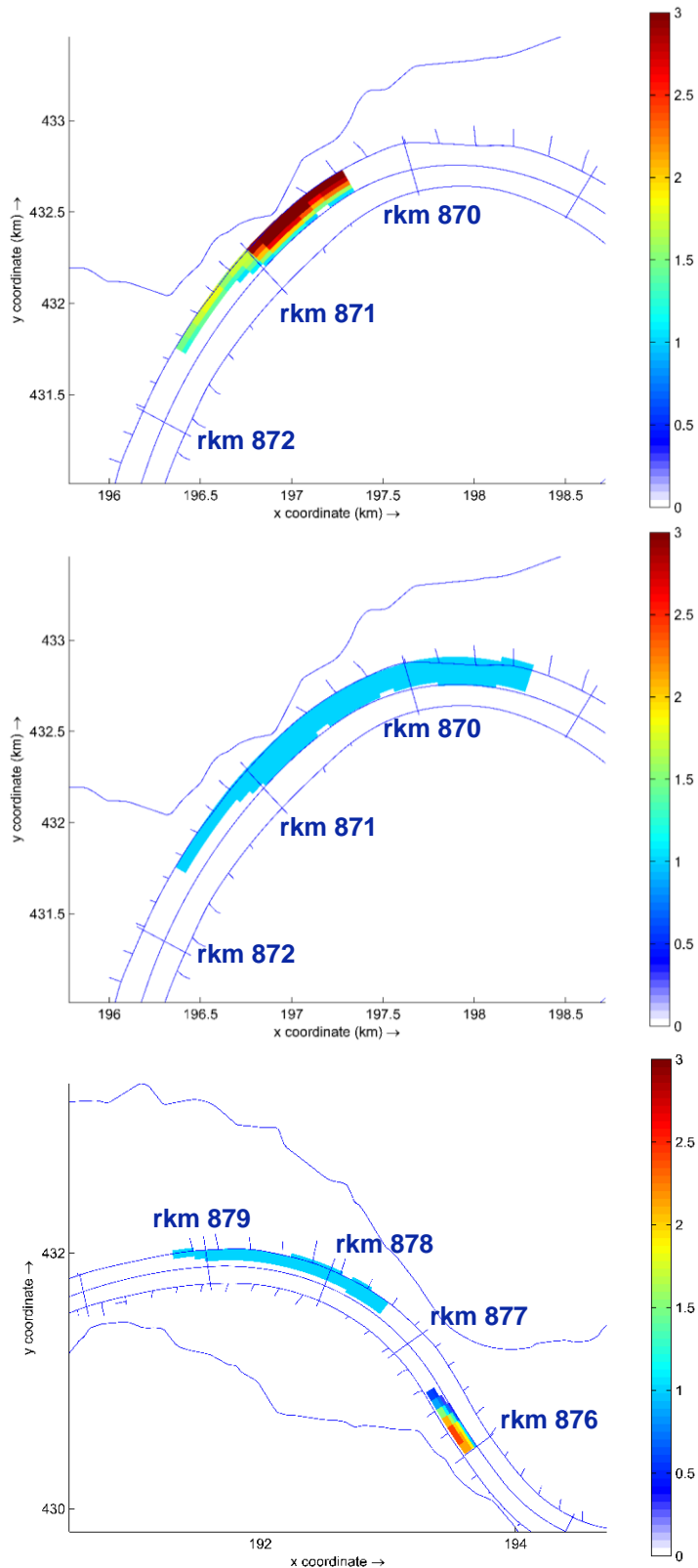
Alle varianten zijn doorgerekend met en zonder vaargeulonderhoud om de invloed van de suppleties op de baggerinspanning te kunnen beoordelen. Echter zijn de berekeningen met vaargeulonderhoud voor een aantal varianten niet doorgelopen vanwege een probleem dat in dit project niet opgelost kon worden (zie paragraaf 3.3.2.1).

Tabel 1 Overzicht van de eigenschappen van de suppletievarianten.

variant	ligging	volume (m ³)	samenstelling	geometrie	bijzonderheden
1	buitenbocht Hulhuizen	214.449	zoals sediment in buitenbocht bij Hulhuizen (Bijlage B.2)	opgevuld tot OLR-3.5 m	-
2	buitenbocht Hulhuizen	222.930	zoals sediment in buitenbocht bij Hulhuizen (zie Bijlage B.2)	profielvolgend dikte 1 m	-
3	buitenbocht Hulhuizen	214.449	geen samenstelling (want geschematiseerd als vaste laag)	opgevuld tot OLR-3.5 m	suppletie als vaste laag
4	buitenbocht Hulhuizen	214.449	grover dan 1 t/m 3 (zie Bijlage B.2)	opgevuld tot OLR-3.5 m	-
5	buitenbocht Hulhuizen	214.449	grover dan 1 t/m 3 (zie Bijlage B.2)	opgevuld tot OLR-3.5 m	met semi-vaste lagen module
6	buitenbocht Haalderen + erosiekuil Erlecom	171.623	zoals sediment in buitenbocht bij Hulhuizen ³ (zie Bijlage B.2)	buitenbocht Haalderen: profielvolgend dikte 1 m; erosiekuil: opgevuld tot hoogte bodemkribben	-

³ De sedimentsamenstelling in het model is vergelijkbaar in beide bochten.

Figuur 5 toont de ligging en de dikte van de verschillende varianten. Bijlage B beschrijft de schematisatie van de varianten in detail. Tabel 1 geeft een overzicht van de eigenschappen.



Figuur 5 Dikte van verschillende varianten van de suppletie. Boven: varianten 1, 3, 4 en 5. Midden: variant 2. Onder: Variant 6.

3 Effect van de suppletie

3.1 Effect van de suppletie op de morfologische ontwikkeling

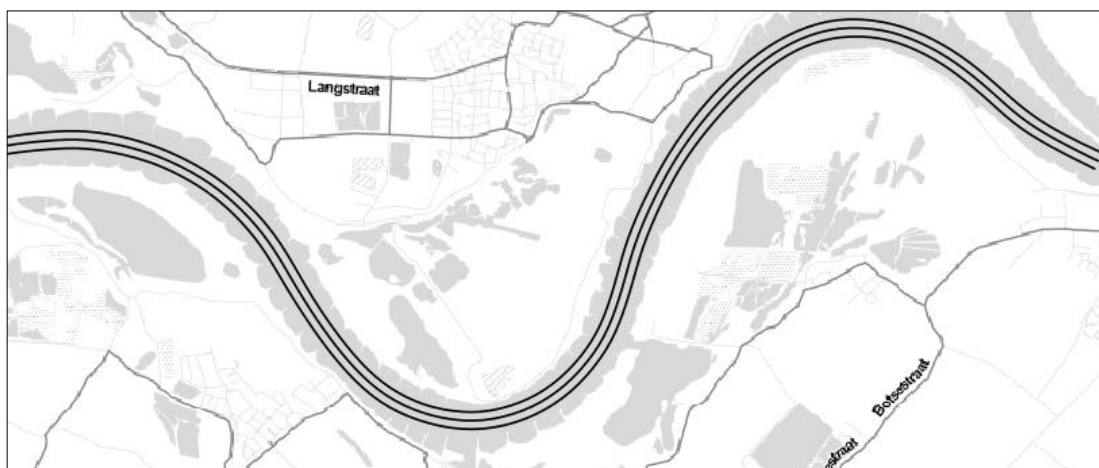
3.1.1 Morfologische ontwikkeling op korte en lange termijn

3.1.1.1 Morfologische ontwikkeling in de referentieberekening zonder suppletie

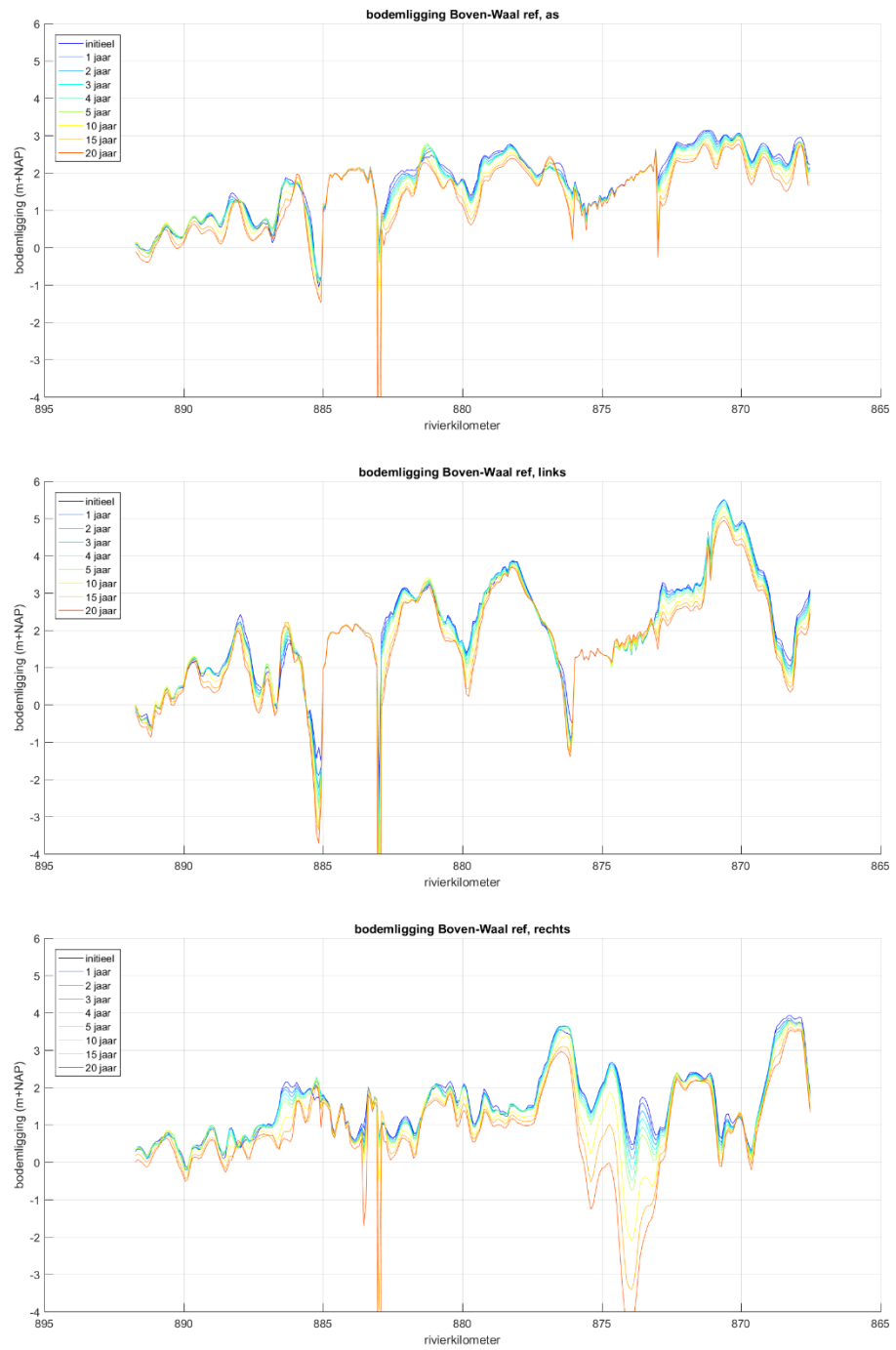
Figuur 7 laat de ontwikkeling van de bodemligging in de referentieberekening langs drie langspiegelen op de Boven-Waal zien: op de as van de rivier en ca. 70 m links en rechts van de as (Figuur 6). In de referentiesituatie zijn links van de as de vaste laag bij Nijmegen (rkm 883 tot 885) en de bodemkribben bij Erlecom (rkm 873 en 876) te zien. Beide zijn gemodelleerd als vaste lagen, de bodem beweegt niet. Benedenstrooms van de vaste lagen worden de ontgrondingskuilen steeds dieper. Op de overige trajecten is te zien dat de rivierbodembodem erodeert met orde 1,5 cm per jaar. De binnenbocht naast de bodemkribben bij Erlecom schuurt bijzonder snel uit (rechts van de as tussen rkm 873 en 876, vgl. paragraaf 2.2.2). Bovenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen ontstaat er over de hele breedte van de rivier een diepe erosiekuil met een lengte van 1 roostercel, maar de oorzaak hiervan is onbekend. Er wordt aanbevolen om uit te zoeken hoe dit komt.

3.1.1.2 Morfologische ontwikkeling voor de suppletievariant 1

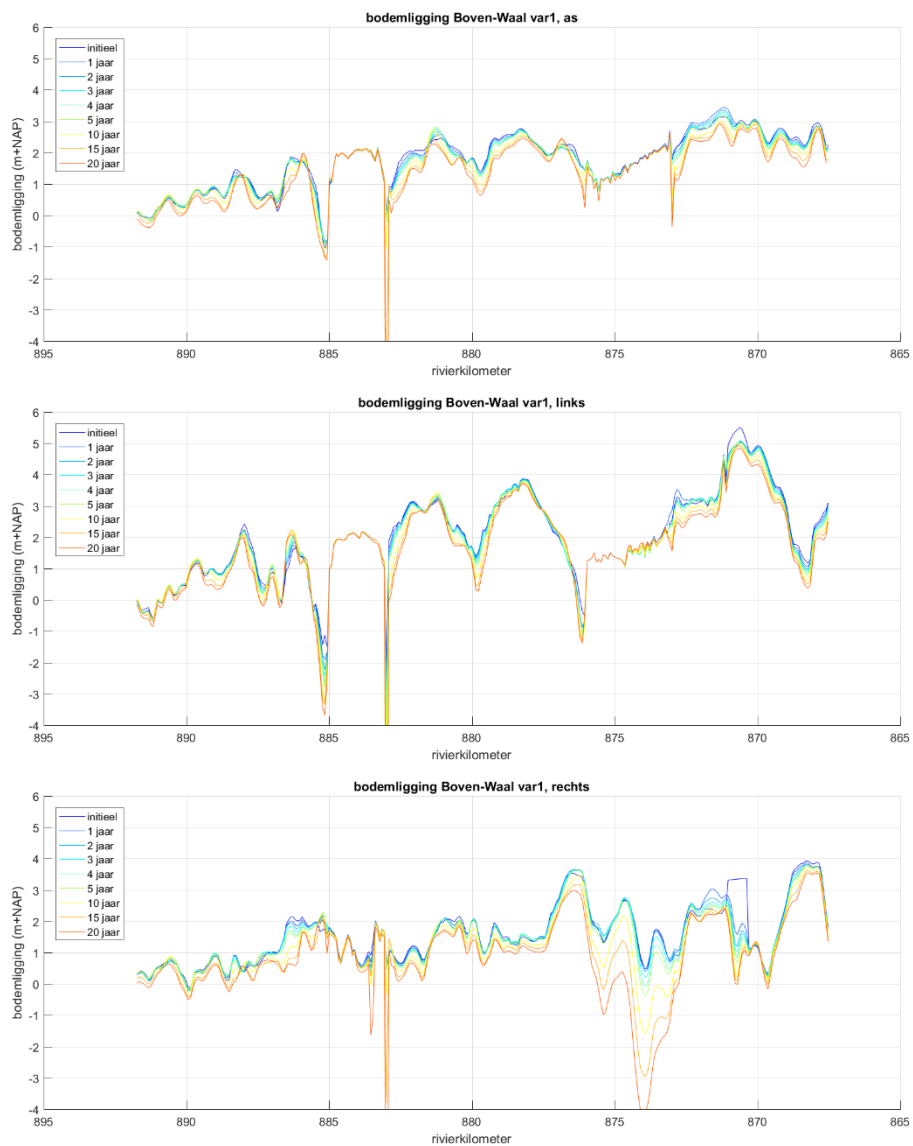
Figuur 8 toont de ontwikkeling van de bodemligging in de berekening met suppletievariant 1. Rechts van de as tussen rkm 870,5 en 871,5 is duidelijk de suppletie te zien. Om te analyseren hoe de suppletie de morfologische ontwikkeling op de Boven-Waal beïnvloedt, is de bodemligging relatief ten opzichte van de bodemligging in de referentiesituatie geanalyseerd. Figuur 9 laat de relatieve ontwikkeling op een kaart zien, Figuur 10 toont de langspiegelen. De figuren voor alle varianten staan in Bijlage C. Daarnaast zijn er animaties gemaakt (Bijlage D).



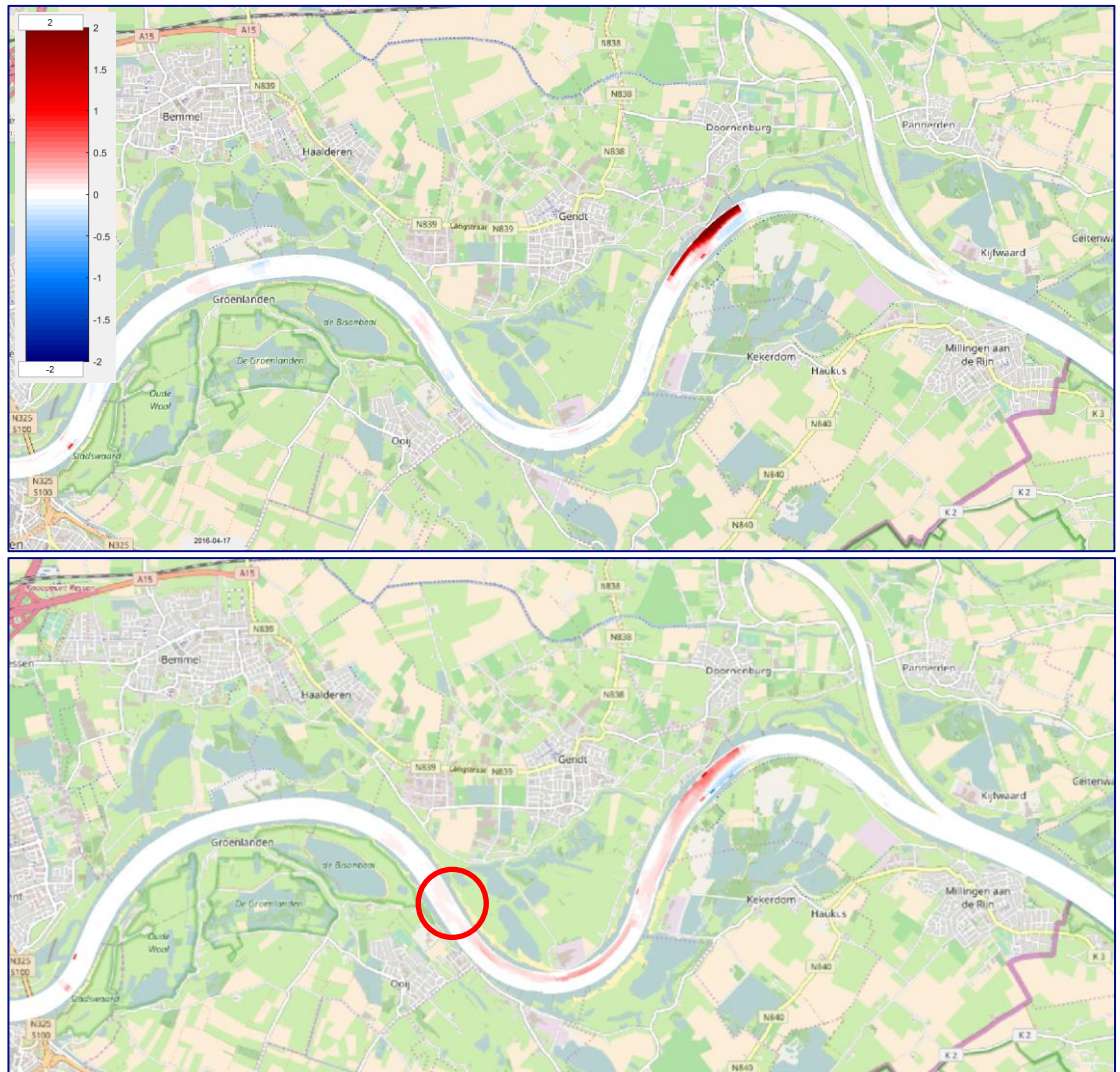
Figuur 6 Langspiegelen op de rivieras en ca. 70 m links en rechts van de as.



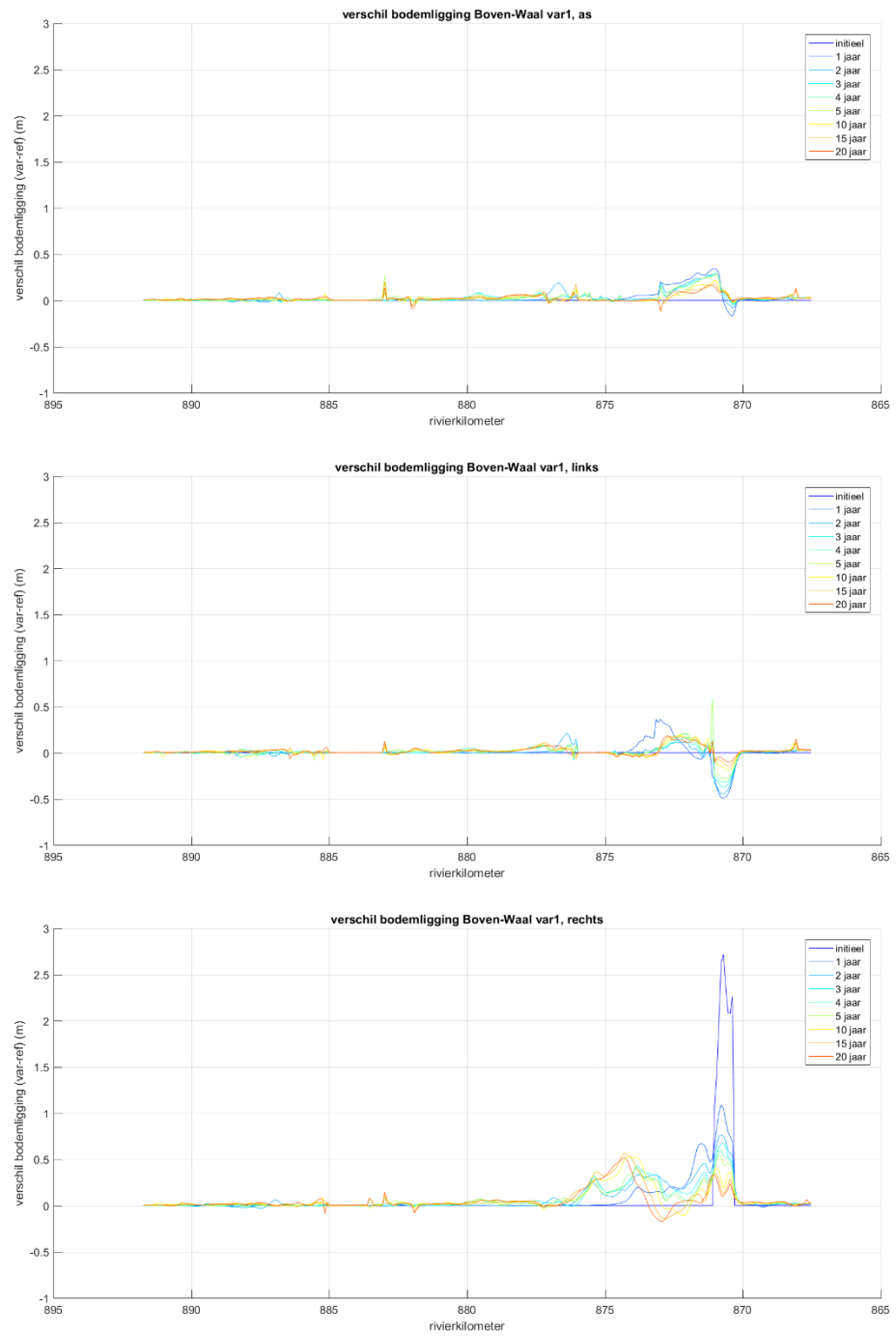
Figuur 7 Ontwikkeling van de absolute bodempligging langs de rivieras en links en rechts van de as in de referentieberekening zonder suppletie.



Figuur 8 Ontwikkeling van de absolute bodemligging langs de rivieras en links en rechts van de as in de berekening van suppletievariant 1.



Figuur 9 Ontwikkeling van de bodemligging met suppletievariant 1 relatief tot de referentie (m) (variant-ref). Boven: Na het eerste afvoerniveau ($Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$), onder: na 5 jaar. Rode cirkel: bekende MGD-locatie in de bochtovergang tussen Erlecom en Haalderen.



Figuur 10 Ontwikkeling van de relatieve bodemligging in de berekening van suppletievariant 1 t.o.v. de referentieberekening.

2D-patroon

Door de relatief dikke stortlaag die alleen aan de rechter zijde is geplaatst, ontstaat er een tweedimensionale (2D) morfologische reactie, die zich het best laat vergelijken met een geforceerd patroon dat een vergelijking oproept met alternerend banken. Het alternerende sedimentatie- en erosiepatroon ontstaat door een herverdeling van afvoer en sedimenttransport in het dwarsprofiel omdat slechts in de rechterhelft het dwarsprofiel door de suppletie is verkleind. Ten opzichte van de referentiesituatie wordt allereerst de bodem naast de suppletie verlaagd, omdat de snelheden in de binnenbocht links iets hoger worden terwijl het aanbod van sediment gelijk blijft. Dit effect is vergelijkbaar met het effect van een vaste laag, alleen dan tijdelijk: naarmate de suppletie in de loop der tijd uitdempt komt de bodem weer omhoog richting de toestand voor suppletie. Het patroon zet zich alternerend voort in stroomafwaartse richting in een gedempte vorm. Benedenstrooms van de suppletie wordt de bodem aan de kant van de suppletie lager en wordt aan de overzijde hoger. Naarmate we verder benedenstrooms kijken wordt de golf verder uitgedempt en is deze niet meer waarneembaar. Opgemerkt moet worden dat dit patroon niet wordt veroorzaakt door zand en grindkorrels die de rivier 'oversteken', maar dat het een golfpatroon voorstelt dat wordt opgewekt door een herverdeling van stroming links en rechts in de rivier ten opzichte van de oorspronkelijke verdeling. Waar snelheden iets toenemen ontstaat erosie en waar ze afnemen ontstaat sedimentatie.

Voortplantingssnelheid alternerend patroon

Dit alternerende patroon breidt zich stroomafwaarts uit met een snelheid van ongeveer 3 km per jaar en dempt daarbij langzaam uit. Daarbij moet worden opgemerkt dat de 2D invloed een andere tijdschaal heeft dan een breedtegemiddelde zandgolf (orde 1 km/jaar), en van de samenstelling. Het berekende gedrag in de Waal komt redelijk overeen met het morfologische gedrag dat na de suppletiepijl op de Boven-Rijn te zien was, waarbij toen op basis van bodempeilingen voor minder dan een jaar de voortplantingssnelheid geschat is op ongeveer 1 km/jaar (Becker, 2020).

Verplaatsingssnelheid suppletiefront

Uit de simulaties voor de Boven-Waal volgt dat het front van de suppletie zich verplaatst met orde 500 m in het eerste jaar. De peilingen van de suppletie op de Boven-Rijn lieten een verplaatsingssnelheid van enkele 100 m per jaar zien, dus een vergelijkbare orde grootte.

3.1.1.3

Variant 2: profielvolgend

Bij suppletievariant 1 gaat de bodemligging naast de suppletie, aan de linkerkant van de rivier, in het eerste jaar na aanleg tot 50 cm omlaag (Bijlage C.2.1). Bij de langere maar dunnere variant 2 is dat tot 20 cm maar dan over het langere traject (Bijlage C.2.2 en C.3.1). Direct benedenstrooms van de suppletie, aan de overkant van de rivier, gaat de bodem in het eerste jaar met ongeveer 50 cm (variant 1) respectievelijk 20 cm (variant 2) omhoog. Na een jaar bereikt het bankenpatroon de bodemkribben bij Erlecom. In beide varianten gaat de bodem naast de bodemkribben dan in de loop van 20 jaar tot ruim 50 cm omhoog t.o.v. de referentie. Dit effect loopt door tot achter de bodemkribben, waardoor de MGD-locatie⁴ bij rkm 876 (bochtovergang Erlecom-Haalteren) door de suppletie 5-10 cm hoger komt te liggen dan in de referentie (zie paragraaf 3.3.2 voor een analyse van de invloed op de bevaarbaarheid). In absolute zin zal door de suppletie de bodemligging minder sterk dalen dan in de referentie. De bodem kan zelfs met suppletie tijdelijk worden gestabiliseerd, maar omdat het de oorzaak van erosie niet wegneemt zal deze stabilisatie alleen met herhaalde suppleties langdurig mogelijk zijn.

⁴ MGD = minst gepeilde diepte

De morfologische ontwikkeling bij variant 2 vertoont dus een vergelijkbaar patroon als bij variant 1. Naast en direct benedenstrooms van de suppleties zijn de amplitudes van het geforceerde bankenpatroon bij de dikkere variant 1 groter dan bij de dunnere variant 2. Bij de bodemkribben bij Erlecom zijn ze ongeveer even groot. Het is te verwachten dat de amplitudes veroorzaakt door een dikkere en een dunnere suppletie dicht bij elkaar komen naarmate het geforceerde bankenpatroon richting benedenstrooms uitdempt. Het zou echter kunnen dat dit in het model al over een kortere afstand gebeurt, omdat het patroon naast de bodemkribben bij Erlecom niet volledig tot ontwikkeling kan komen omdat deze gemodelleerd zijn als vaste laag. In werkelijkheid kan de bodem tussen de kribben wel enigszins reageren op de suppletie en valt de verhoging van de bodem ernaast mogelijk groter uit dan met het model berekend. Het is dus mogelijk dat ook de MGD-locatie net benedenstrooms van de bodemkribben iets verder omhoog zou komen dan door het model voorspeld.

3.1.1.4 Variant 3: suppletie als vaste laag

Door variant 3, de suppletie die als vaste laag blijft liggen, ontstaat er hetzelfde patroon (Bijlage C.2.3 en C.3.2). Omdat deze suppletie echter niet erodeert en verplaatst schuurt de bodem naast de suppletie over de hele doorgerekende 20 jaar steeds verder uit. De verhoging van de bodem benedenstrooms van de suppletie aan de overkant wordt echter maar beperkt groter dan bij variant 1 (50 i.p.v. 40 cm). De reactie in de binnenbocht naast de vaste laag bij Erlecom blijft ongeveer even groot als in variant 1.

Variant 3 en de referentie zijn 2x zo lang doorgerekend dan de overige varianten (40 jaar). Daaruit wordt duidelijk dat de morfologische reactie naar een plaatsvast patroon ontwikkelt.

3.1.1.5 Variant 4: grovere suppletie

De morfologische ontwikkeling bij variant 4 met grover materiaal loopt naar een vergelijkbaar bankenpatroon toe als bij variant 1, alleen gaat dit langzamer, omdat de suppletie zich minder snel verplaatst (Bijlage C.2.4 en C.3.3).

3.1.1.6 Variant 5: grovere suppletie als semi-vaste laag

Bij gebruik van het semi-vaste lagen module blijft het algemene patroon in de bodemligging behouden. Ook de trends blijven op de meeste trajecten behouden, maar de ontwikkeling gebeurt met een andere snelheid (vergelijking ontwikkeling van de absolute bodemligging in de referentie met en zonder semi-vaste lagen module, Bijlage C.3.7). Bijvoorbeeld daalt de bodem naast de bodemkribben bij Erlecom minder snel als het semi-vaste lagen module gebruikt wordt. Er wordt aanbevolen om het morfologische gedrag met de semi-vaste lagen module nader te analyseren en het model zo nodig opnieuw af te regelen (instellingen van het semi-vaste lagen module en/of kalibratieparameters uit de sedimenttransportformule en voor het 2D-gedrag).

Vergeleken met een referentieberekening waarin ook het semi-vaste lagen module gebruikt wordt is de ontwikkeling van suppletievariant 5 heel erg vergelijkbaar met de ontwikkeling van variant 4 (Bijlage C.3.4). De module kan dus prima ingezet worden voor dit soort berekeningen. Er is in dit project niet bekeken of de resultaten een betere beschrijving van de werkelijkheid geven dan de traditionele aanpak. Dit wordt naar verwachting in 2022 gedaan in het kader van een ander project.

3.1.1.7 Variant 6: suppletie bocht bij Haalderen
De morfologische ontwikkeling bij, naast en direct benedenstrooms van de suppletie in de bocht bij Haalderen (variant 6, profielvolgend met dikte van 1 m in de buitenbocht bij Haalderen en opvullen van de erosiekuil benedenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom) is erg vergelijkbaar met die bij variant 2, alleen met iets kleinere amplitudes door het iets kleinere volume van de suppletie (Bijlage C.3.5 en C.3.6). Naast de vaste laag bij Nijmegen ontstaat er echter geen duidelijke verhoging van de bodem. Het opvullen van de kuil benedenstrooms van de bodemkribben is in het model na 5 jaar al weer nagenoeg verdwenen, maar deze snelheid wordt mogelijk overschat, net als de snelheid van het uitdempen van suppletievariant 1 (zie volgende alinea).

3.1.1.8 Discussie van de resultaten
Een samenvatting van de inzichten in de invloed van de verschillende draaiknoppen voor de suppletie op het morfologische gedrag wordt gegeven in hoofdstuk 4.

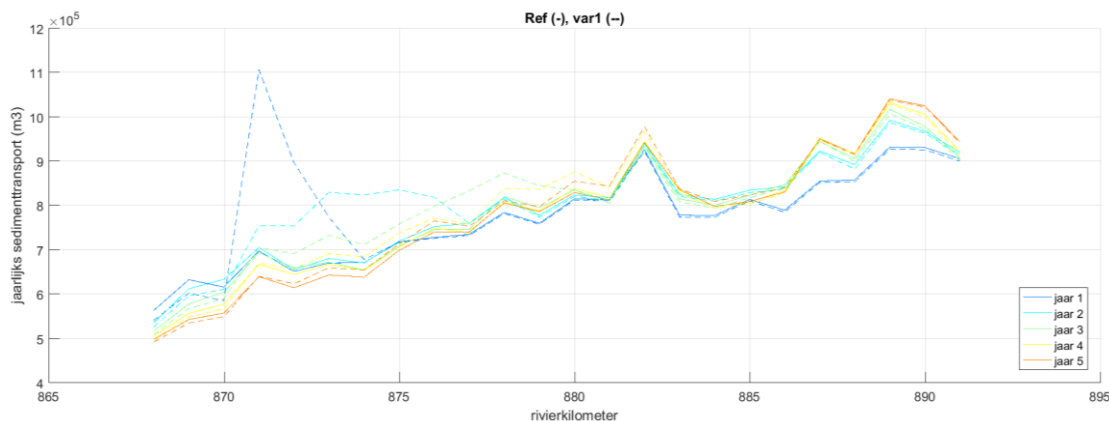
In de modelberekening dempt de suppletievariant 1 erg snel uit: na 1 jaar is de dikte al gereduceerd tot de helft. Het is niet met zekerheid te concluderen of dit in werkelijkheid ook zo snel zal gaan. Bij de pilot op de Boven-Rijn zijn veel kleinere erosiesnelheden geobserveerd (Becker, 2020), echter was dat ook met een veel dunnere suppletie laag (0,5-1,0 m tegenover de nu gemodelleerde 2-2,5 m). Uit waarnemingen in het verleden (Waalprogramma) is geconstateerd dat bij plaatselijke verdieping (baggeren) met verschillende niveaus de grootste verdiepingen het snelst weer herstellen. Naarmate de afwijking ten opzichte van een "normaal" profiel (of omringende profielen) groter is zal het herstel in eerste instantie sneller gaan. Dit geldt ook voor de erosie van de suppleties (het herstel naar oorspronkelijk bodem).

Op de Boven-Waal lijkt het erop dat het geforceerde bankenpatroon in het model wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de vaste lagen en de manier hoe deze geschematiseerd zijn. Er wordt aanbevolen om dit nader uit te zoeken en zo nodig voor de toekomst een betere manier van schematiseren te bedenken, bijvoorbeeld door ter plekke heel grof sediment toe te passen in combinatie met het semi-vaste lagen concept, in plaats van de sedimentbeschikbaarheid op 0 te zetten.

3.1.2 Toevoegen van sediment aan het benedenstroomse systeem

Figuur 11 laat zien dat het sedimenttransport ter plekke van de suppletie toeneemt door de plaatselijke verondieping. Immers, door lokale verondieping zal de stroomsnelheid iets toenemen. Dit effect neemt af in de tijd doordat het gesuppleerde materiaal erodeert, en verplaatst naar benedenstrooms met de sedimentatiegolf die wordt opgewerkt door de suppletie.

De snelheid waarmee dit effect stroomafwaarts verplaatst hangt enerzijds af van de stroomsnelheid en anderzijds van de samenstelling van de suppletie. Hoe grover het materiaal, hoe langer het op de plek van suppletie blijft liggen en hoe langer het effect op de afvoerverdeling aanhoudt, maar hoe minder snel extra sediment aan het systeem wordt toegevoegd. De keuze voor de samenstelling van de suppletie is een afweging tussen deze twee effecten. Een belangrijke kanttekening moet worden gemaakt bij het gebruik van grove suppleties: uit eerdere studies is gebleken dat bij suppletie van grof materiaal er een erosiegolf stroomafwaarts van de suppletie wordt opgewekt. Deze zich stroomafwaarts ontwikkelende erosiegolf zou in theorie kunnen leiden tot een verlaging van de waterstanden bij de suppletie en bij de splitsing (door de stuwkromme). Dit effect is niet in de berekeningen in deze studie opgetreden, maar het wordt aanbevolen om bij grovere suppleties na te gaan of dit ook in werkelijkheid in de Boven-Waal zou kunnen optreden.



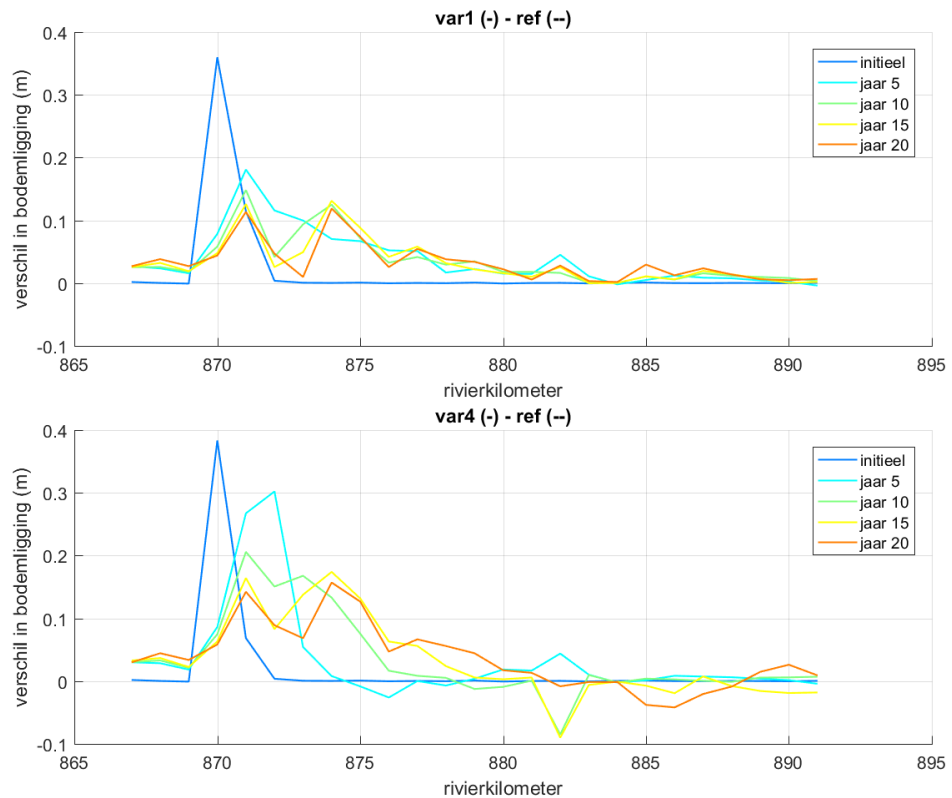
Figuur 11 Ontwikkeling van het jaarlijkse sedimenttransport op de Boven-Waal voor de referentie en suppletievariant 1.

De analyse van de mobiliteit van de verschillende sedimentfracties (Bijlage B.3) laat zien dat, bij suppletie in de bocht van Hulhuizen, fractie 5 (zeer fijn grind) naar verwachting na 5 jaar al nagenoeg volledig uit het suppletiegebied verdwenen is. Fractie 10 (zeer grof grind) beweegt nagenoeg niet, fractie 9 (nog steeds vrij grof grind) alleen bij de hoogste afvoer en fractie 8 (matig grof grind) ook bij kleinere hoogwaters. Fractie 8 beweegt binnen 5 jaar gedeeltelijk tot maximaal orde 3 km naar benedenstrooms, een belangrijk deel van deze fractie ligt op dat moment nog op de plek van de suppletie. In de bocht van Haalderen zijn de stroomsnelheden en daarmee de mobiliteit van het suppletie materiaal vergelijkbaar.

Op basis van bovengenoemde redenering zou de suppletie dus uit fijn grind (fracties 5 en 6) en matig grof grind (fracties 7 en 8) moeten bestaan. Echter, dit is sterk afhankelijk van de gebruikte transportmodellen (transportformules) en onvoldoende gedetailleerde gegevens om deze transportmodellen exact te kalibreren. Om te voorkomen dat ongewenste vergroving leidt tot erosiegolven is het dus aan te bevelen om te zorgen dat het mengsel een voldoende brede sortering heeft (dus ook voldoende zandfracties), en daarmee te kiezen voor een meer frequente suppletie.

Het toevoegen van sediment aan het systeem benedenstrooms van de suppletie door toename van de sedimenttoevoer van bovenstrooms wordt zichtbaar in de gemiddelde bodemligging (Figuur 12). Bij de fijnere variant 1 komt de bodem na 5 jaar al tot ruim 10 km van de suppletie hoger te liggen, bij de grovere variant 4 zijn dat er maar enkele kilometers.

Zowel het 1D-gedrag als het 2D-gedrag (paragraaf 3.1.1) van de fijnere variant 1 en de grovere variant 4 verschillen dus niet significant, alleen gaat de ontwikkeling van de 2D-patronen en het toevoegen van sediment aan het systeem benedenstrooms in de grovere variant 4 langzamer.



Figuur 12 Ontwikkeling van de breedte- en kilometergemiddelde bodemligging op de Boven-Waal voor verschillende samenstelling van de suppletie (variant 1 en variant 4).

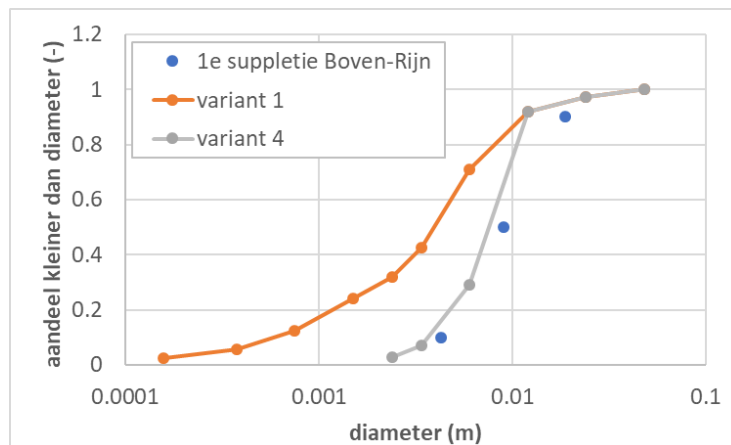
3.1.3 Vergelijking met reeds aangelegde suppleties Boven-Rijn

In 2016 en 2019 zijn er suppletiepilots op de Boven-Rijn uitgevoerd. Toen is er telkens 70.000 m³ sediment gestort, dus duidelijk minder dan in de hier onderzochte varianten. De eerste pilot is profielvolgend aangelegd met een dikte van maar 30 cm. Bij de tweede pilot is de buitenbocht opgevuld tot OLR-3,7 m, maar de dikte is toen beperkt tot maximaal 1 m, dus ook duidelijk kleiner dan in de hier onderzochte variant 1. Het materiaal van de eerste suppletiepilot was vergelijkbaar met de hier onderzochte grove suppletievariant 4 (Figuur 13).

De monitoring van de suppletiepilot 2019 op de Boven-Rijn heeft laten zien dat die suppletie zich bij afvoeren bij Lobith van minder dan 2.000 m³/s vrijwel niet verplaatst. Tijdens het hoogwater 2020, met een piek van ongeveer 6.000 m³/s bij Lobith, is de front van de suppletie op de rivieras verplaatst met orde 2 m/dag. De dikte van de stortlaag bleef daarbij ongeveer constant. Bij recente waarnemingen op de Boven-Rijn en Boven-Waal (November 2021) bij een afvoer van circa 1.300 m³/s bij Lobith is zowel met bodemtransportmetingen en video-opnamen aangetoond dat het bodemmateriaal ook bij die lage afvoeren in transport is (er zijn forse stroomsnelheden zichtbaar). De peilingen van de suppletiepilots op de Boven-Rijn laten echter zien dat bij deze afvoeren de suppletiefronten zich veel langzamer verplaatsen.

Modelberekeningen van de eerste suppletiepijot op de Boven-Rijn hebben laten zien dat het model de in de praktijk geobserveerde morfologische reactie, het patroon van alternerende sedimentatie en erosie, goed reproduceert, inclusief de amplitudes. De door het model voorspelde voortplanting van het suppletiefront was ook in de juiste orde grootte. Wel is dit alleen geverifieerd voor vrij kleine afvoeren (max. 4.500 m³/s). Er zijn nog geen modelberekeningen uitgevoerd van hoogwatersituaties (b.v. het hoogwater 2020). En de suppletie toen was vrij dun (30 cm) vergeleken met de varianten die in deze studie zijn doorgerekend.

De huidige berekeningen tonen bij hogere afvoeren een grotere snelheid in de verplaatsing van de suppletiefront dan geobserveerd op de Boven-Rijn. Het gebruikte materiaal is echter ook fijner, maar de stroomsnelheden op de Boven-Waal zijn kleiner dan op de Boven-Rijn. Ook zal het ontvangende zomerbed een andere samenstelling hebben: de bedding van de Boven-Waal is relatief zandiger dan de bedding van de Boven-Rijn.



Figuur 13 Vergelijking tussen de korreldiameters van de suppletievarianten en de 1^e suppletiepijot op de Boven-Rijn.

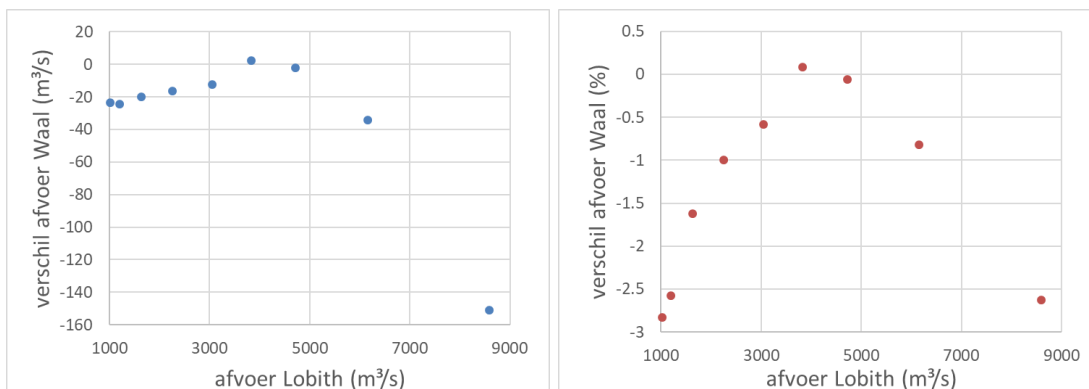
3.1.4 Invloed van modelkeuzes

3.1.4.1 Afvoerverdeling in het DVR-model

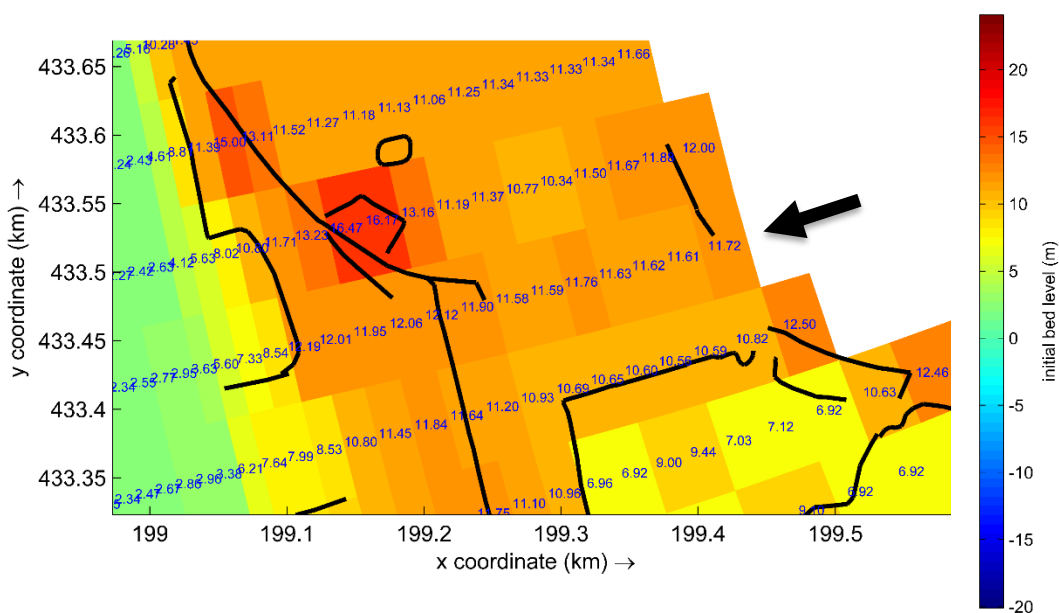
Het DVR-model is niet in detail afgeregeld op de gemeten afvoerverdeling. Om te kijken hoe goed de voorspelde afvoerverdeling is, is deze vergeleken met de verdeling die door het SOBEK-model (sobek-rijn-j19_5-v1) wordt bepaald, dat wel is afgeregeld hierop. Figuur 14 toont het absolute en relatieve verschil in de Waal-afvoer tussen de twee modellen voor de 9 afvoerniveaus. De afwijking is vrij klein, tussen de 0 % en 2,5 %. Absoluut gezien is de afwijking tot het afvoerniveau $Q_{Lobith} = 4.417 \text{ m}^3/\text{s}$ ook klein (0-20 m³/s). Voor de twee hoge afvoerniveaus is de absolute afwijking groter. In het DVR-model gaat er minder afvoer naar de Waal en meer naar het Pannerdensch Kanaal. Dit komt doordat de overlaat Pannerden in het model te laag is. De drempel van de overlaat is wel via Baseline in de bodemhoogte terecht gekomen (Figuur 15), maar er is op deze locatie geen kunstwerk toegevoegd om de schotten te modelleren⁵.

De hoge afvoeren hebben meer invloed op de beweging van de suppletie dan de lagere en middelgrote afvoeren, ook al is de duur per jaar kleiner. De beweging van het suppletiemateriaal wordt dus afgeremd door de fout in de afvoerverdeling. Dit geldt met name voor de suppletievariant met grover materiaal (variant 4).

⁵ Delft3D4 kan ook geen (aanstuurbare) kunstwerken modelleren, maar er zou tenminste een vaste overlaat toegevoegd kunnen worden.



Figuur 14 Verskil tussen de Waal-afvoer in het DVR-model en het op afvoerverdeling gekalibreerde sobek-rijn-j19_5-v1 (links: absoluut, rechts: relatief t.o.v. de Waal-afvoer in het SOBEK-model).



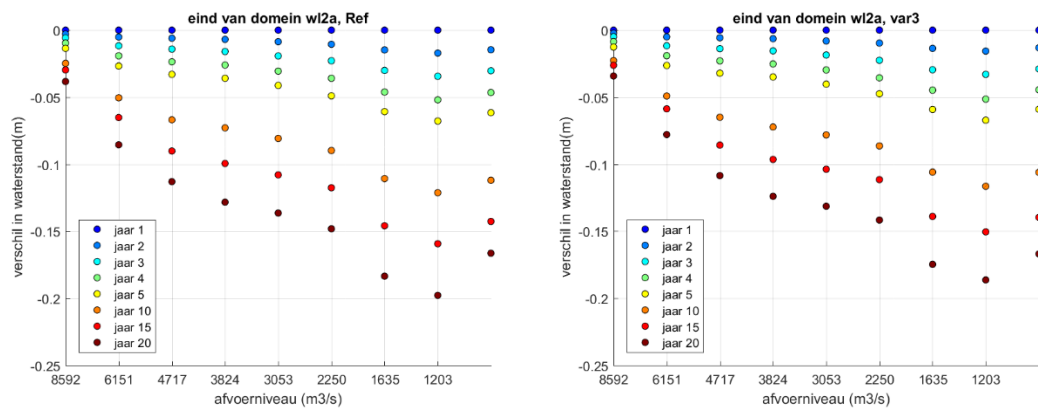
Figuur 15 Bodemligging (kleur en getallen) en overlaten (zwarte lijnen) rond de Pannerdensche overlaat in het DVR-model. De pijl geeft aan waar de overlaat Pannerden ligt.

3.1.4.2 Invloed van de randvoorwaarden

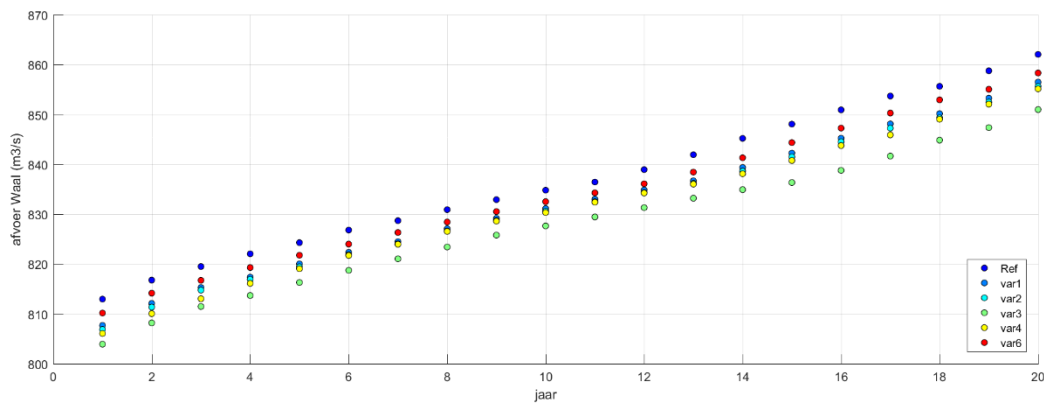
In het DVR-model wordt er gerekend met een vaste jaarlijkse afvoerhydrograaf op de bovenrand. De mobiliteit van de suppletie zal in een droog jaar minder groot zijn dan door het model voorspeld en in een nat jaar of een jaar met een groot hoogwater groter.

De berekende afvoerverdeling komt aan het begin van de simulaties voor de lage tot middelgrote afvoeren goed overeen met de gemeten verdeling. Echter wordt de invloed van het gebied benedenstrooms van het interessegebied in het model anders meegenomen voor de Waal dan voor het Pannerdensch Kanaal. Op de IJsselkop wordt er een vaste Qh-relatie opgelegd. De invloed van eventuele morfologische veranderingen benedenstrooms van de IJsselkop wordt dus niet meegenomen. Op de Waal daarentegen wordt het hele traject tot aan Gorinchem mee gemodelleerd. Omdat dat traject continue erodeert, gaat de waterstand benedenstrooms van de Boven-Waal continue omlaag en trekt de Waal in de loop van de berekening steeds meer water (Figuur 16). De verandering in de afvoerverdeling per jaar heeft dezelfde orde grootte als de invloed van de suppletie op de verdeling (Figuur 17).

Dit effect speelt echter in de referentieberekeningen net zoals in de berekeningen met suppletie, de ontwikkeling in de tijd is voor alle varianten en de referentie ongeveer gelijk. Een vergelijking van de invloed van de suppletie op de afvoerverdeling tussen varianten is dus wel mogelijk.



Figuur 16 Ontwikkeling van de waterstand op de benedenrand van modeldomein w12a bij rkm 891,8 (Beuningen) in de referentie (links) en variant 3 (rechts).



Figuur 17 Ontwikkeling van de afvoer naar de Waal in de tijd voor alle varianten ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.2 Effect van de suppletie op de afvoerverdeling bij laagwater

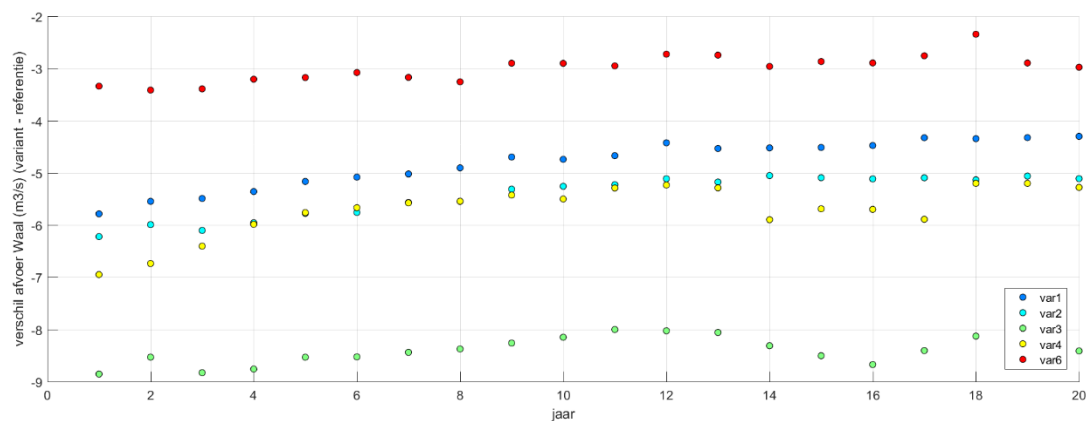
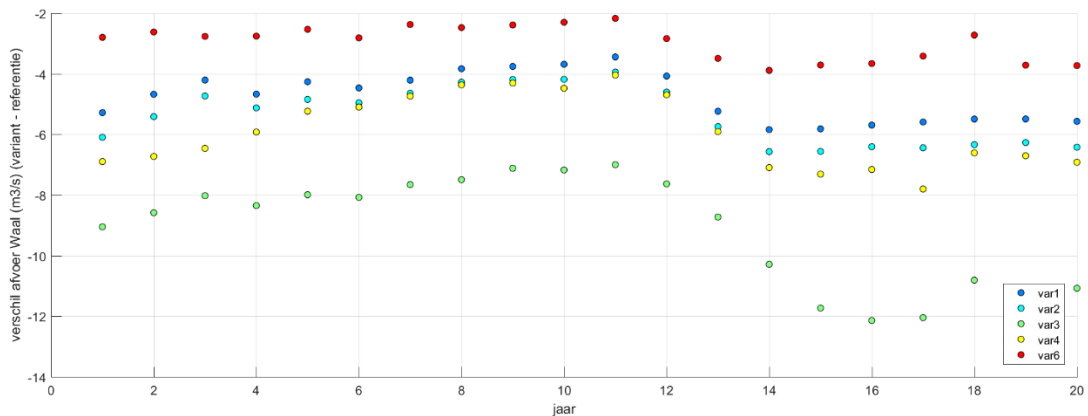
3.2.1 Effect op de afvoerverdeling bij laagwater

Een suppletie op de Boven-Waal stuwt het water bij het Pannerdensche Kop enkele centimeters op. Daardoor verandert de afvoerverdeling: er gaat minder afvoer naar de Waal dan zonder suppletie. Naarmate de suppletie uitdempt neemt dat effect af. Figuur 18 laat het verschil in Waal-afvoer tussen de suppletievarianten en de referentie in de loop der tijd zien voor twee lage afvoerniveaus. Figuren voor alle afvoerniveaus staan in Bijlage E.2. Op de x-as staan de doorgerekende jaren, de berekeningen omvatten telkens 20 jaar. Figuur 19 laat het verschil direct na aanleg van de suppletie, nog zonder enige morfologische verandering, zien.

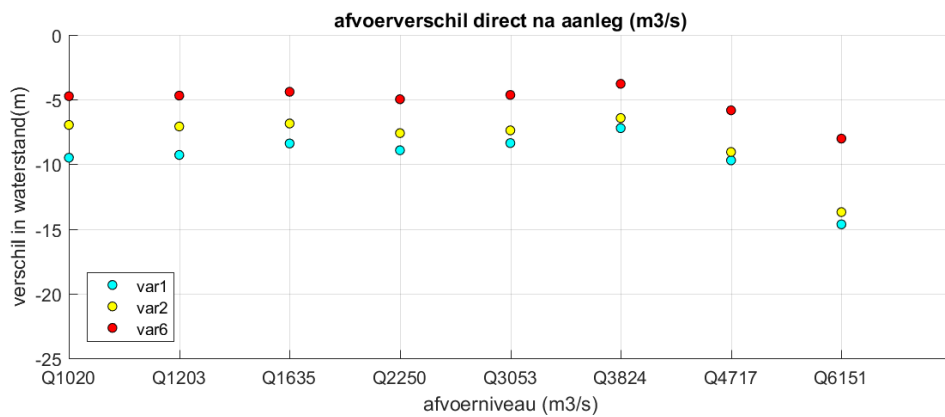
Varianten 1 en 2 verlagen de Waal-afvoer bij OLA (1.020 m³/s bij Lobith) in het eerste jaar⁶ met ongeveer 7-9 m³/s. Omdat met name variant 1 van de suppletie in het model erg snel uitdempt is de invloed in het model al in het eerste jaar al duidelijk teruggedaan. Binnen 3-5 jaar neemt dit af naar een verlaging van ongeveer 4 m³/s. De verlaging door variant 4 (grover materiaal) is ongeveer gelijk aan die van varianten 1 en 2, maar de afname gaat langzamer (afname naar orde 4 m³/s binnen de eerste 10 jaar). In variant 3 (vaste laag) dempt de suppletie niet uit, waardoor de invloed op de afvoerverdeling enkele m³/s groter is. Variant 6 ligt verder weg van het splitsingspunt en heeft daardoor minder invloed op de afvoerverdeling (initieel ongeveer 5 m³/s, daarna orde 2-3 m³/s bij OLA). De invloed van variant 5 (met semi-vaste lagen module) wordt verstoord door het feit dat het model nog moet inspelen op de nieuwe formuleringen en wordt daarom beter buiten beschouwing gelaten. Bij ongeveer gemiddelde afvoer (2.250 m³/s bij Lobith) is de invloed op de afvoerverdeling vergelijkbaar groot.

In de figuren kentert de ontwikkeling van de afvoerverdeling na ruim 10 jaar weer naar en toenemend verschil tussen de varianten en de referentie. Op dat moment bereikt het alternerende sedimentatie- en erosiepatroon de vaste laag bij Nijmegen. De diepe erosiekuil die in het model bij de bovenstroomse rand van de vaste laag ontstaat over de hele breedte van de rivier (vgl. paragraaf 3.1.1) is vanaf dat moment in de berekeningen met suppletie minder diep dan in de referentie. Dit is een modelartefact. Echter komt op dat moment ook de erosiekuil benedenstrooms van de vaste laag hoger te liggen. Deze bodemverandering ligt in het gebied dat de afvoerverdeling beïnvloedt en heeft dus ook effect. Het is niet met zekerheid te zeggen welke van de twee de duidelijke trendverandering in het afvoerverschil veroorzaakt, en dus hoe betrouwbaar dat resultaat is.

⁶ Het figuur toont de afvoerverdeling op het moment dat de betreffende afvoer bij Lobith langskomt in de berekening. Dat is voor de lage afvoeren aan het **einde** van elk jaar. Dat verklaart waarom er in jaar 1 al verschillen tussen de varianten met gelijke geometrie te zien zijn.



Figuur 18 Verschil in Waal-afvoer tussen de suppletievarianten en de referentie in de loop der tijd (x-as: jaren). Boven: $Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$, onder: $Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$.

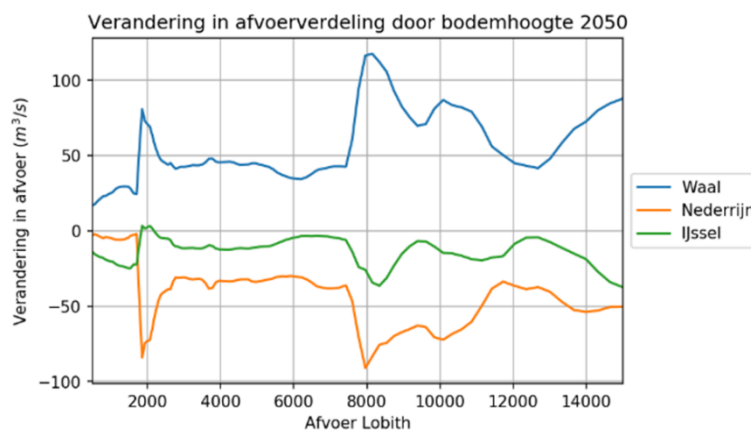


Figuur 19 Verschil in Waal-afvoer direct na aanleg van de suppletie. Varianten 3 t/m 5 hebben initieel hetzelfde effect als variant 1 omdat ze dezelfde geometrie hebben.

3.2.2 Resultaten van andere studies

Volgens Hydrologic (2020) is het “vanuit het IJsselmeerperspectief [...] wenselijk om zodanig in te grijpen dat er (tijdelijk) een plus in de afvoerverschuiving ontstaat, die vervolgens jaarlijks geleidelijk afneemt tot de signaleringswaarde waarna opnieuw maatregelen worden genomen om overschrijding van de ondergrens te voorkomen.” Hydrologic (2020) noemt een ondergrens van -2% afvoerverschuiving⁷ naar de IJssel – oftewel +2% naar de Waal – ten opzichte van de huidige situatie nog acceptabel. Bij een grotere verschuiving “neemt de frequentie van het aantal watertekortjaren in de IJsselmeerregio bij STOOM2050 toe. Onder de 2% neemt weliswaar de omvang van het watertekort in watertekortjaren enigszins toe maar blijft de frequentie (5 à 6 van de 100 jaar) vergelijkbaar.”

Zowel Hydrologic (2020) als Verbeek (2021, nog onder voorbehoud) schatten dat de verschuiving van de afvoerverdeling op de Pannerdensche Kop ongeveer 20 m³/s (2%) per 10 jaar is (bij lage Boven-Rijn-afvoer). Dezelfde verschuiving wordt door het model voorspeld (Figuur 17). De onderzochte varianten van de suppletie op de Boven-Waal kunnen bij lage afvoer ongeveer 0,5 à 1% afvoerverschuiving afvangen (direct na aanleg). De Jong (2020) heeft met een geschatte bodemligging voor 2050 in een SOBEK-model uitgerekend dat de afvoerverdeling bij lage afvoeren in de komende 30 jaar met orde 20-30 m³/s zal verschuiven naar de Waal (Figuur 20). Dat is iets minder dan door het model voorspeld.



Figuur 20 Verandering afvoerverdeling door verandering in bodemhoogte volgens de Jong (2020).

3.3 Effect van de suppletie op de rivierfuncties

3.3.1 Hoogwaterveiligheid

Figuur 21 toont het waterstandsverschil tussen berekeningen met en zonder suppletie (variant 1) direct na aanleg van de suppletie voor de hoogste doorgerekende afvoer ($Q_{\text{Lobith}} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$). Door de veranderde afvoerverdeling verhoogt de suppletie de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal met ongeveer 2 cm en verlaagt de waterstanden op de Waal benedenstrooms van de suppletie ook met ongeveer 2 cm. Bovenstrooms van de suppletie is er een opstuwung van max. 3 cm te zien. Bij het splitsingspunt is deze afgenomen tot ongeveer 2 cm, en de stuwkromme reikt ongeveer tot aan Emmerich (rechter rand van Figuur 21). Na aanleg van de suppletie neemt de invloed op de afvoerverdeling en op de waterstanden langzaam af omdat de suppletie afvlakt (paragraaf 3.2). Tegelijkertijd verhoogt de suppletie tijdelijk de bodemligging benedenstrooms door een toename van de sedimenttoevoer (paragraaf 3.1.2). Daardoor zal de waterstand bij maatgevende afvoer tijdelijk met name direct benedenstrooms van de suppletie enkele centimeter hoger komen te liggen.

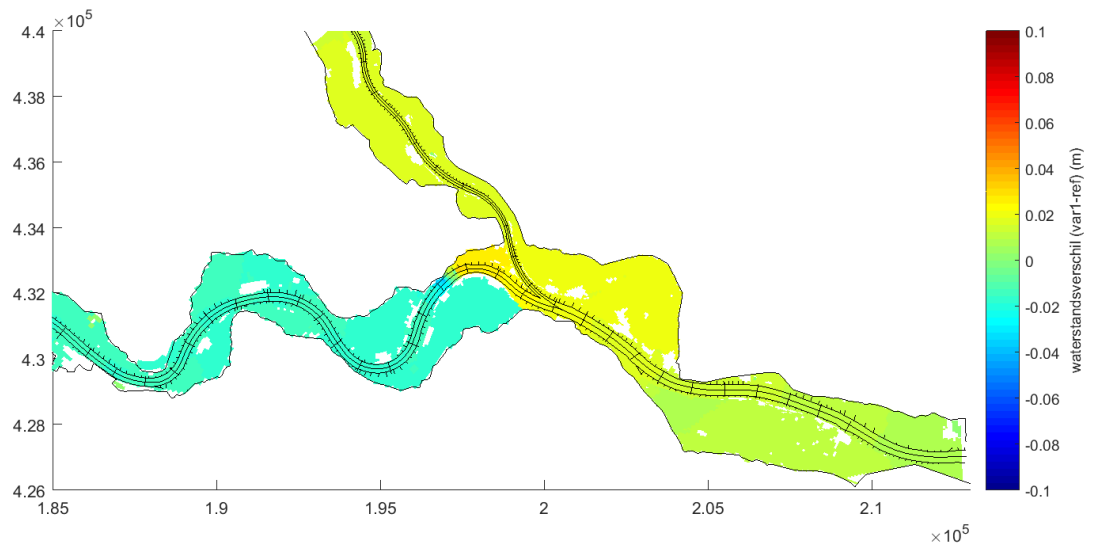
⁷ Oftewel -20 m³/s bij een Boven-Rijn-afvoer van 1.000 m³/s

De invloed van een verhoging van de bodemligging in de hoofdgeul op de waterstanden is het grootst hoe kleiner de waterdiepte is, dus hoe kleiner de afvoer. Dit is te zien in de figuren voor alle doorgerekende afvoerniveaus in Bijlage F.1. Bij maatgevende afvoer zal de invloed van de suppletie op de hoogwaterstanden dus kleiner zijn dan in Figuur 21 getoond.

De verhoging van de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal zal ook doorwerken naar de Neder-Rijn en IJssel, die niet meegenomen zijn in de modelberekeningen. Bij maatgevende afvoer wordt de Neder-Rijn ontzien en gaat alle aanvullende afvoer naar de IJssel. Naar schatting is dat orde 30 m³/s, dat zou neerkomen op orde 3 cm hogere waterstanden.

In het model is het regelwerk Pannerden niet goed geïmplementeerd (paragraaf 3.1.4.1). Daardoor stroomt er bij hoge afvoeren te veel water naar het Pannerdensch Kanaal. In werkelijkheid zou er dus meer afvoer dan berekend door de Waal stromen, en zou de invloed van een suppletie op de hoogwaterstanden en daarmee ook op de afvoerverdeling bij eenzelfde afvoer bij Lobith kleiner zijn dan nu berekend.

Er wordt dus geschat dat de invloed van de suppletie op de hoogwaterstanden beperkt blijft tot maximaal enkele centimeters.



Figuur 21 Waterstandsverschil tussen berekeningen met en zonder suppletie (variant 1) direct na aanleg, nog zonder enige morfologische veranderingen door de suppleties.

3.3.2 Scheepvaart

3.3.2.1 Baggerlast

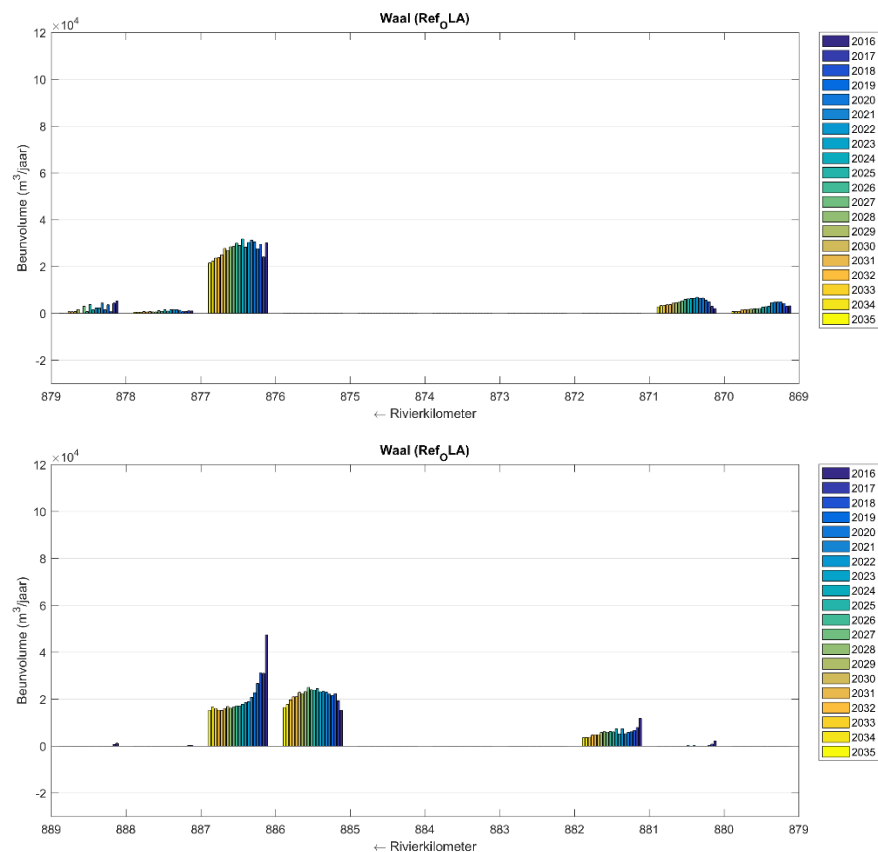
Figuur 22 en Figuur 23 tonen de berekende baggerlast per rivierkilometer (beunvolume) voor de referentie en suppletievariant 1. De berekeningen met vaargeulonderhoud voor de overige varianten zijn niet doorgelopen vanwege een probleem met het actualiseren van het OLR-vlak⁸. Dit heeft te maken met een instabiliteit in het OLR-vlak bij de langsdammen, die waarschijnlijk wordt veroorzaakt door het net wel overstroomd ervan in een deel van de berekeningen. Het probleem kon binnen dit project niet opgelost worden.

⁸ Zoals ook in eerdere studies met het DVR-model is het OLR-vlak tijdens de simulatie regelmatig geactualiseerd op basis van de berekende waterstanden bij OLA.

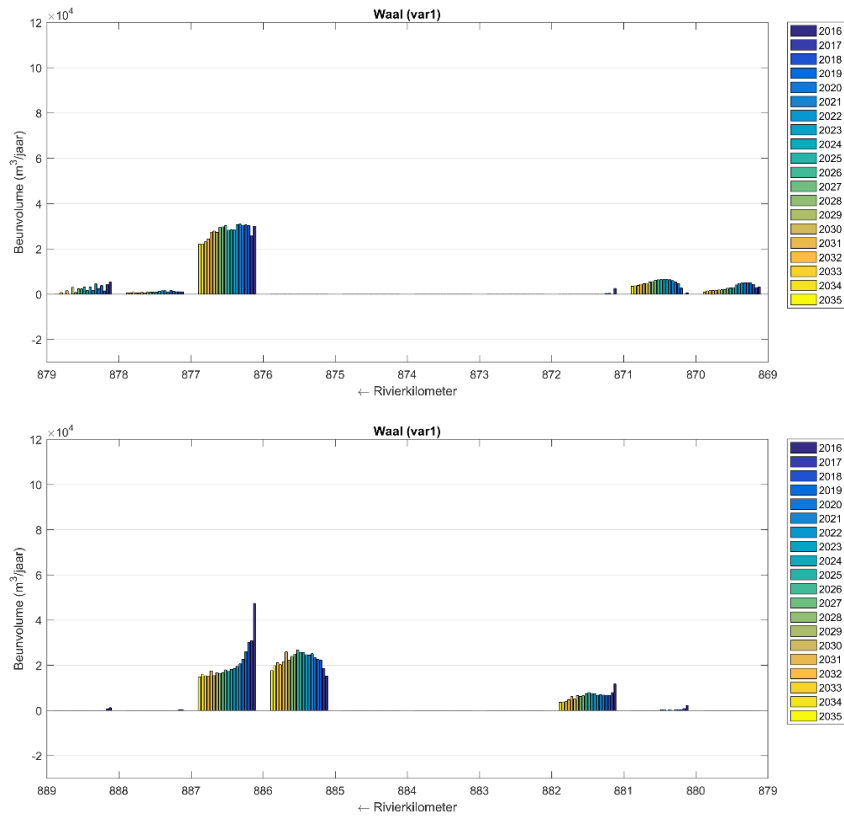
Figuur 24 vergelijkt de berekende jaarlijkse baggerlast met suppletievariant 1 met de referentiesituatie. In de binnenbocht naast de suppletie (rkm 870-871) neemt de baggerlast in de eerste 10 jaar duidelijk af door de morfologische reactie op de suppletie (verdieping van de binnenbocht, paragraaf 3.1.1). Dat effect neemt af naarmate de verdieping na verloop van tijd weer kleiner wordt. Bij de MGD-locatie bij rkm 876-877 neemt de baggerlast licht toe door de suppletie, omdat de bodem hier iets hoger komt te liggen (paragraaf 3.1.1).

Verder benedenstrooms op de Boven-Waal neemt de voorspelde baggerlast iets toe. Het verschil is een orde grootte kleiner dan de totale baggerhoeveelheid, 1.000 m³/jaar tegenover 20.000 m³/jaar. Gezien de onzekerheden in de methode kan dit verschil als nihil of verwaarloosbaar worden beschouwd.

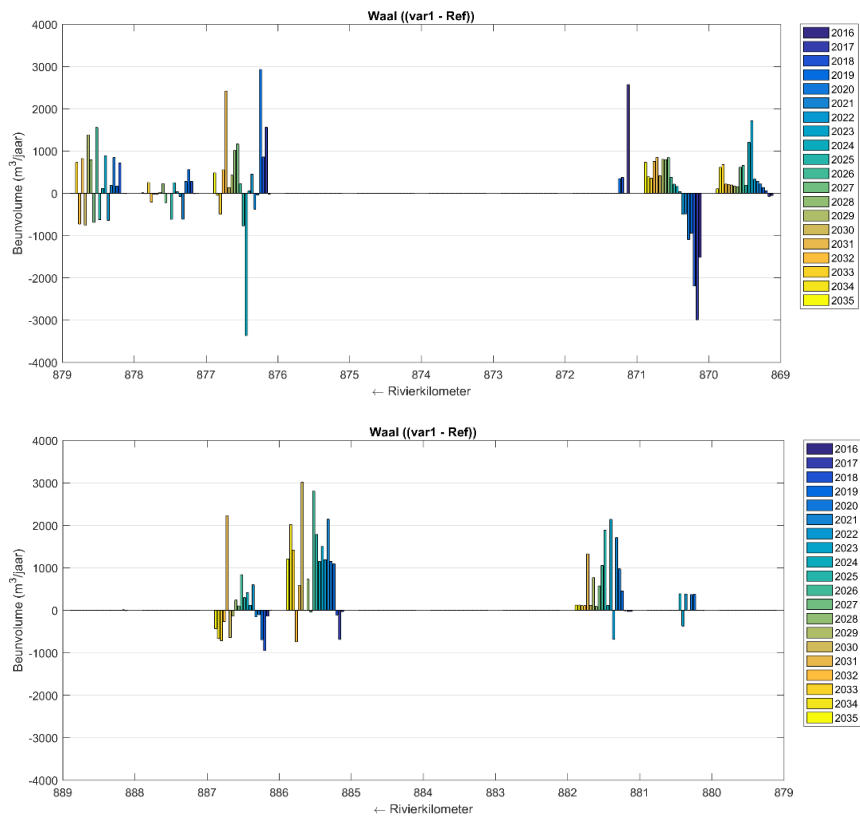
Omdat suppletievarianten 1 en 2 en de daarvan afgeleide varianten tot een verhoging van de bodemligging in de bochtovergang Erlecom-Haalterden leiden, is suppletievariant 6 achter de bodemkribben bij Erlecom gelegd om de verhoging van de nodige baggerinspanning op de MGD-locatie te voorkomen. Dit wordt verder bevorderd door het opvullen van de kuil benedenstrooms van de bodemkribben, omdat ook dit een relatieve verlaging van de bodem ernaast tot gevolg heeft.



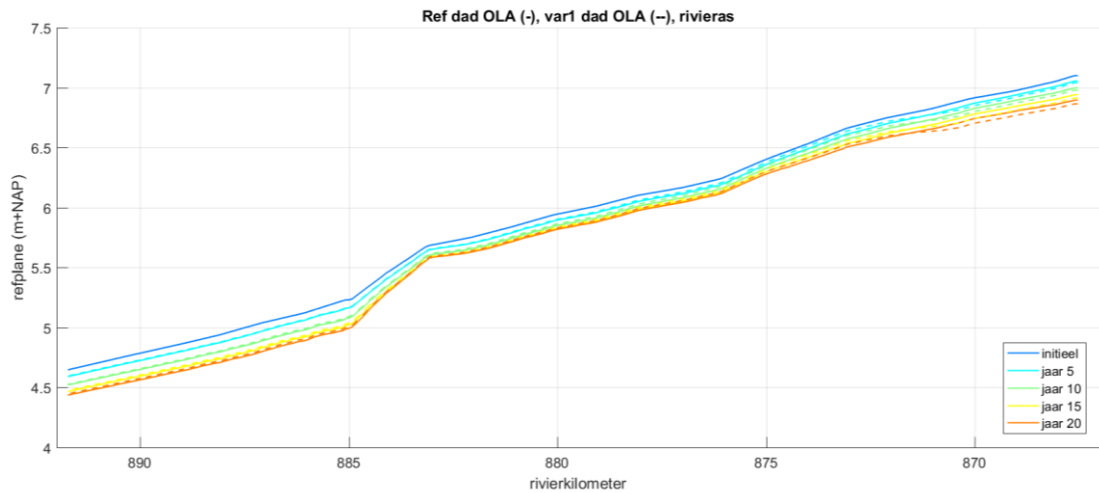
Figuur 22 Berekende baggerlast op de Boven-Waal (referentie).



Figuur 23 Berekende baggerlast op de Boven-Waal (variant 1).



Figuur 24 Verschil in berekende baggerlast op de Boven-Waal (variant 1 – referentie).



Figuur 25 Berekende verandering van de OLR (referentie: doorgetrokken lijnen, variant 1: stippellijnen)

3.3.2.2 Vaardiepte bij laagwater

De suppletie beïnvloedt de vaardiepte bij laagwater door bodemveranderingen en door opstuwung bovenstrooms van de suppletie maar lagere waterstanden benedenstrooms ervan vanwege de invloed op de afvoerverdeling. Problemen met de bevaarbaarheid kunnen ontstaan in de ondiepe binnenbochten, bij de vaste lagen en bij andere MGD-locaties.

Binnenbochten

Het patroon van bodemveranderingen die worden veroorzaakt door de suppleties met de geometrie van variant 1 en variant 2 zijn heel vergelijkbaar. Suppletievarianten 1 en 2 verlagen de bodem in de binnenbocht van Hulhuizen op het traject naast de suppletie. De baggerlast neemt hierdoor in de eerste jaren na aanleg duidelijk af. Aan het einde van de binnenbocht, vanaf ongeveer rkm 871,5, komt de bodem na suppletie juist iets hoger te liggen. Mogelijk is dat de reden dat de baggerlast in dat km-vak na ongeveer 5 jaar weer stijgt ten opzichte van de referentie.

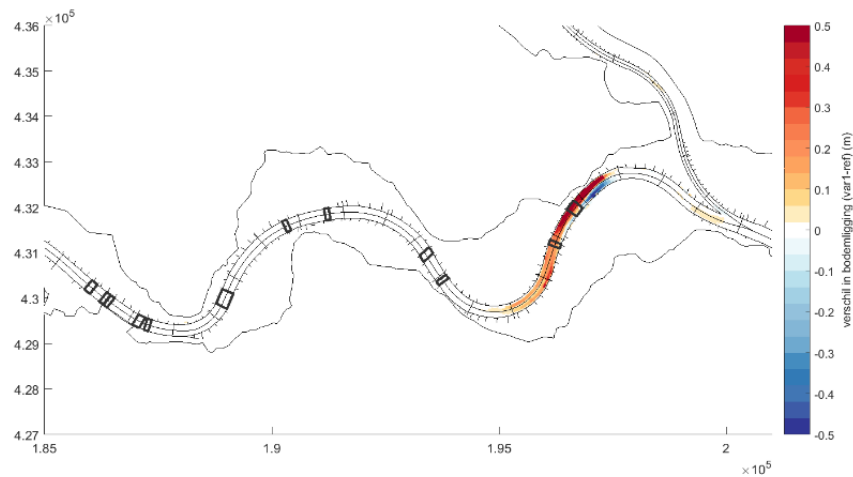
In de binnenbocht naast de bodemkribben bij Erlecom komt de bodem hoger te liggen door de suppletievarianten 1 en 2. Direct naast de bodemkribben is er voldoende ruimte beschikbaar, in feite betekent dit dat de erosie van de bodem daar vertraagd wordt. Bij de uitgang van de bocht wordt de MGD-locatie bij rkm 876 echter negatief beïnvloedt, en stijgt de baggerlast (3.3.2.1).

Ook bij het begin van de binnenbocht van Haalderen (ongeveer rkm 876-877) komt de bodem met suppletievarianten 1 of 2 hoger te liggen dan in de referentie. De voorspelde baggerlast lijkt hierdoor licht toe te nemen, echter is dat effect in het model niet goed te scheiden van de stijging bij de MGD-locatie, omdat beiden grotendeels binnen eenzelfde baggerpolygoon vallen.

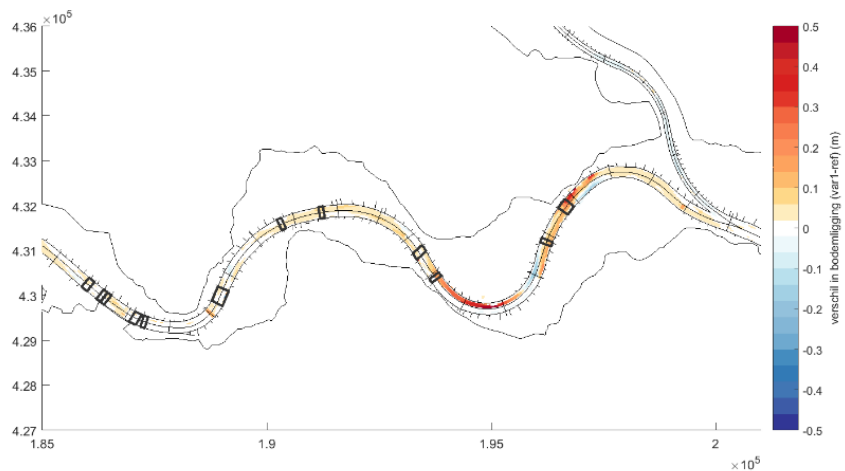
Bij suppletievariant 6 komt de binnenbocht naast deze suppletie (tot aan ongeveer rkm 879) orde 5-10 cm lager te liggen, benedenstrooms daarvan juist 10-20 cm hoger. Door het opvullen van de kuil achter de bodemkribben komt de bodem rondom het scheepvaartknelpunt (MGD rkm 876,6) lager te liggen. De binnenbocht naast de bodemkribben bij Erlecom komt ook orde 10 cm hoger te liggen.

Niet-baggerlocaties

In paragraaf 3.3.2.1 is beschreven hoe de baggerlast verandert door de suppletie. De bodem verandert echter ook op locaties waar niet gebaggerd mag worden. Figuur 26 en Figuur 27 tonen de bodemveranderingen op die locaties relatief t.o.v. de referentie na 1 jaar en na 20 jaar. Figuren voor de varianten 2 en 6 zijn te vinden in Bijlage 0. De Waterdiepte kaarten Rijntakken van RWS ON⁹ (Jans et al., 2018), geven aan hoeveel ruimte onder de norm er beschikbaar is op deze locaties. Figuur 28 toont een uitsnede ervan voor de Boven-Waal. Rode en gele kleuren geven daarin aan dat de waterdiepte in de vaargeul niet voldoet aan de norm. Door de aanzanding in de binnenbocht bij Hulhuizen, net benedenstrooms van de suppletievarianten 1 en 2 kan er volgens deze kaart bij varianten 1 t/m 5 een probleem ontstaan dat niet door vaargeulonderhoud verwijderd kan worden. Bij variant 6 vindt er aanzanding plaats op de niet-baggerlocaties benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen. Aan de rechterkant van de rivier is er daar geen ruimte voor.

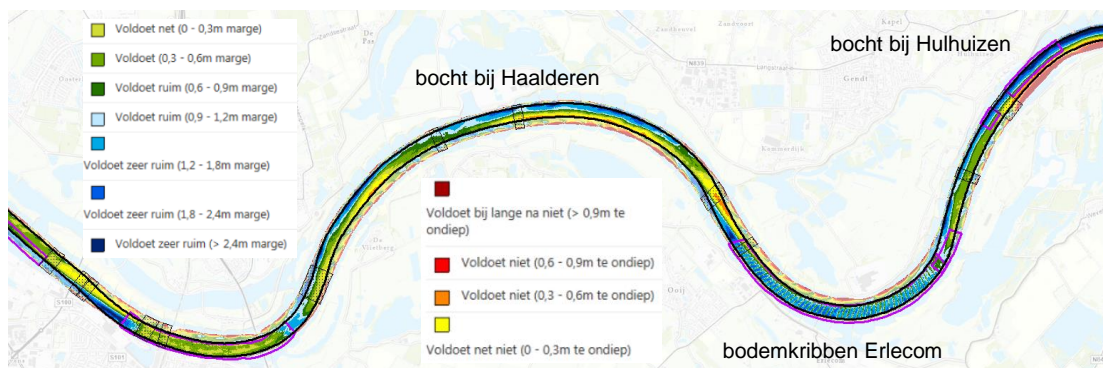


Figuur 26 Bodemverandering na 1 jaar door suppletievariant 1 relatief t.o.v. de referentie. Dikke zwarte polygonen = niet-bagger-locaties.



Figuur 27 Bodemverandering na 20 jaar door suppletievariant 1 relatief t.o.v. de referentie. Dikke zwarte polygonen = niet-bagger-locaties.

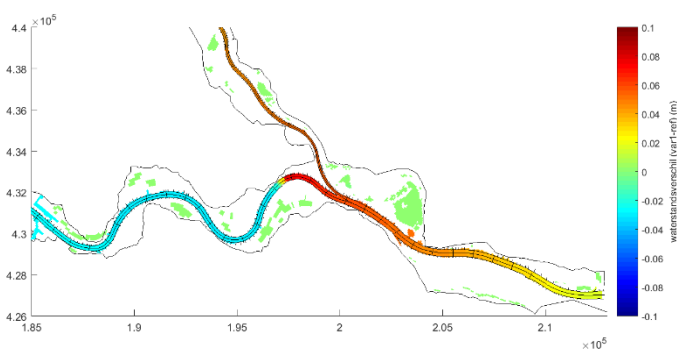
⁹ https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/ext/geoweb51/index.html?viewer=ON_Waterdieptekaarten_Rijntakken



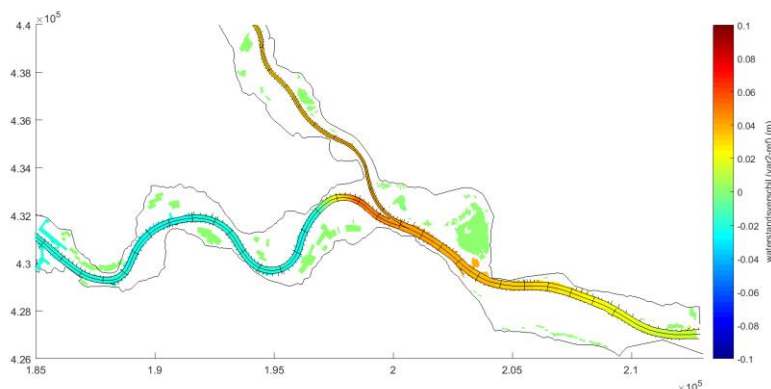
Figuur 28 Waterdiepte kaarten Rijntakken (RWS-ON). Het zwarte polygoon toont de vaargeul, de paarse polygoon zijn niet-stortlocaties, en de met stippels gevulde polygoon zijn niet-baggerlocaties.

Afvoerverdeling

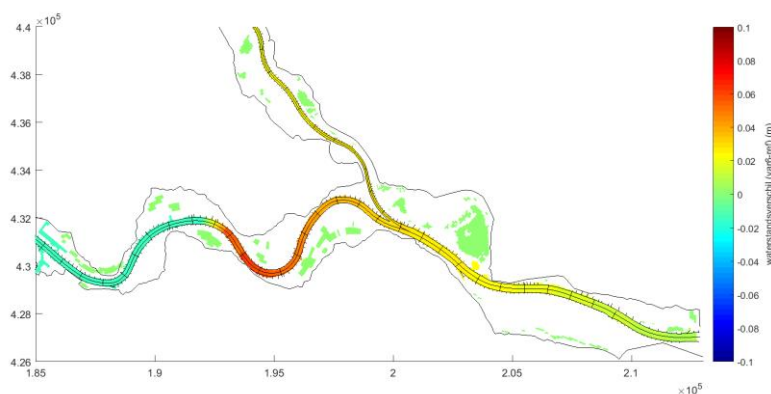
Door de veranderde afvoerverdeling wordt de waterstand benedenstrooms van de suppletie direct na aanleg bij OLA ongeveer 2,5 cm verlaagd (Figuur 29), en daarmee dus ook de vaardiepte. Bij variant 2 is de invloed iets kleiner (orde 2 cm, Figuur 30) en bij variant 6 nog iets kleiner (orde 1,5 cm, Figuur 31). Doordat suppletievariant 6 verder benedenstrooms ligt is het traject met verlaagde waterstand korter. Bij alle varianten wordt echter de waterstand bij de knelpunt van de vaste laag van Nijmegen verlaagd. Na aanleg van de suppletie neemt de invloed op de afvoerverdeling en op de waterstanden langzaam af omdat de suppletie afvlakt (paragraaf 3.2).



Figuur 29 Waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 1 direct na aanleg ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). Figuren voor de overige afvoeren staan in Bijlage F.



Figuur 30 Waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 2 direct na aanleg ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). Figuren voor de overige afvoeren staan in Bijlage F.



Figuur 31 Waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 6 direct na aanleg ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). Figuren voor de overige afvoeren staan in Bijlage F.

3.3.2.3 Verandering in dwarsstroming

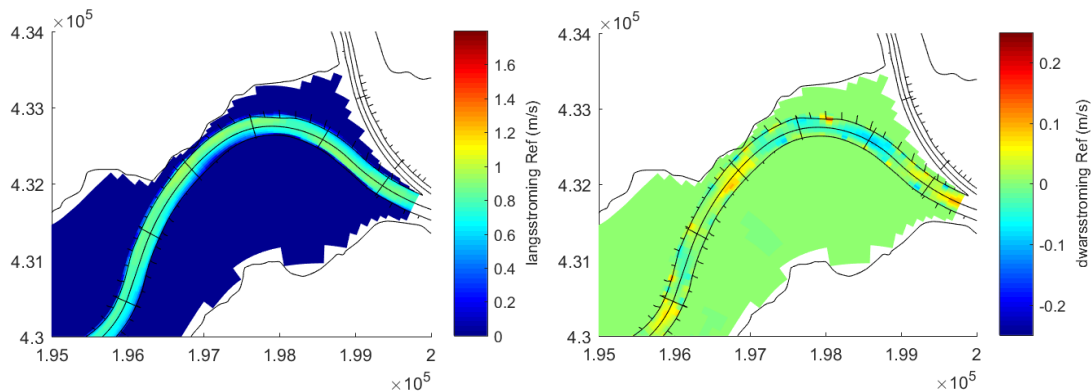
Door de suppletie wordt de stroomsnelheid in richting van de rivier lokaal duidelijk verhoogd (Figuur 32 t/m Figuur 34). Direct bovenstrooms van de suppletievariant 1 ontstaat er een duidelijke dwarsstroming richting de binnenbocht. De stroming wordt hier herverdeeld en er gaat meer water door de binnenbocht stromen. De lokaal sterke dwarsstroming zou voorkomen kunnen worden door een geleidelijk toenemende dikte toe te passen in plaats van de abrupte overgang uit deze studie. Of door de suppletie naar bovenstrooms door te trekken tot er geen ruimte onder OLR-3,5 m meer is.

Figuur 32 t/m Figuur 34 tonen de stroomsnelheden en veranderingen voor variant 1 en een Boven-Rijn-afvoer van $1.020 \text{ m}^3/\text{s}$ direct na aanleg van de suppletie, dus nog voordat er morfologische verandering heeft plaatsgevonden. De verandering in de stroomsnelheden zal in de loop der tijd afnemen naarmate de suppletie afvlakt. Door de herverdeling van de stroming ontstaat er een morfologische reactie die naar benedenstrooms voortplant (paragraaf 3.1.1). Daardoor zullen in de loop der tijd ook benedenstrooms van de suppletie veranderingen in de stroomsnelheden ontstaan. Deze zijn naar verwachting echter duidelijk kleiner dan die direct in de omgeving van de suppletie, omdat de morfologische reactie steeds kleiner wordt hoe verder deze naar benedenstrooms loopt.

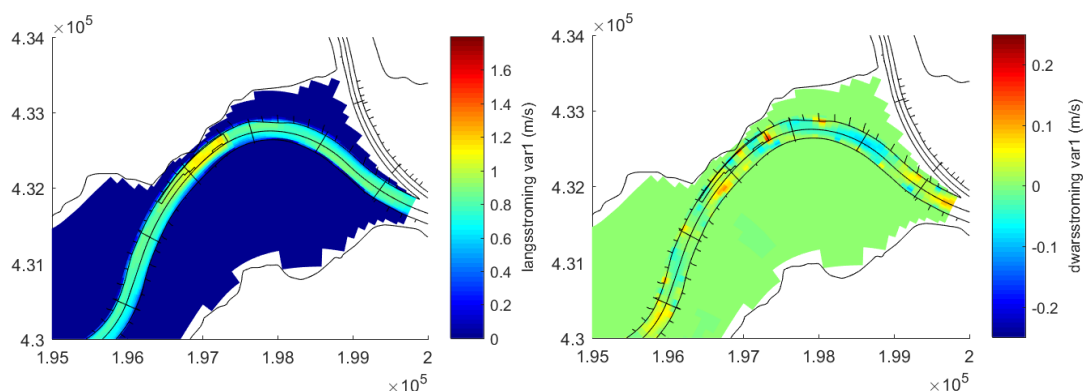
Bij toenemende afvoer neemt de invloed op de dwarsstroming maar weinig af.

Variante 2 is duidelijk dunner dan variant 1 en leidt daarom tot veel minder dwarsstroming richting de binnenbocht direct bovenstrooms van de suppletie (ongeveer $0,05 \text{ m/s}$ verschil in dwarsstroming bij variant 2 tegenover ca. $0,15 \text{ m/s}$ bij variant 1). Hetzelfde geldt voor variant 6. $0,15 \text{ m/s}$ is volgens het Rivierkundig beoordelingskader de maximaal toegestane dwarsstroming veroorzaakt door de aanleg van een nevengeul (RWS-WVL, 2019). Als er wordt besloten om een suppletie aan te brengen waarbij opgevuld wordt tot OLR-3,5 m, zoals in variant 1, dan wordt aanbevolen om bovenstrooms een geleidelijkere toename in dikte toe te passen. Daarvoor kan de suppletie verder naar bovenstrooms doorgetrokken worden dan in deze studie, liefst tot er geen ruimte onder OLR-3,5 m meer is.

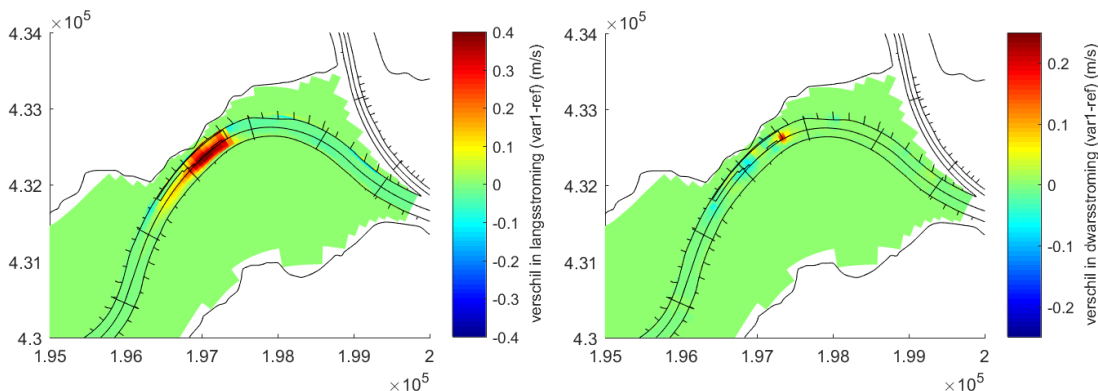
Bij gebruik van grover materiaal (varianten 3, 4 en 5) zal de invloed op de dwarsstroming minder snel uitdempen omdat de suppletie langer blijft liggen.



Figuur 32 Stroomsnelheid in langs- (links) en dwarsrichting (rechts) in de referentie ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). (bij de dwarsstrooming: positief = stroming naar de linker oever en negatief = stroming naar de rechter oever)



Figuur 33 Stroomsnelheid in langs- (links) en dwarsrichting (rechts) direct na aanleg suppletievariant 1 ($Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). (bij de dwarsstrooming: positief = stroming naar de linker oever en negatief = stroming naar de rechter oever)



Figuur 34 Verschil in stroomsnelheid in langs- (links) en dwarsrichting (rechts) direct na aanleg (var1 – ref, $Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$). (bij de dwarsstrooming: positief = stroming wordt meer naar de linkeroever geleid, negatief = stroming wordt meer naar de rechteroever geleid)

3.3.2.4

Hinder voor de scheepvaart tijdens de uitvoering en na aanleg

Tijdens de uitvoering van de twee pilot-suppleties op de Boven-Rijn zijn er geen meldingen binnen gekomen over hinder voor de scheepvaart. Na uitvoering van de tweede pilot zijn interviews met schippers gehouden. Ook daaruit kwamen geen bijzonderheden naar voren. Hetzelfde geldt voor de tijd na aanleg.

De Boven-Waal is smaller dan de Boven-Rijn en heeft scherpere bochten (Figuur 35). De schepen drijven in de bochten. In een scherpe bocht zoals die van de Boven-Waal hebben ze daarvoor naar schatting 2-3 keer hun breedte nodig (Figuur 36). Het is dus mogelijk dat de schepen van de aanleg van een suppletie op de Waal meer hinder zullen ervaren dan op de Boven-Rijn.

Na aanleg is het water ter plekke van de suppletie ondieper en ontwikkelt een morfologische reactie (3.1.1). Op de Boven-Rijn hebben schippers aangegeven hier geen last van gehad te hebben. Naar verwachting geldt dat ook voor de Waal als de suppleties niet dikker worden dan op de Boven-Rijn. Suppletievariant 1 is duidelijk dikker, met name bovenstrooms. Als er wordt besloten om een suppletie aan te brengen waarbij opgevuld wordt tot OLR-3,5 m, dan wordt aanbevolen om deze verder naar bovenstrooms door te laten lopen dan in deze studie en liefst door te trekken tot er geen ruimte onder OLR-3,5 m meer is. Op die manier blijft de bodem vlakker en wordt daarmee voorkomen dat de schepen sterk inzinken bij het opvaren op de suppletie (van boven- naar benedenstrooms).

Na aanleg van de suppletie-pilots in de Boven-Rijn is geconstateerd dat de amplitudes van het alternerende erosie- en sedimentatiepatroon gerelateerd zijn aan de dikte van de suppletie. Uit boven beschreven modelberekeningen is dat verschil niet duidelijk naar voren gekomen (verschil tussen varianten 1 – opvullen – en 2 – 1 m profielvolgend). Echter lijkt de erosie van met name suppletievariant 1 in het model in het eerste jaar overschat te worden. Het is dus mogelijk dat de morfologische reactie in de eerste tijd na aanleg in werkelijkheid groter zou uitvallen dan voorspeld door het model. Dat zou kunnen leiden tot meer onderhoudsbaggerwerk dan voorspeld en dus ook meer hinder voor de scheepvaart.

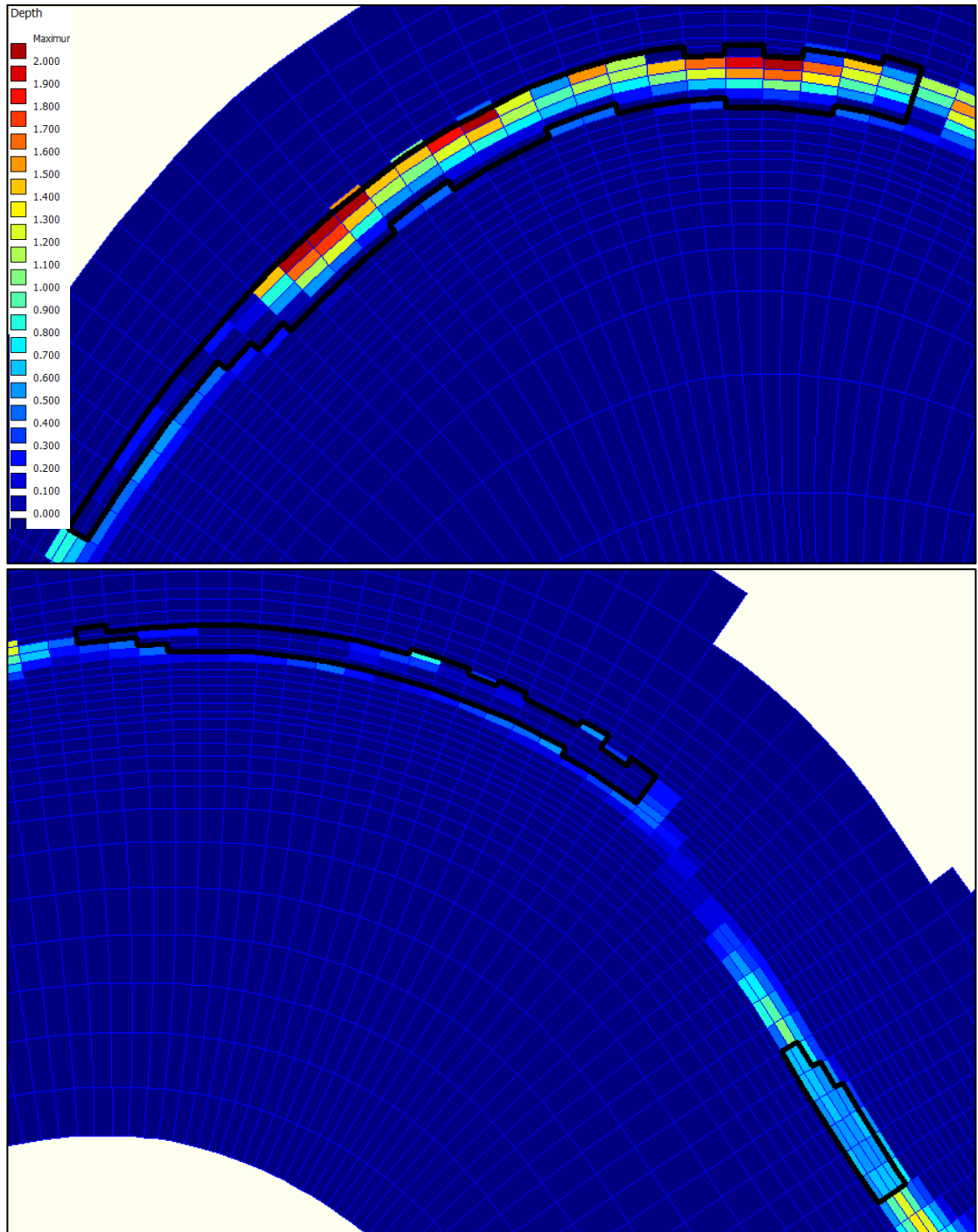
In de BasisRivierbodemplanning (BRL) is een aantal functie-eisen opgenomen die gerelateerd zijn aan de rivierbodem. Op verzoek van scheepvaart-deskundigen zit naast de standaard baggervlakken ook een eis voor vlot varen. Deze eis komt voor de Waal neer op 40% kielspeling bij OLR-2,8 m. Dit betekent dat de bovengrens voor de bodem in het studiegebied OLR-4.0 m is. Varianten 1 en de daarvan afgeleide varianten 3 t/m 5 uit deze studie voldoen daaraan direct na aanleg niet, deze gebruiken de ruimte tot OLR-3,5 m. Variant 2 voldoet alleen langs de binnenrand en in het meest benedenstrooms gelegen stuk niet aan deze eis, en variant 6 voldoet in de buitenbocht nagenoeg helemaal niet (Figuur 37).



Figuur 35 Waalbocht bij Hulhuizen met omtrek van de suppletievariant 1 (grijs) en 2 (rood), en bocht van de suppletiepilots in 2016 en 2019 (rkm 862-864)



Figuur 36 AIS-tracks van een willekeurig opvarend schip in de bochten bij Sint Andries/Heesselt (boven) en bij Nijmegen (onder). (bron vaartrack: Indah-Everts & Hermans, 2021)



Figuur 37 Ruimte onder OLR-4,0 m bij variant 2 (boven) en variant 6 (onder) direct na aanleg. Alle cellen in het donkerste blauw liggen boven OLR-4,0 m, de anders gekleurde cellen liggen eronder.

3.3.3 Inundatiefrequentie uiterwaarden en instroom van nevengeulen

Bijlage F.1 toont de invloed van de suppletie op de waterstanden direct na aanleg. In de loop der tijd zal de invloed langzaam afnemen omdat de suppletie afvlakt. De suppletie beïnvloedt de waterstanden maar met enkele centimeters en heeft daarom naar verwachting maar weinig invloed op de inundatiefrequentie van de uiterwaarden en instroom van nevengeulen langs de Rijntakken.

4 Conclusies en aanbevelingen

Voor de invloed op de afvoerverdeling is het niet relevant op welke manier het sediment gestort wordt, profielvolgend of door opvullen tot een bepaald niveau. Relevant is alleen het volume van de suppletie. Een suppletie in de bocht bij Haalderen ligt verder weg van het splitsingspunt en heeft daarom minder invloed op de afvoerverdeling. Voor een verandering in de afvoerverdeling van (initieel) 5-10 m³/s is een volume van orde 250.000 m³/s in de bocht bij Hulhuizen nodig. Bij suppletie in de bocht bij Haalderen zal een duidelijk groter volume nodig zijn.

Het opvullen van overdiepten bijvoorbeeld in buitenbochten resulteert in een asymmetrische suppletie en daarmee in een asymmetrische respons. De ligging van het benedenstroomse einde van de suppletie bepaalt of het patroon van de morfologische reactie in fase of antifase ligt met de geometrie van het rivierbed. De amplitudes van het geforceerde alternerende sedimentatie- en erosiepatroon zijn direct benedenstrooms duidelijk afhankelijk van de dikte van de suppletie maar wel minder groot dan de dikte van de suppletie. In benedenstroomse richting neemt het verschil tussen de amplitudes door verschillende suppletiediktes af.

De suppletie beïnvloedt de vaardiepte bij laagwater door bodemveranderingen en door opstuwung bovenstrooms van de suppletie maar lagere waterstanden benedenstrooms ervan vanwege de invloed op de afvoerverdeling. Een suppletie in de bocht bij Hulhuizen zou stroomafwaarts moeten doorlopen tot ongeveer rkm 871,9, net iets verder dan de doorgerekende varianten 1 en 2, omdat anders het patroon van alternerende verhoging en verlaging van de bodem ten opzichte van de situatie zonder suppletie ongunstig komt te liggen. De bodem in de tweede helft van de binnenbocht en bij de niet-baggerlocatie daar zou dan hoger komen te liggen, terwijl er daar geen ruimte voor is. Dit heeft wel negatieve gevolgen voor de MGD-locatie bij rkm 876 in de bochtvergang van de bocht bij Erlecom naar de bocht bij Haalderen. Mogelijk is een combinatie van een suppletie in de bocht bij Hulhuizen met het opvullen van de kuil benedenstrooms van de bodemkribben bij Erlecom denkbaar, dat laatste is immers weer gunstig voor de ontwikkeling van de MGD-locatie (zie variant 6), omdat de kuil naast de MGD-locatie ligt en opvullen van de kuil daarom voor erosie op de MGD-locatie zal zorgen. Het opvullen van de kuil lijkt daardoor een no-regret actie.

Door de aanzanding in de binnenbocht bij Hulhuizen, net benedenstrooms van de suppletievarianten 1 en 2, en in de binnenbocht bij Haalderen kan er volgens deze kaart bij varianten 1 t/m 5 een probleem ontstaan dat niet door vaargeulonderhoud verwijderd kan worden. Bij variant 6 vindt er aanzanding plaats op de niet-baggerlocaties benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen. Aan de rechterkant van de rivier is er daar geen ruimte voor.

Door de veranderde afvoerverdeling wordt de waterstand en daarmee ook de vaardiepte benedenstrooms van de suppletie direct na aanleg bij OLA ongeveer 1,5-2,5 cm verlaagd. Dit geldt dus ook voor de bekende knelpunt bij de vaste laag bij Nijmegen.

Om een lokaal te sterke dwarsstroming te voorkomen wordt aanbevolen in het geval van opvullen tot OLR-3,5 m de suppletie aan de bovenstroomse kant een geleidelijk toenemende dikte toe te passen in plaats van de abrupte overgang uit deze studie, of de suppletie naar bovenstrooms door te trekken tot er geen ruimte onder OLR-3,5 m meer is.

De in deze studie geanalyseerde ontwerpen voldoen niet aan de signaleringswaarde voor vlot varen uit de BasisRivierbodemLigging (BRL), die vraagt om minstens 40% kielspeling bij OLR-2,8 m.

In de binnenbocht bij Hulhuizen neemt de baggerlast in de eerste 10 jaar duidelijk af door de verdieping van de binnenbocht als reactie op de suppletie. Dat effect neemt af naarmate de verdieping na verloop van tijd weer kleiner wordt. Bij de MGD-locatie bij rkm 876-877, in de bochtovergang Erlecom-Haalderen, en verder benedenstrooms op de Boven-Waal neemt de baggerlast licht toe door de suppletie.

In de bocht bij Hulhuizen is er ruimte voor een vrij dikke suppletie, lokaal tot orde 3 m dikte, en er zijn grote volumes nodig om een voldoende grote invloed op de afvoerverdeling te bereiken. Een dikkere suppletie veroorzaakt echter een grotere (initieel snellere) morfologische reactie. Dit is in principe onafhankelijk van het type suppletie, maar bij het vlakvullend opvullen worden over het algemeen grotere diktes gerealiseerd dan bij een profielvolgende suppletie. Daarnaast kan een dikkere suppletie leiden tot grotere overgangen en daarmee lokale verschijnselen (zoals ontgronding), grotere parallelle erosie en daarmee nieuwe dynamiek en grotere bodemverandering en daardoor langer selectief transport ter plaatse van de stort, en daarmee tot een grotere invloed van de korrelverdeling in het gestorte mengsel. Daarom wordt aanbevolen om in eerste instantie de dikte van de suppletie te beperken tot bijvoorbeeld 1,5 m. Dat is iets meer dan de dikte van 1 m heeft van de tweede suppletie-pilot op de Boven-Rijn, die niet tot problemen heeft geleid. De effecten zullen dan zichtbaar zijn, maar naar verwachting controleerbaar blijven. Als daarmee in de praktijk goede ervaring opgedaan is kan een volgende suppletie weer dikker aangebracht worden.

Het is mogelijk dat de scheepvaart tijdens de aanleg van de suppletie meer hinder ervaart dan op de Boven-Rijn, omdat de Waal smaller is en de schepen vanwege de scherpe bochten moeten drijven en dus meer ruimte nodig hebben.

Zowel het 1D-gedrag als het 2D-gedrag van de fijnere variant 1 en de grovere variant 4 verschillen niet significant, alleen gaat de ontwikkeling van de 2D-patronen bij de grovere varianten 3 en 4 langzamer, en bij variant 4 ook het toevoegen van sediment aan het systeem benedenstrooms¹⁰.

Voor een goede balans tussen relatief lang blijven liggen, maar ook bijdragen aan het toevoegen van het sediment aan het systeem zou de suppletie in ieder geval de fracties fijn grind (fracties 5 en 6) en matig grof grind (fracties 7 en 8) moeten bevatten. Suppleties met alleen zand bewegen volgens de modelberekeningen dusdanig snel stroomafwaarts dat de invloed op de afvoerverdeling al snel zou verdwijnen mits deze niet frequent worden herhaald. Zeer grof grind van meer dan 16 mm korrelgrootte beweegt alleen nog bij grotere hoogwater of helemaal niet. Bij zeer grove suppleties kan bovendien een erosiegolf benedenstrooms worden opgewekt die mogelijk tijdelijk kan leiden tot verlaging van waterstanden tot aan de Pannerdensch Kop, en dus een averechts effect oplevert op de afvoerverdeling. Deze situatie is niet in de berekeningen opgetreden, maar is in theorie niet uit te sluiten.

Deze samenstelling is afgeleid uit de mobiliteit van het sediment in het model. Echter, dit is sterk afhankelijk van de gebruikte transportmodellen (transportformules) en onvoldoende gedetailleerde gegevens om deze transportmodellen exact te kalibreren. Om te voorkomen dat ongewenste vergroving leidt tot erosiegolven is het dus aan te bevelen om te zorgen dat

¹⁰ Variant 3 is gemodelleerd als vaste laag en voegt daarom geen sediment toe aan het systeem.

het mengsel een voldoende brede sortering heeft (dus ook voldoende zandfracties), en daarmee te kiezen voor een meer frequente suppletie.

Er wordt geschat dat de invloed van de suppletie op de hoogwaterstanden beperkt blijft tot maximaal enkele centimeters. Ook over het volledige afvoerspectrum beïnvloedt de suppletie de waterstanden maar met enkele centimeters en heeft daarom naar verwachting maar weinig invloed op de inundatiefrequentie van de uiterwaarden langs de Rijntakken en dus op de ecologie.

Het nieuwe semi-vaste lagen module kan gebruikt worden voor berekeningen met het DVR-model en om het gedrag van een suppletie te voorspellen. Er wordt echter aanbevolen om het model van tevoren opnieuw af te regelen (instellingen van het semi-vaste lagen module en/of kalibratieparameters uit de sedimenttransportformule en voor het 2D-gedrag) en om te controleren of de daarmee berekende resultaten beter zijn dan met het huidige concept.

In de BasisRivierbodemLigging (BRL) zijn een aantal functie-eisen opgenomen die gerelateerd zijn aan de rivierbodem. Het ontwerp kan met de BRL gedeeld worden om het te toetsen aan de functie-eisen. Dit zal hooguit een eerste indicatie geven van de gevolgen en zal minder precies zijn dan het bovenstaande, maar kan gebruikt worden om te oefenen met de BRL

5 Literatuur

- Achtersloot, R.C., C.H. Michels, R. van der Veen (2019): Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijntakken 2019. Juni 2019.
- Becker, A. (2020): Tweede suppletie Boven-Rijn: tussenevaluatie hoogwater 2020. Deltares-memo 11205234-010-ZWS-0001, December 2020.
- Chavarrias, V., W. Ottevanger, E. Mosselman (2020): Morphodynamic modelling over alluvial and non-alluvial layers. Literature review, update to Tuijnder concept. Deltares-rapport 11205235-016-ZWS-0006_v0.1, december 2020.
- Chavarrias, V., W. Ottevanger (2021): Modelling morphodynamics in the presence of immobile sediment. Model testing and sensitivity analysis. Deltares-rapport 11206793-014-ZWS-0002, juni 2021.
- Hydrologic (2020): Duiding Afvoerverschuiving op Splitsingspunt Pannerden. Memo P1160. 17 maart 2020.
- Jans, L., D. van Putten, H. Veldman, S. Quartel en A. Sieben (2018): Toelichting Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON; versie 2018.1. Memo RWS Oost-Nederland, 1 november 2018.
- De Jong, J. (2020): Effect van een nieuwe bodemhoogte 2050 op de waterstanden en afvoeren op de Rijntakken. Deltares-memo 1203738-005-BGS-0011, januari 2020.
- Indah-Everts, S.N. & Hermans, M.I (2021). Evaluatie pilot langsdammen Waal; interpretatie AIS-data. MARIN rapport met kenmerk 32127-1-MO-rev.1.0. 25 februari 2021.
- Niesten, I., W. Ottevanger, A. Becker (2017): Riviersuppleties in de Rijntakken. Conclusies 1e suppletie Boven-Rijn en advies voortzetting monitoring. Deltares-rapport 1200877-000-ZWS-0005, september 2017.
- Ottevanger, W., S. Giri, K. Sloff (2015): Sustainable Fairway Rhinedelta II: Effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta program and training walls, Deltares-rapport, 2015.
- RWS WVL (2019): Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Versie 5.0, 4 juni 2019.
- Sloff, K. (2019): Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares-rapport 11203738-005-8GS-0008, 2019.
- Sloff, K. R. van der Sligte, W. Ottevanger (2014): Morfologische Pakketsom Waal. Morfologische effecten Ruimte-voor-de-Riviermaatregelen.
- Verbeek, M. (2021): De IJssel kreeg minder water: De ontwikkeling in de verdeling van lage Rijnafoeren in de afgelopen 32 jaar. RWS-memo in concept, 24-9-2021.
- White, S. en A. Blom (2020): Comparing the morphological impact of three fixed beds on the River Waal. Powerpoint presentative, juli 2020.

A Details over de modelschematisatie

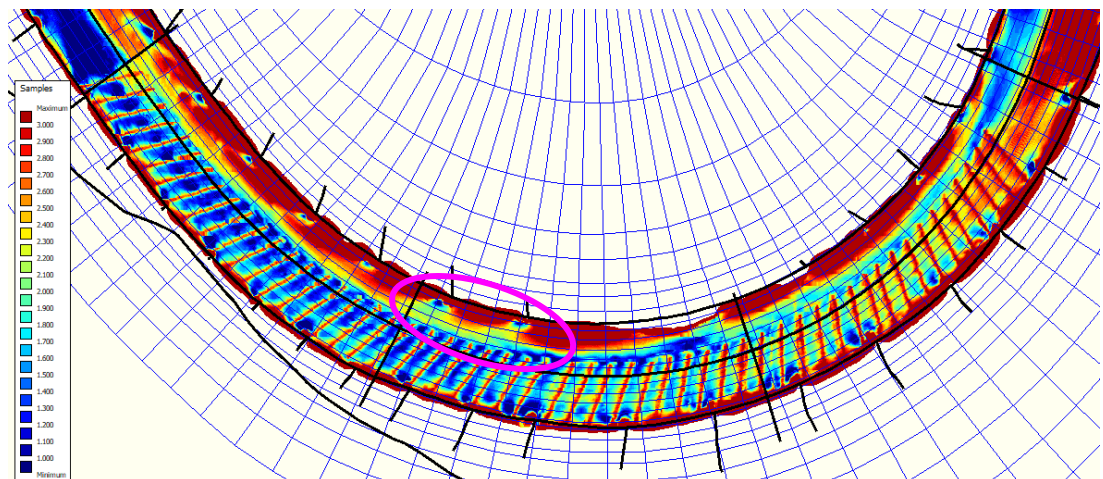
A.1 Bodemligging bij de vaste laag Erlecom

In de eerste modelberekeningen voor het inspelen van de bodemligging viel op dat de bodem in de binnenbocht naast de vaste laag bij Erlecom vrij snel erodeert, duidelijk sneller dan de erosietrend van orde 30-40 cm in 5 jaar die volgens onderzoek van Sloff (2019) en van White en Blom (2020) te verwachten is (Figuur 39, boven, en donkerblauwe stippels in Figuur 40 t/m Figuur 43). Om de erosietrend in het model af te remmen is de schematisatie van de vaste laag in het model aangepast.

In de onderzochte varianten is of de bodemligging in de buitenbocht, dus bij de vaste laag, verhoogd, of de ruwheid verlaagd:

- Orig = met bodemhoogte uit peilingen 2020-02, niet aangepast
- Erl-30cm: verlaging van de bodem in de buitenbocht, bij de bodemkribben, met 30 cm
- Erl-50cm: verlaging van de bodem in de buitenbocht, bij de bodemkribben, met 50 cm
- Erl-kN0p5: verlaging van de ruwheid in de buitenbocht, bij de bodemkribben, van $kN=0.68$ m naar $kN=0.5$ m

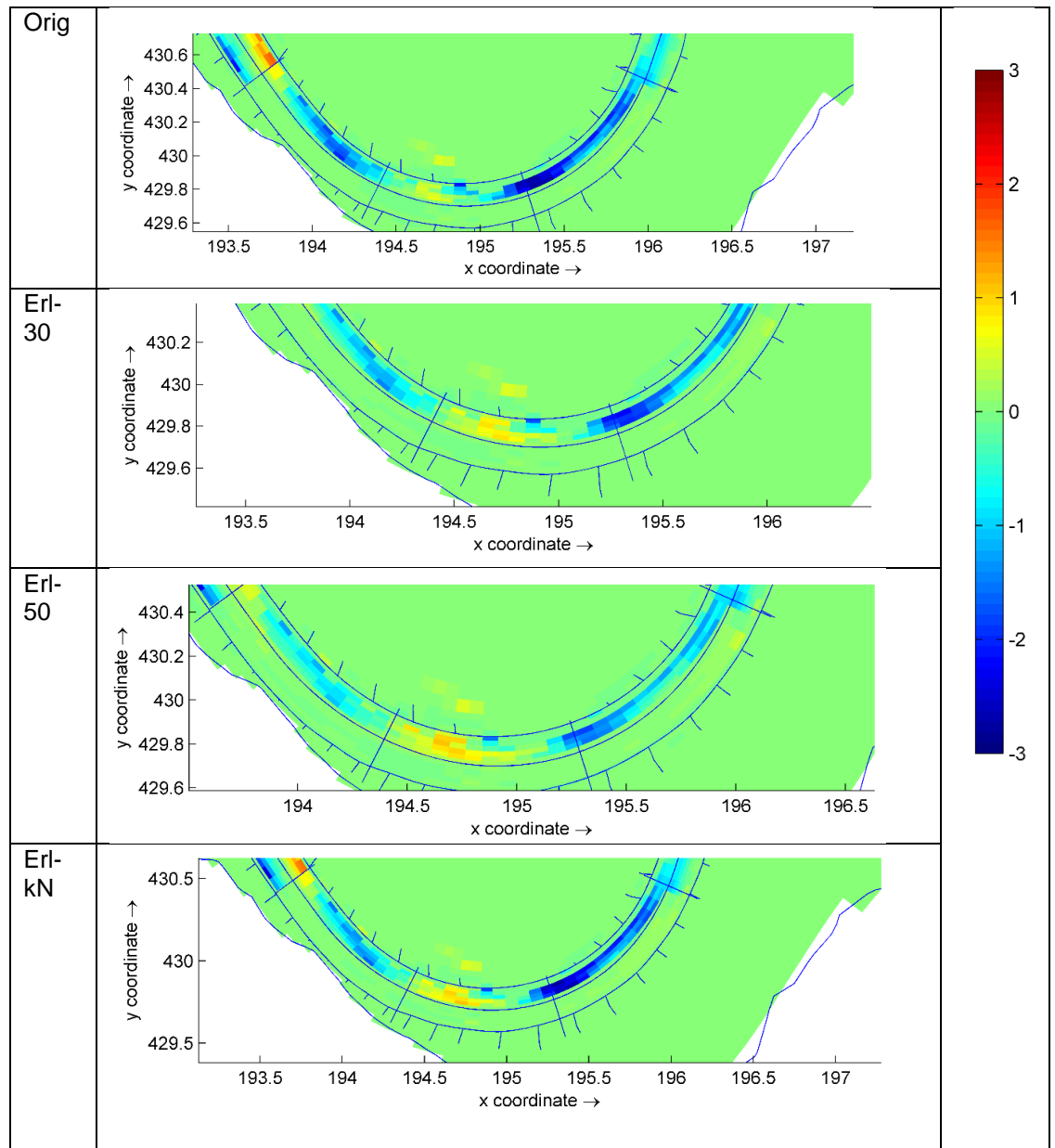
Volgens de peilingen 2020-02 (Figuur 38) liggen de kruinen van de bodemkribben op orde 2.70m+NAP tot 3.00m+NAP en iets meer dan 1 m hoger dan de bodem (helemaal bovenstrooms minder). Een verlaging van de bodem in de buitenbocht bij de kribben in het model van 50 cm lijkt nog acceptabel, veel meer niet.



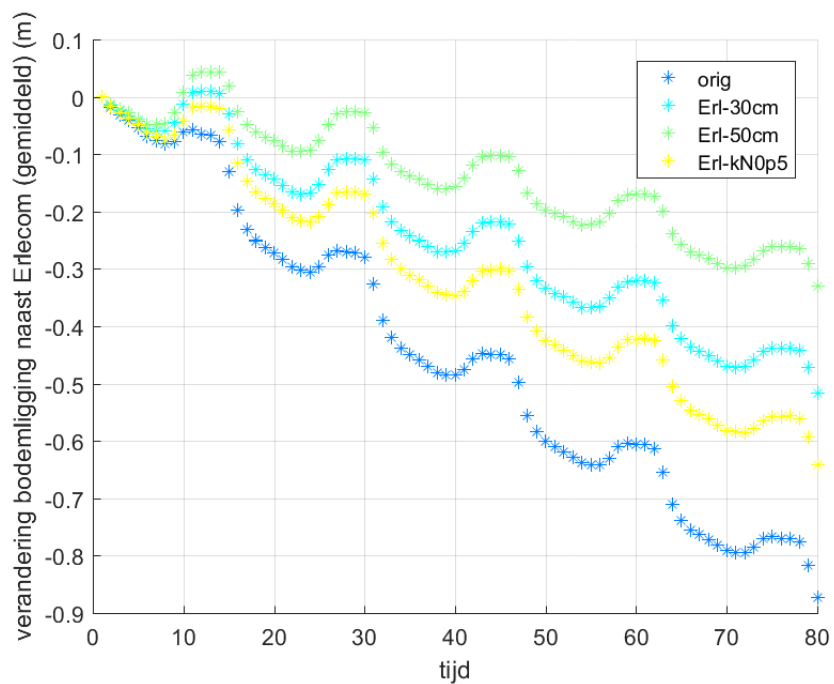
Figuur 38 Peilingen 2020-02 in de bocht bij Erlecom.

De figuren hieronder tonen de bodemontwikkeling in het model. Tussen rkm 873 en 874,3 en tussen rkm 874,9 en 875 erodeert de bodem in de binnenbocht continu. Daartussen vindt er aanzanding plaats, dat is het gebied met de bijzonder diepe 'groyne flames' in het figuur hierboven. Dat detail kan door het model niet gereproduceerd worden.

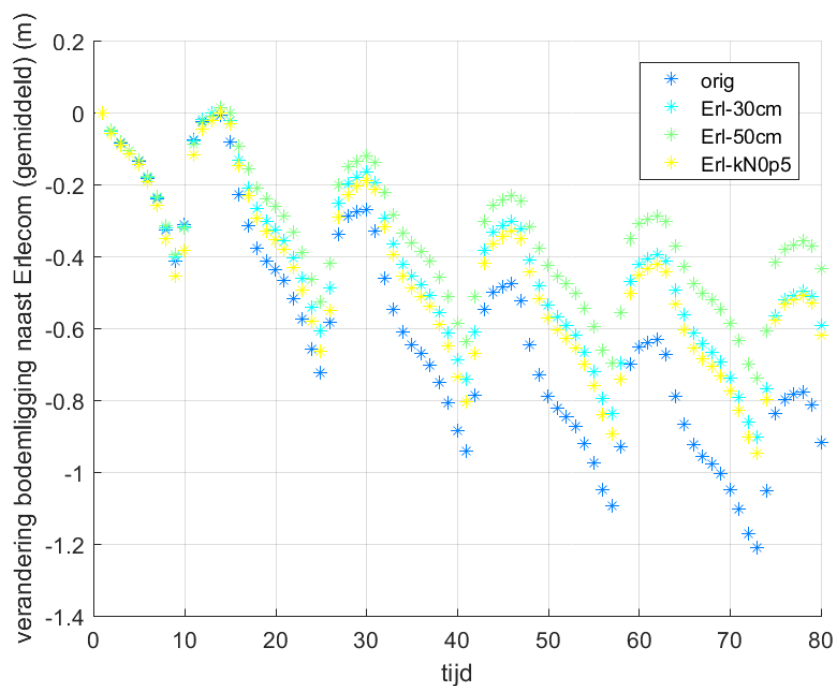
Door de aanpassingen in hoogte of ruwheid van de buitenbocht kan de erosie in de binnenbocht duidelijk gereduceerd worden, met name in het gebied bovenstrooms van het gebied met aanzanding. De aanzanding wordt echter ook groter. Ook bij een verlaging van de buitenbocht met 50cm (Erl-50cm) lijkt de erosie nog iets sterker dan verwacht. Een nog grotere aanpassing aan de bodem lijkt echter niet meer verantwoord gezien de absolute hoogte van de bodemkribben ten opzichte van de bodemhoogte. Daarom is er gekozen voor variant "Erl-50" als uitgangspunt voor deze studie.



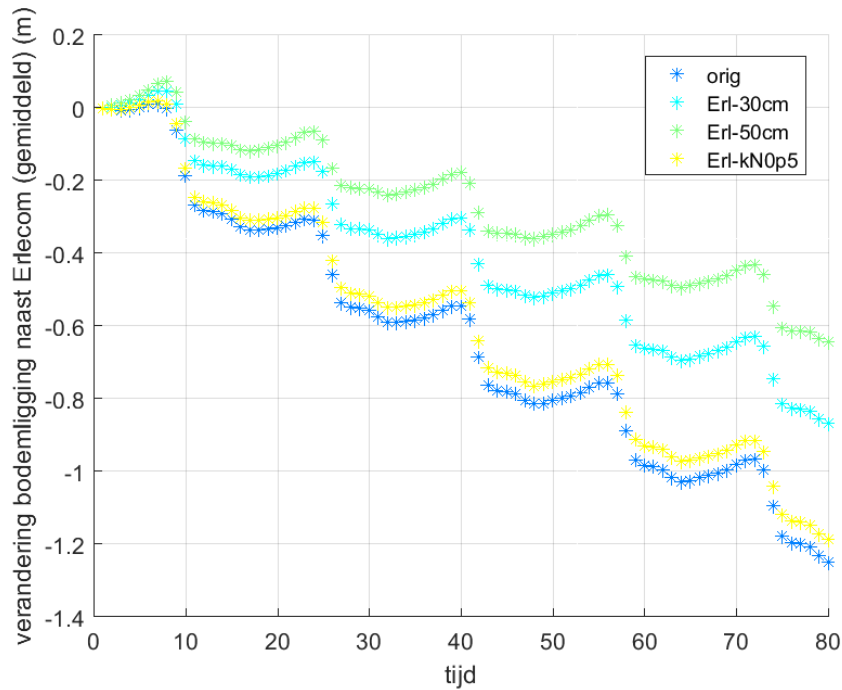
Figuur 39 Ontwikkeling van de bodemligging naast de vaste laag bij Erlecom in 5 jaar in de modelberekeningen.



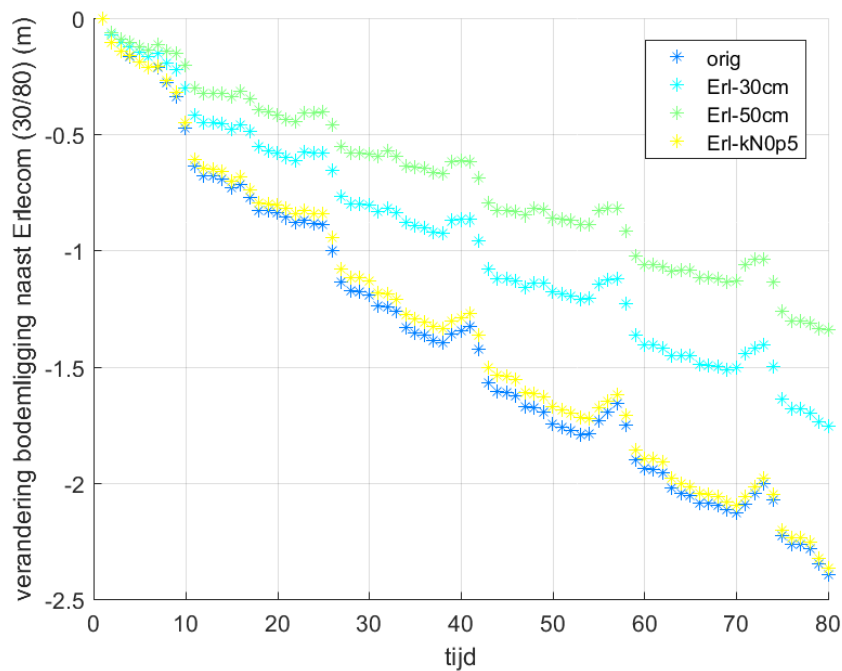
Figuur 40 Ontwikkeling van de bodemligging gemiddeld over de hele binnenbocht naast de bodemkribben. (x-as: 1 jaar = 16 stippels, 80 stippels = 5 jaar)



Figuur 41 Ontwikkeling van de bodemligging gemiddeld over alleen de binnenbocht benedenstrooms van de locatie met aanzanding. (x-as: 1 jaar = 16 stippels, 80 stippels = 5 jaar)



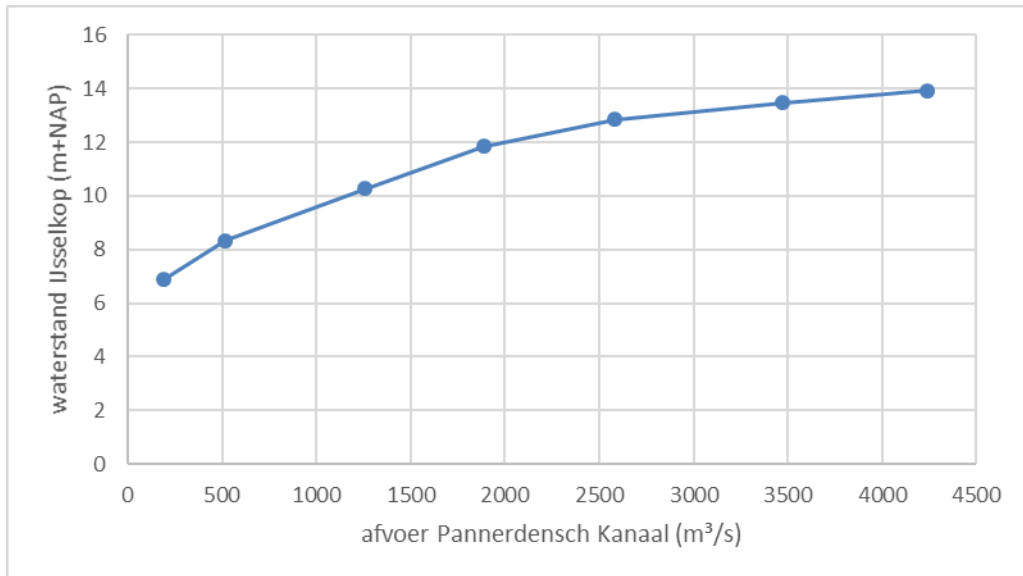
Figuur 42 Ontwikkeling van de bodemligging gemiddeld over alleen de binnenbocht bovenstrooms van de locatie met aanzanding. (x-as: 1 jaar = 16 stippels, 80 stippels = 5 jaar)



Figuur 43 Ontwikkeling van de bodemligging op locatie $m=30$, $n=80$, niet gemiddeld. Dit is een van de punten die het sterkst eroderen. (x-as: 1 jaar = 16 stippels, 80 stippels = 5 jaar)

A.2 Randvoorwaarden benedenranden

Figuur 44 en Tabel 2 laten de gebruikte Qh-relatie op de benedenrand van het model bij de IJsselkop (deeldomein pk2) zien. Tabel 3 toont in de eerste kolom de afvoerniveaus die worden opgelegd op de bovenrand bij Xanthen/Niederrhein (deeldomein br0). De tweede en derde kolom laten zien welke afvoer bij deze afvoerniveaus volgens het model sobek-rijn-j19_5-v1 naar de Waal gaan en welke waterstanden bij rkm 953/Gorinchem daarbij horen (Achtersloot et al., 2019). Deze waterstand is als vaste waterstand per afvoerniveau opgelegd op de benedenrand Van deeldomein wl2c.



Figuur 44 Qh-relatie op benedenrand van het model bij de IJsselkop, deeldomein pk2.

Tabel 2 Qh-relatie op de benedenrand van het model bij de IJsselkop, deeldomein pk2.

Q Pann. Kanaal (m³/s)	h IJsselkop (m+NAP)
188.06	6.87
517.96	8.33
1260.14	10.26
1885.89	11.86
2584.90	12.86
3469.48	13.48
4240.20	13.92

Tabel 3 Waterstand op de benedenrand van het model bij Gorinchem, deeldomein w12c.

Q Xanthen/Niederrhein (m ³ /s)	Q Waal (SOBEK-model ¹¹) (m ³ /s)	h Waal-rkm 953 (m+NAP)
1020	831.9402	0.7164
1203	953.3356	0.7799
1635	1239.9083	0.9298
2250	1639.2636	1.1457
3053	2144.2795	1.4326
3824	2629.1702	1.7081
4717	3232.5292	2.1042
6151	4212.3380	2.7482
8592	5745.2599	3.4847

A.3 Invloed van de actieve laagdikte op de sedimentsamenstelling

De figuren in deze bijlage tonen de sedimentsamenstelling na afloop van de tweede inspeelstap, vgl. paragraaf 2.3.

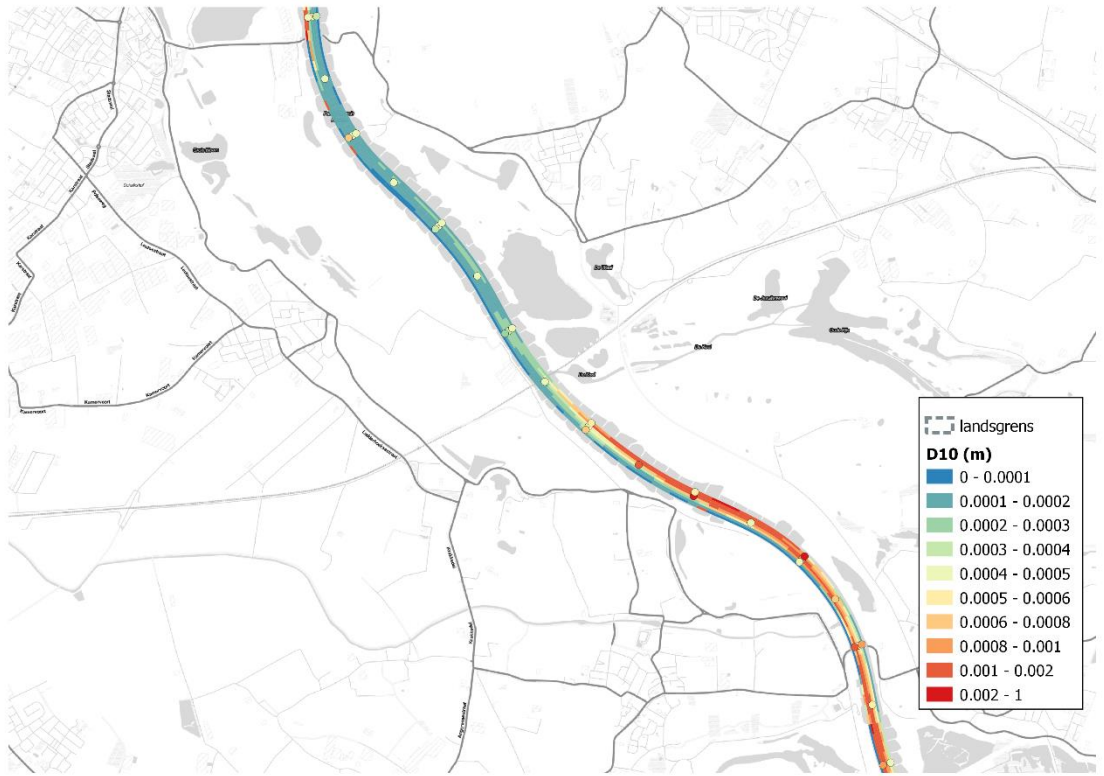
A.3.1 Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,06$

A.3.1.1. D10

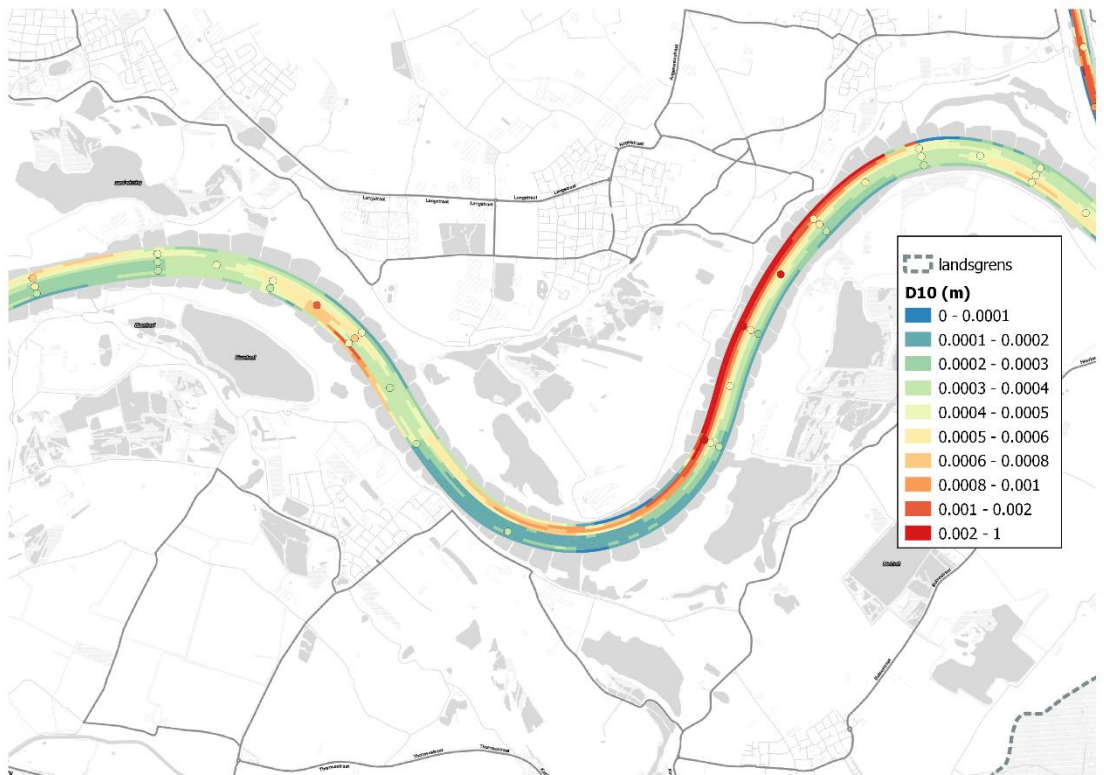


Boven-Rijn en Pannerdensche Kop

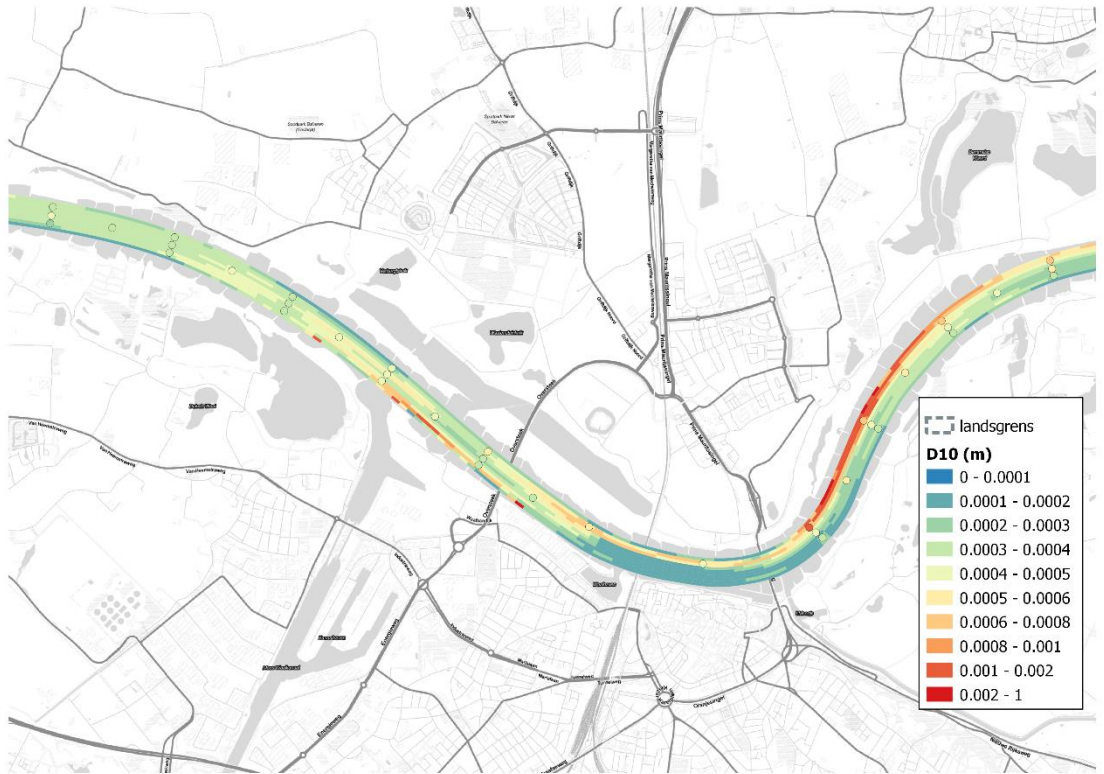
¹¹ sobek-rijn-j19_5-v1 (Agtersloot et al., 2019)



Pannerdensch Kanaal

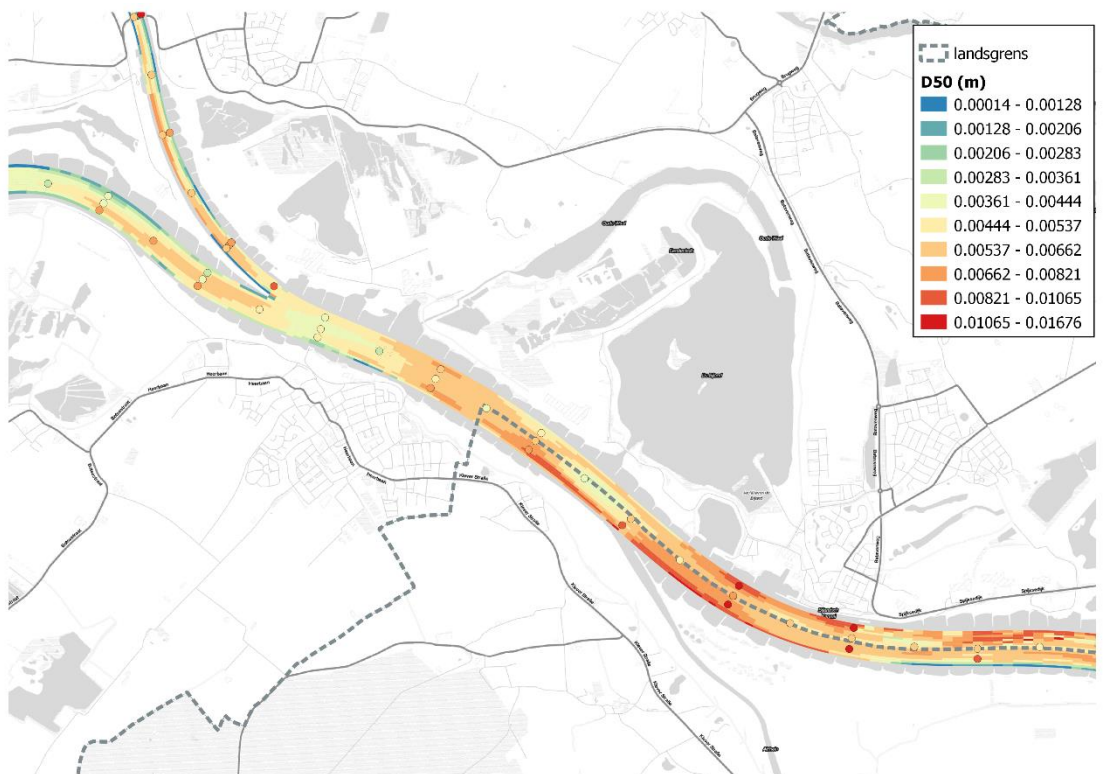


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

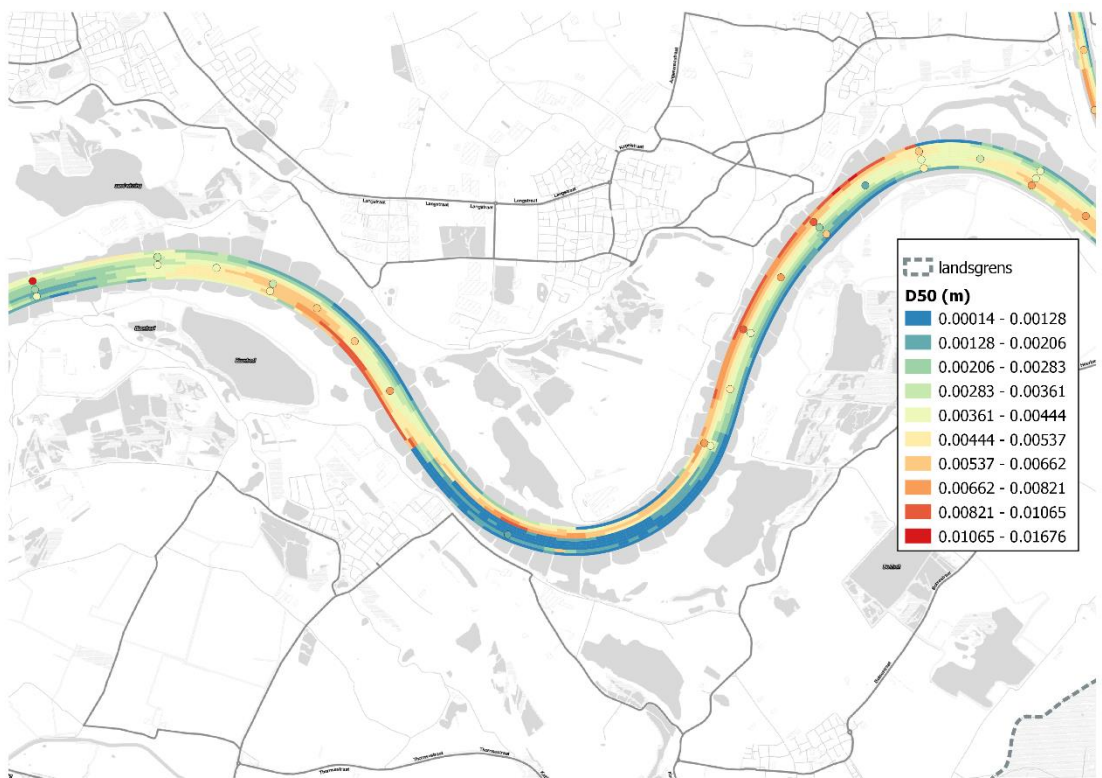
A.3.1.2. D50



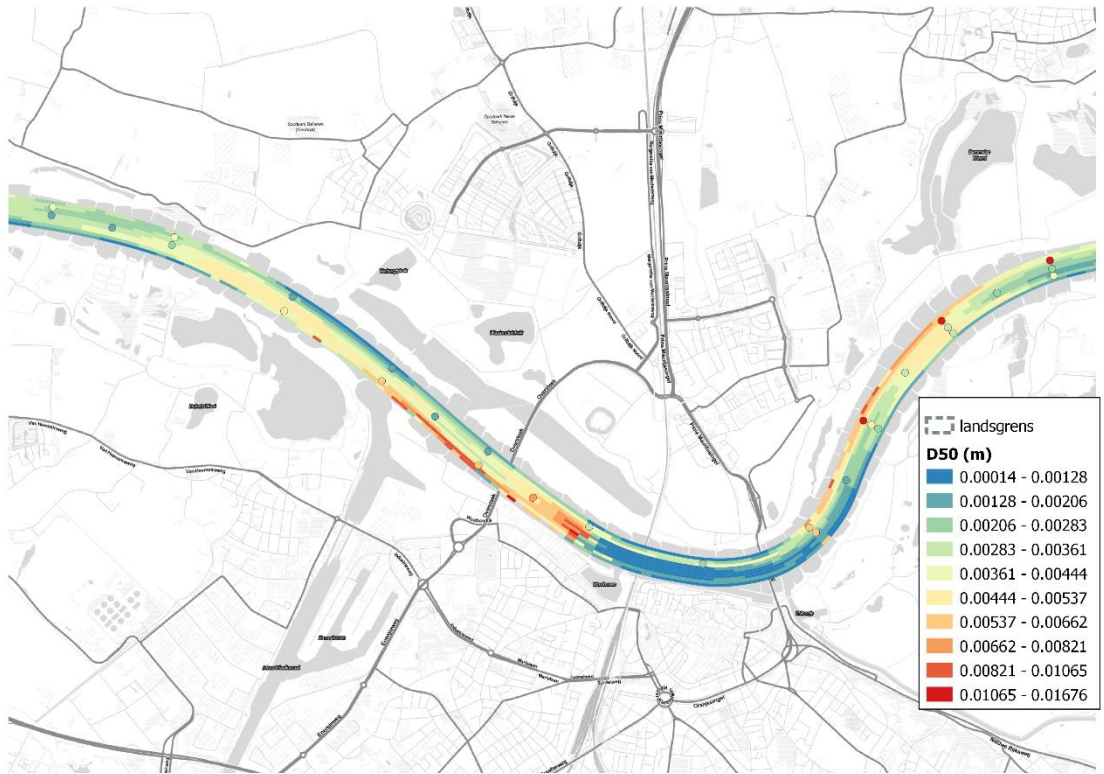
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal

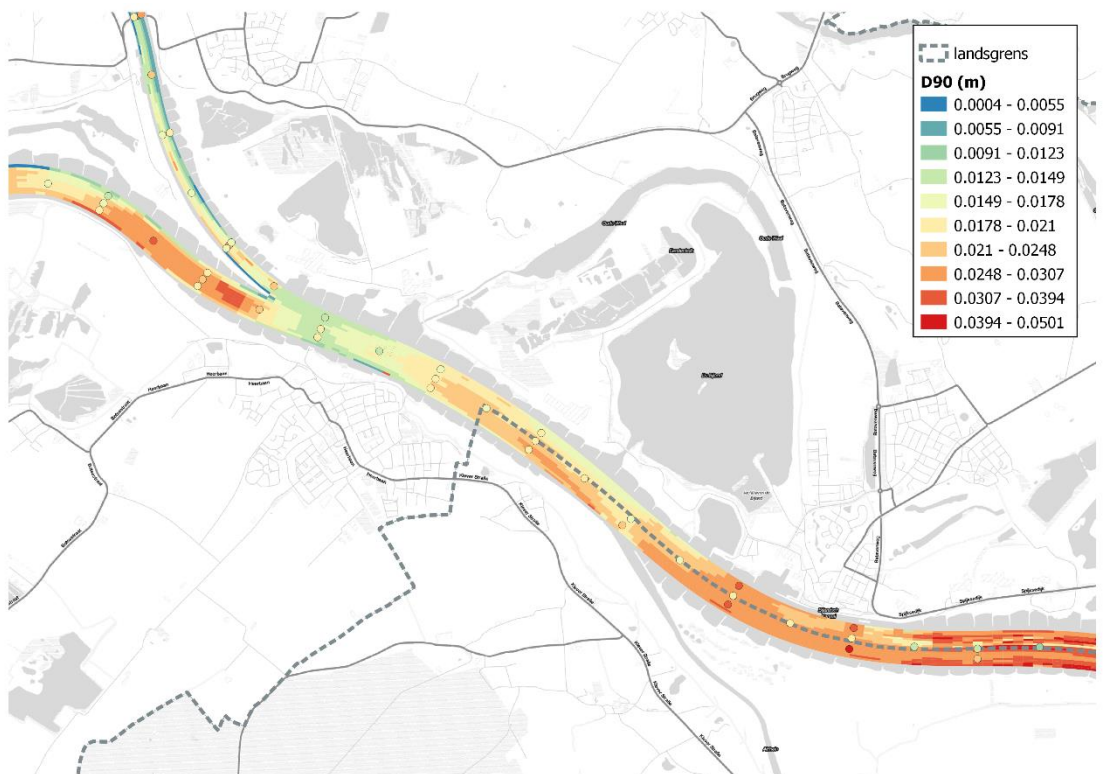


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

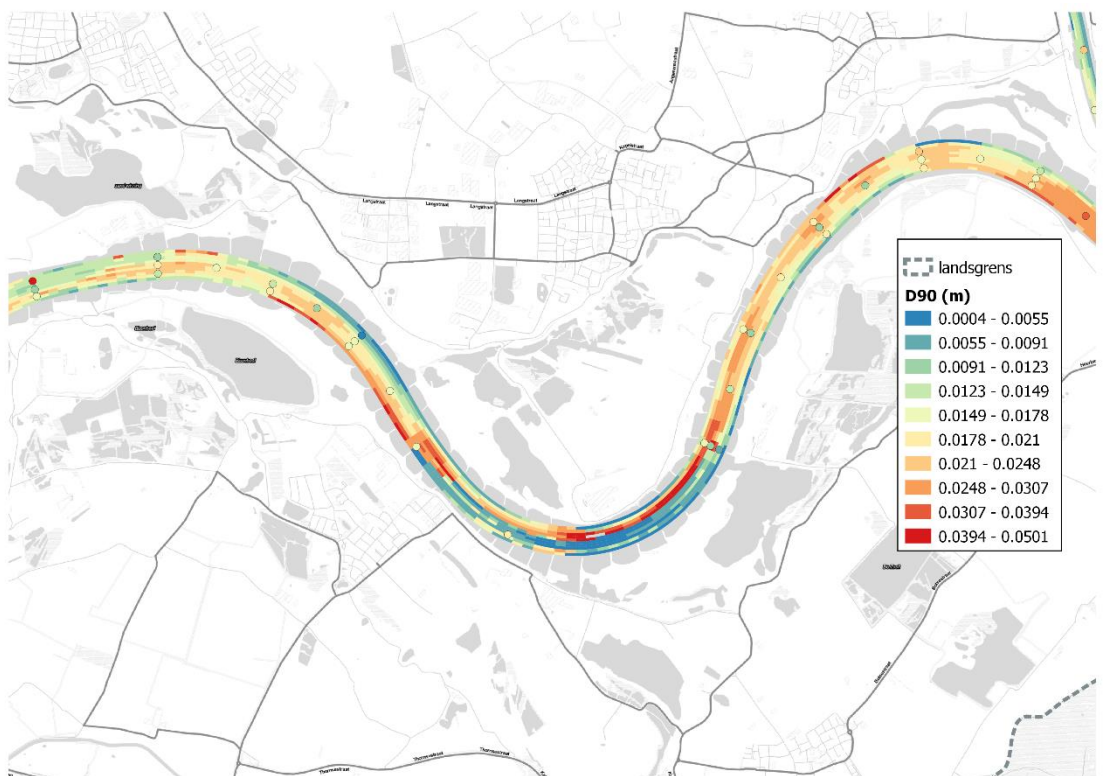
A.3.1.3. D90



Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

A.3.2 Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,12$

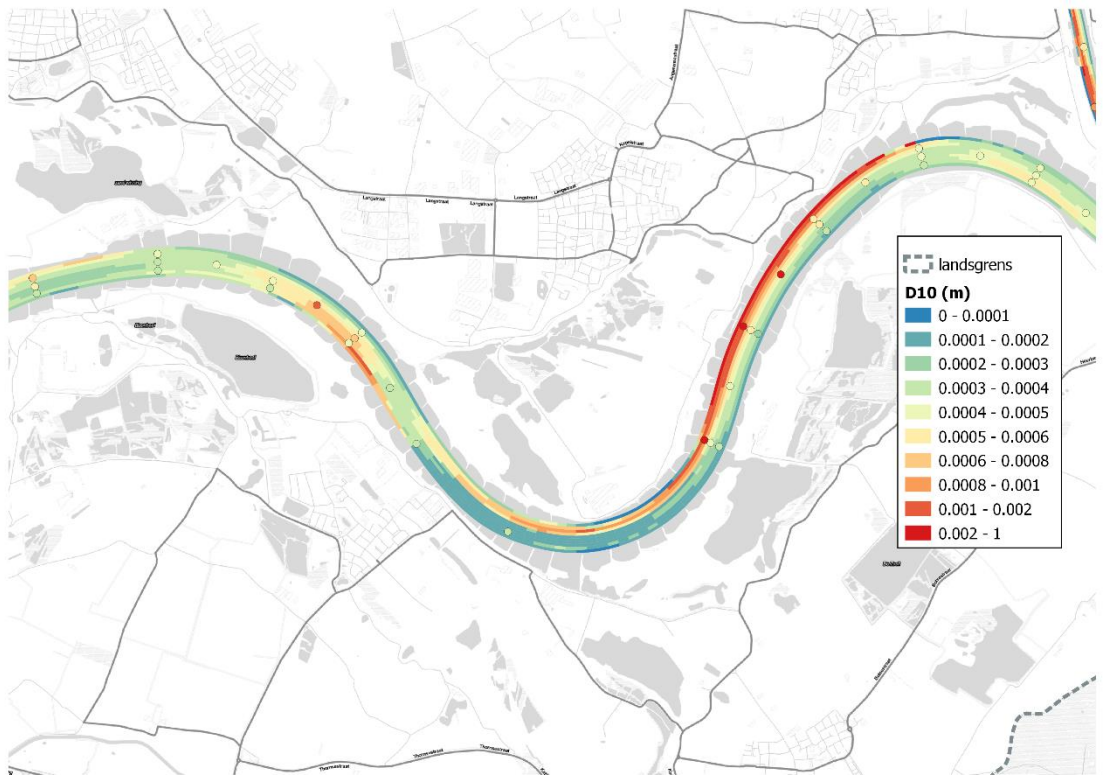
A.3.2.1. D10



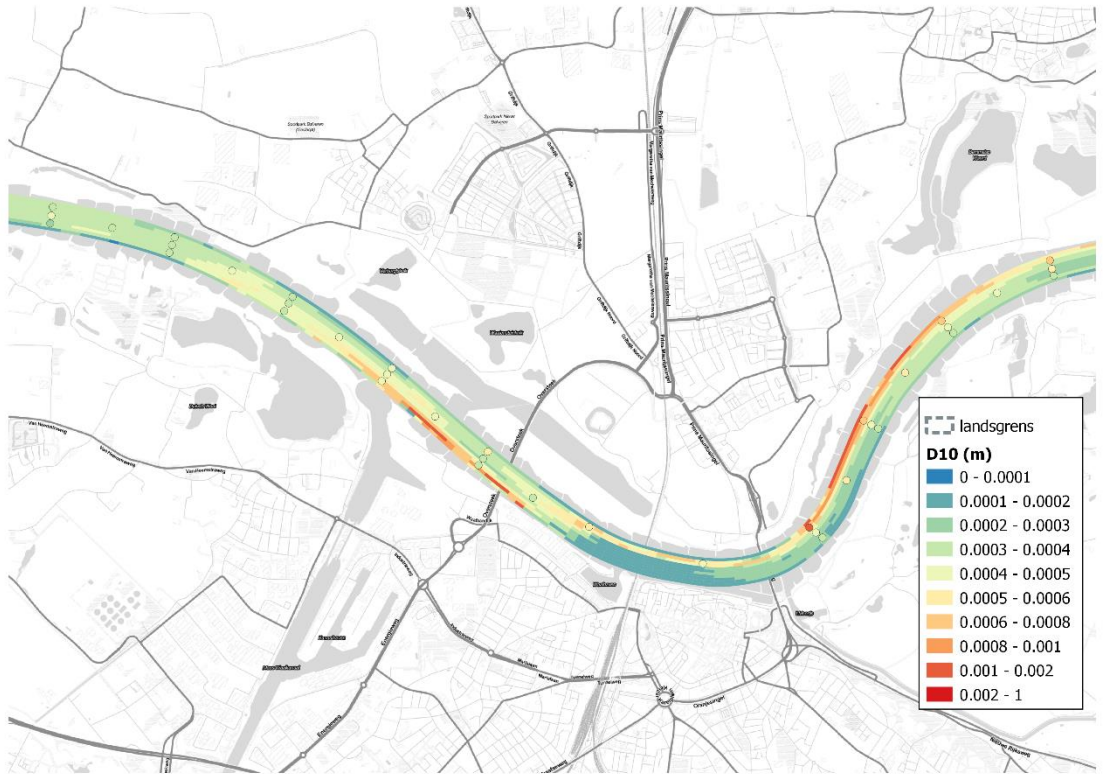
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal

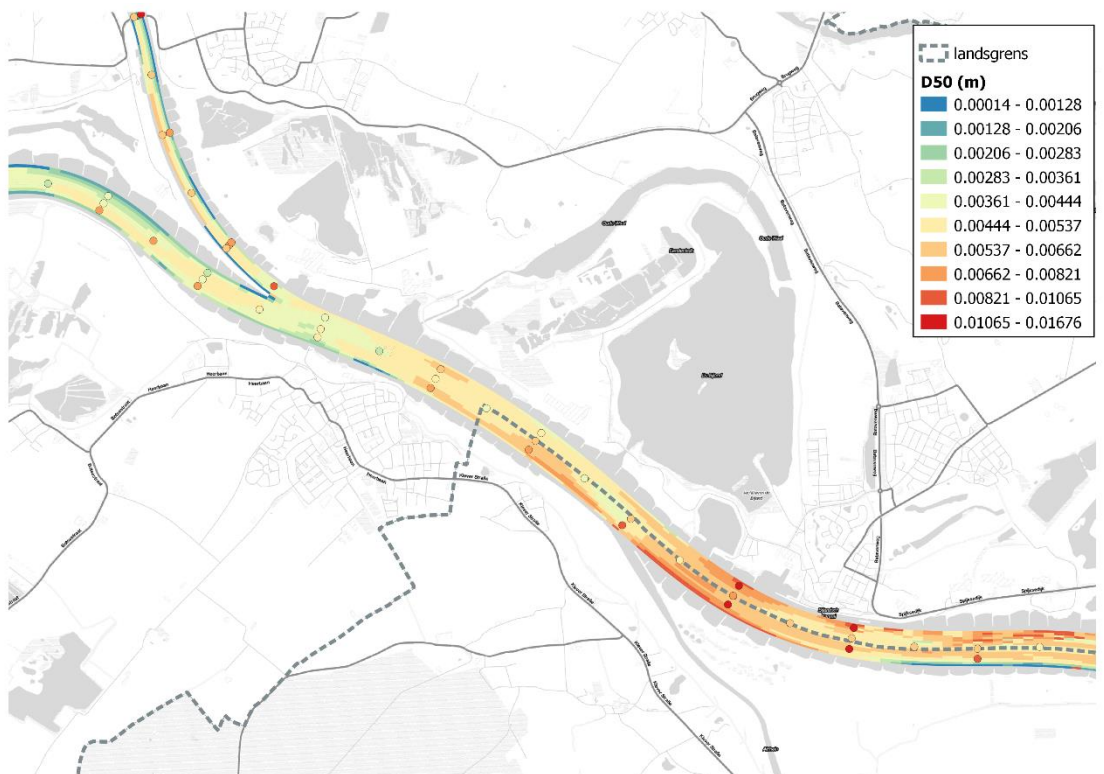


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

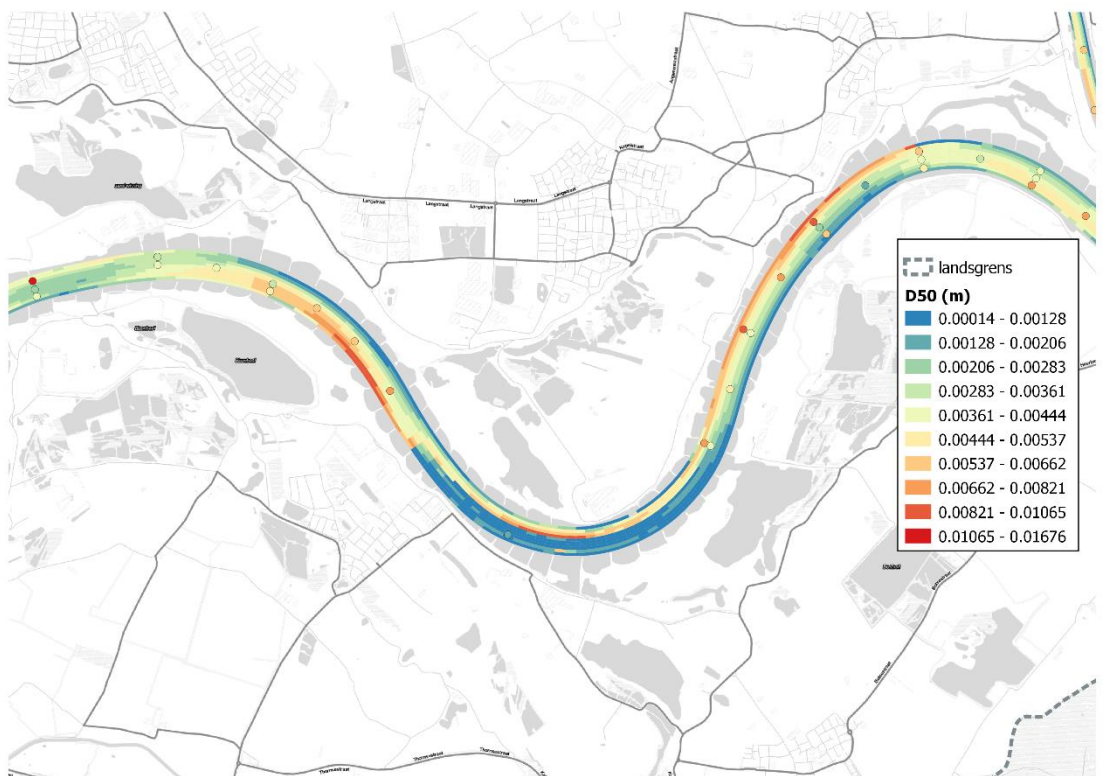
A.3.2.2. D50



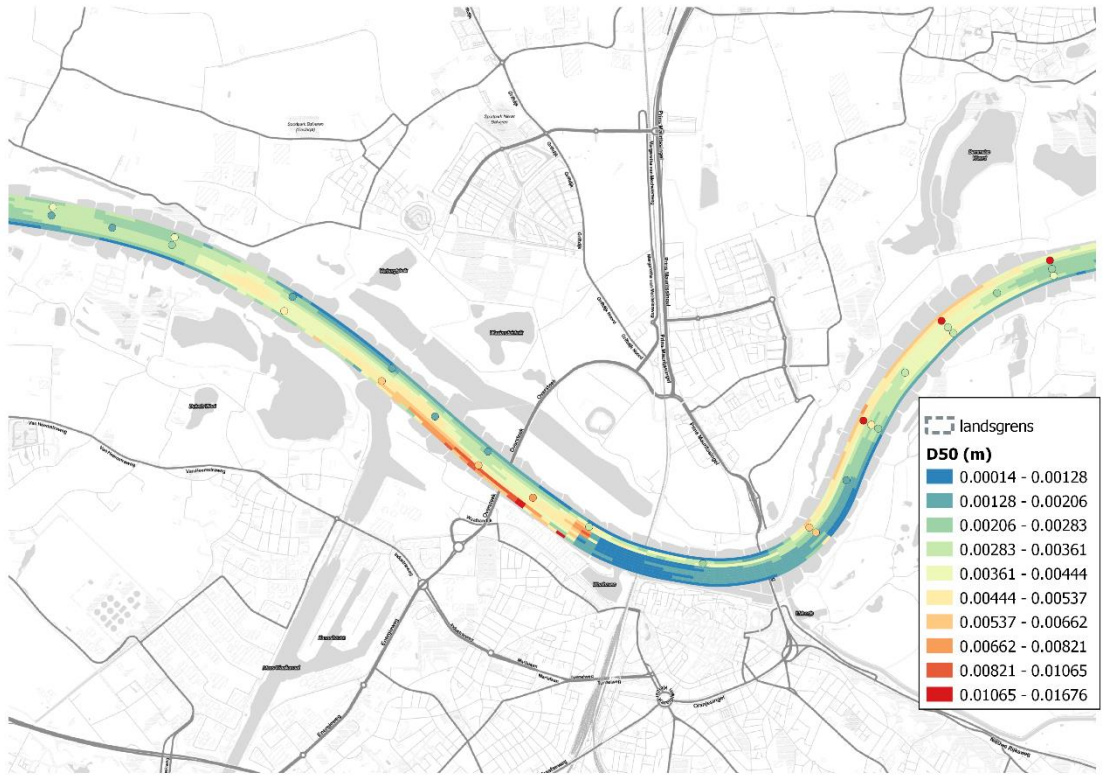
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal

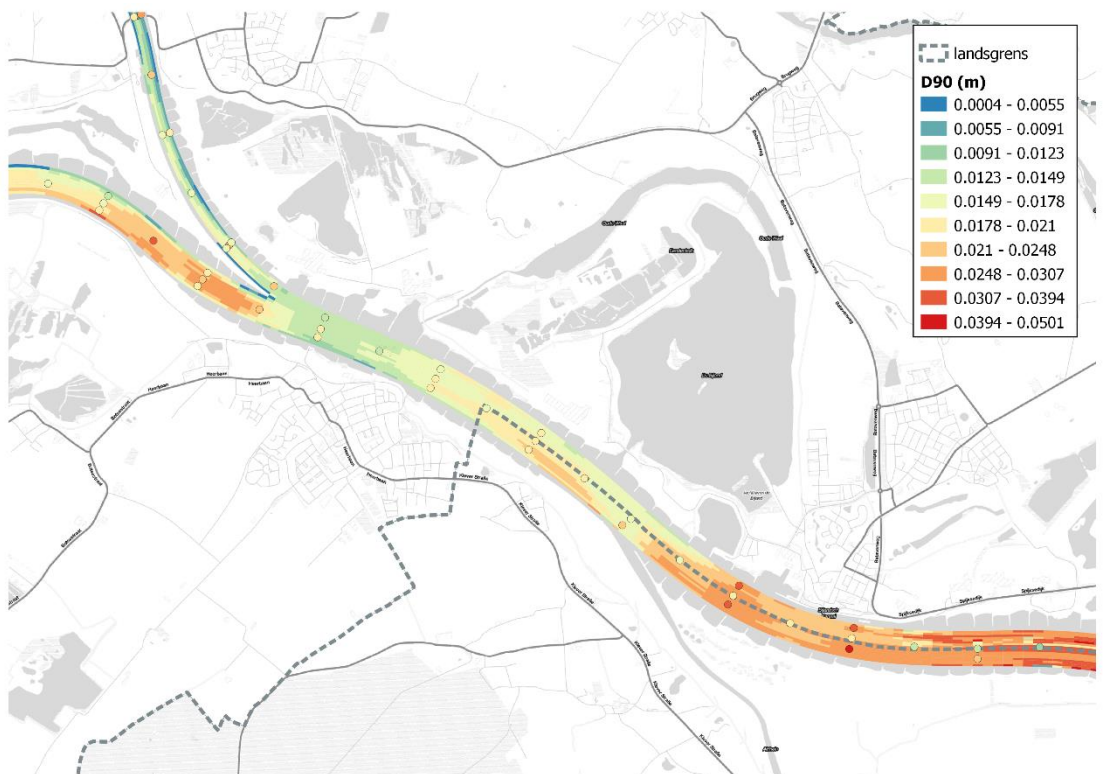


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

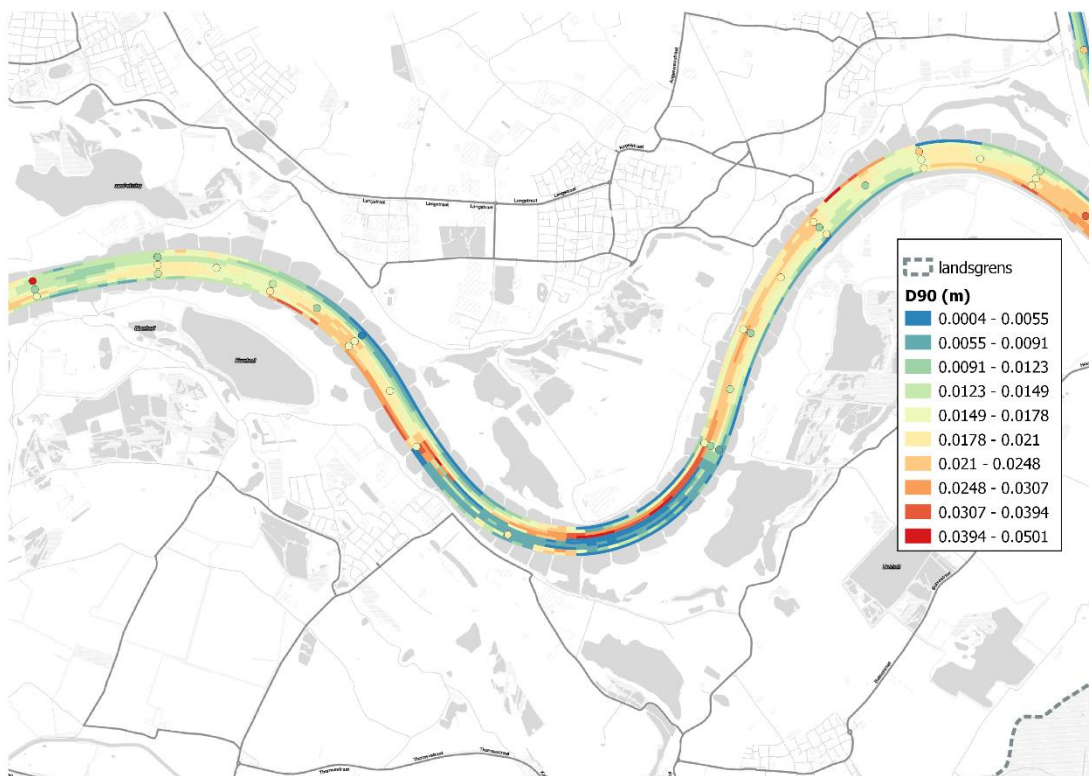
A.3.2.3. D90



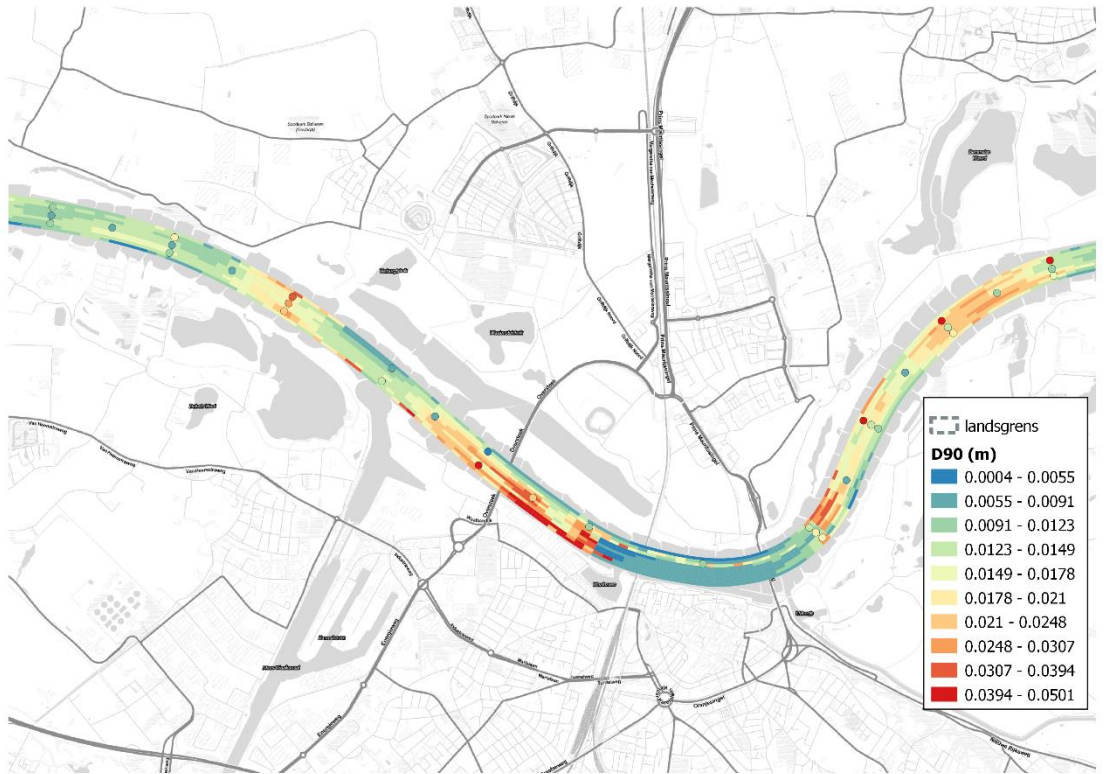
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

A.3.3 Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,25$

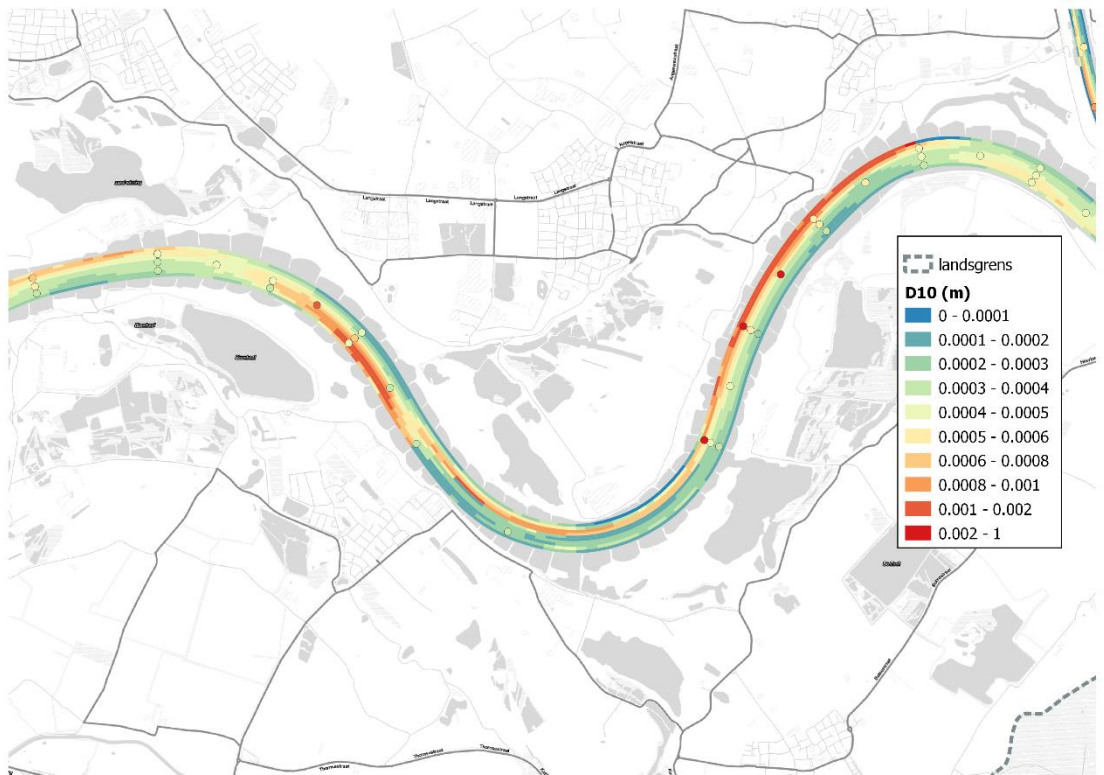
A.3.3.1. D10



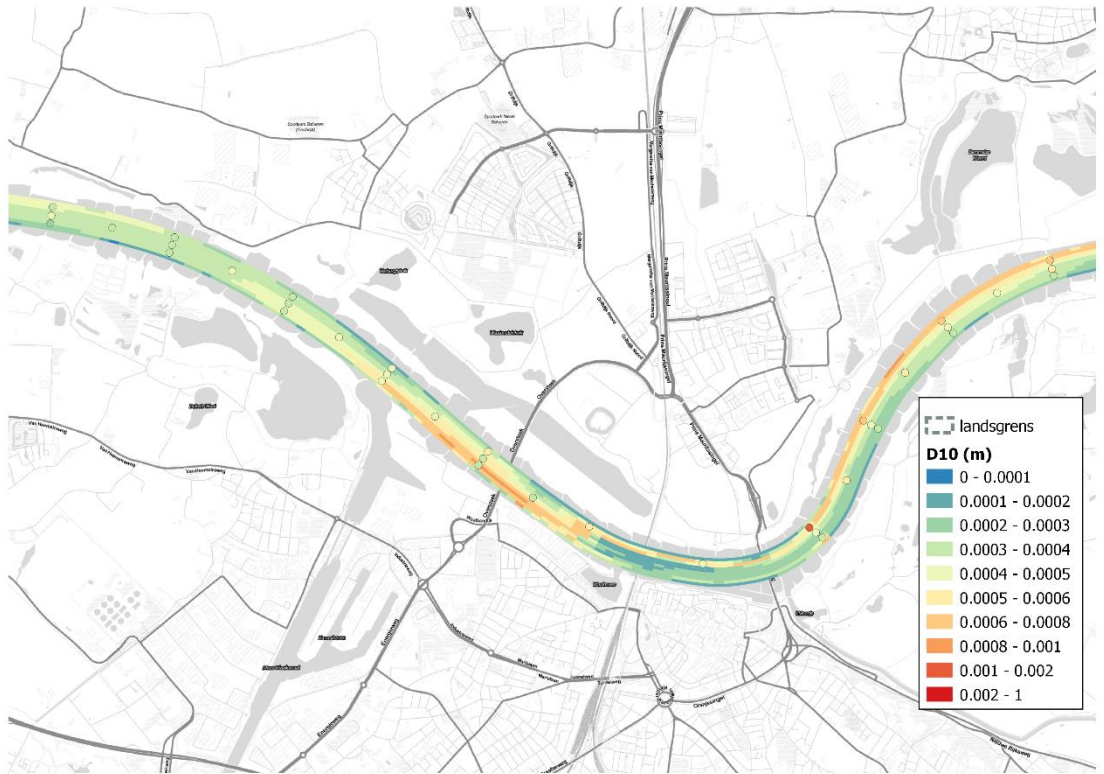
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

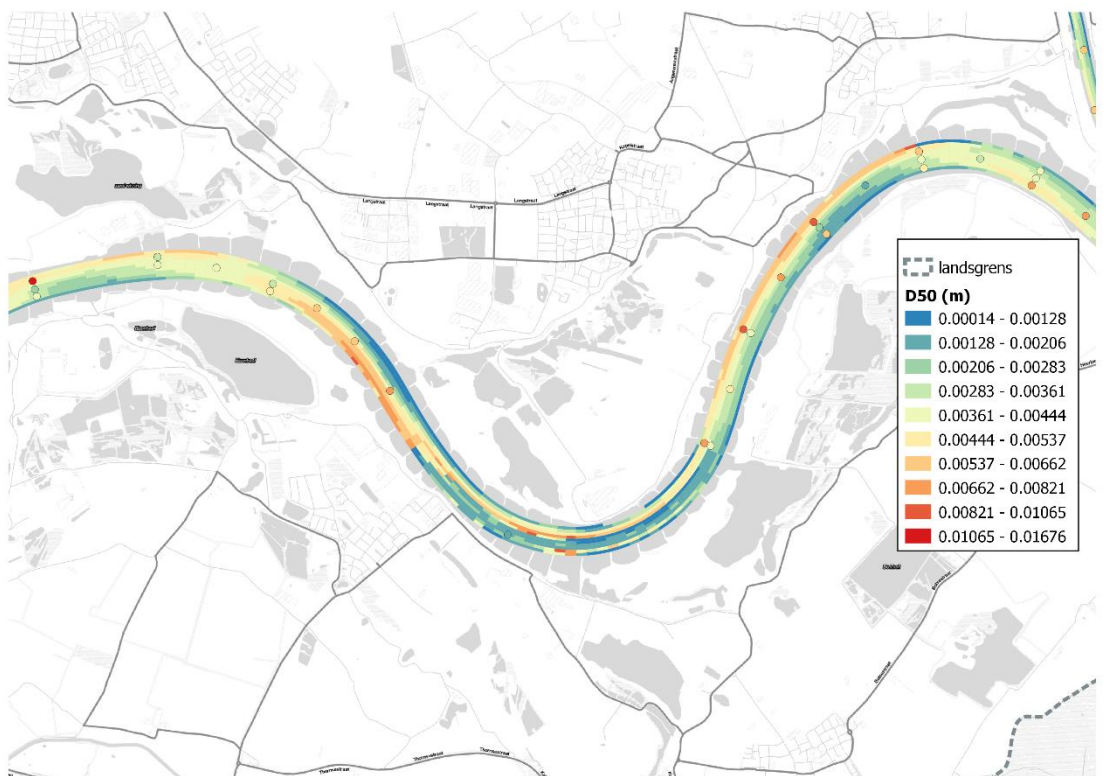
A.3.3.2. D50



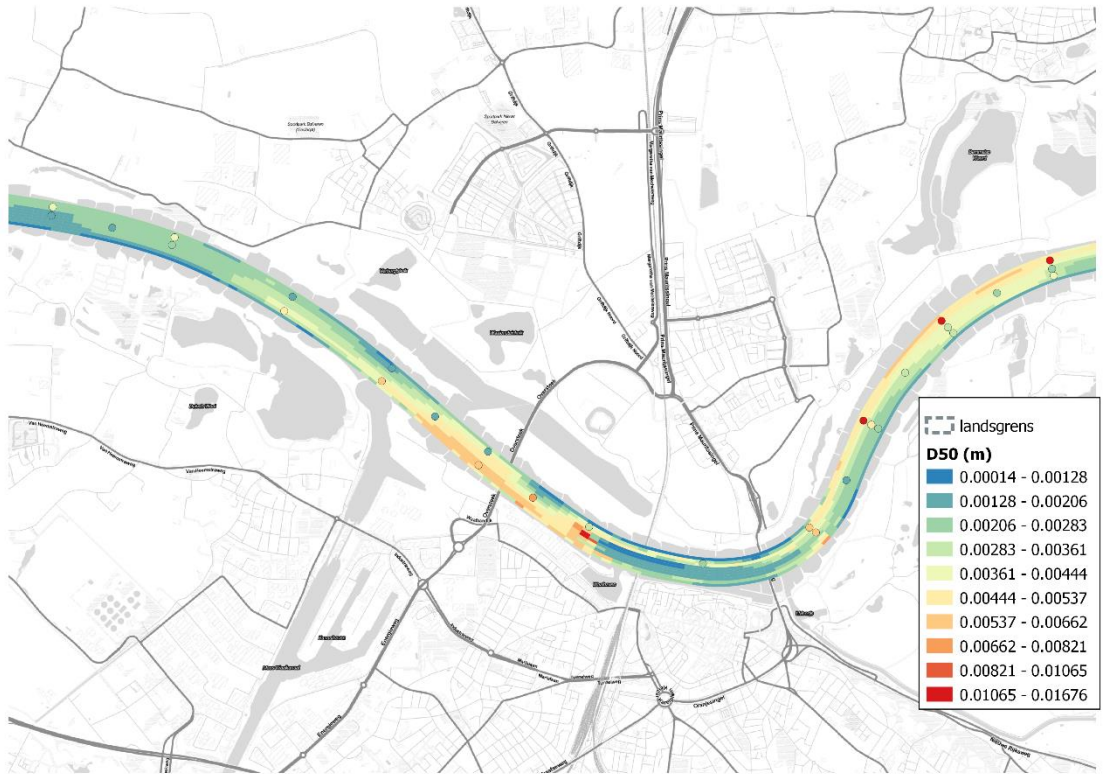
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

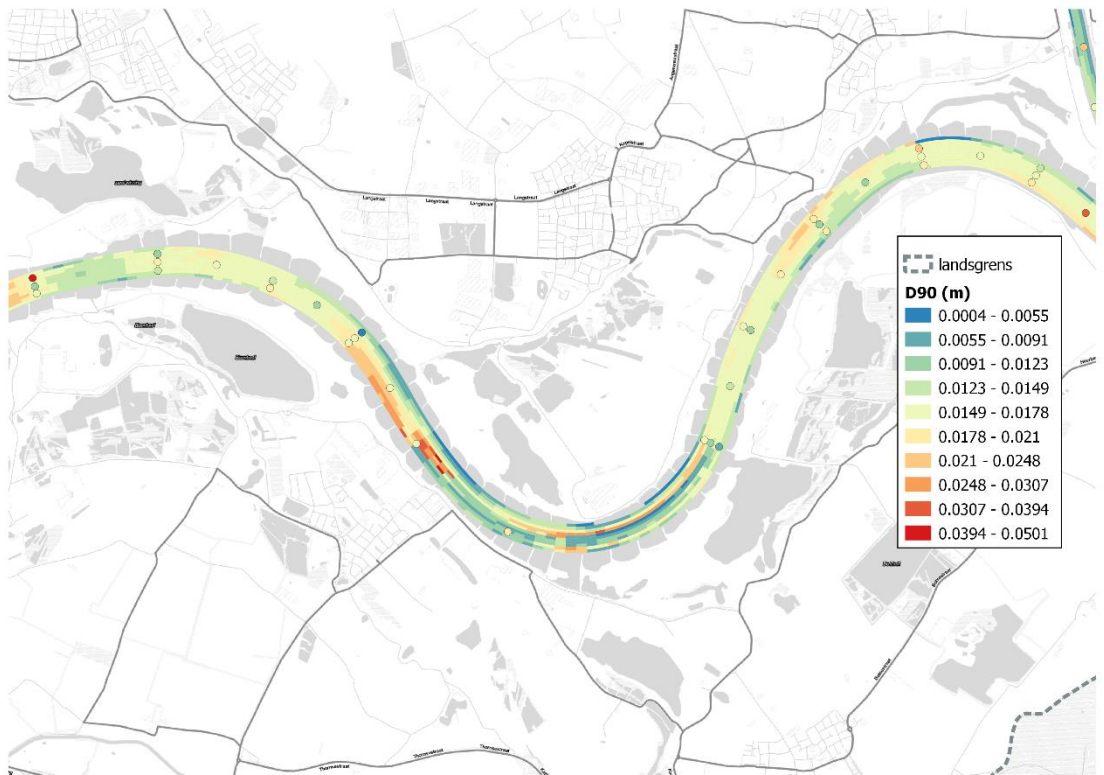
A.3.3.3. D90



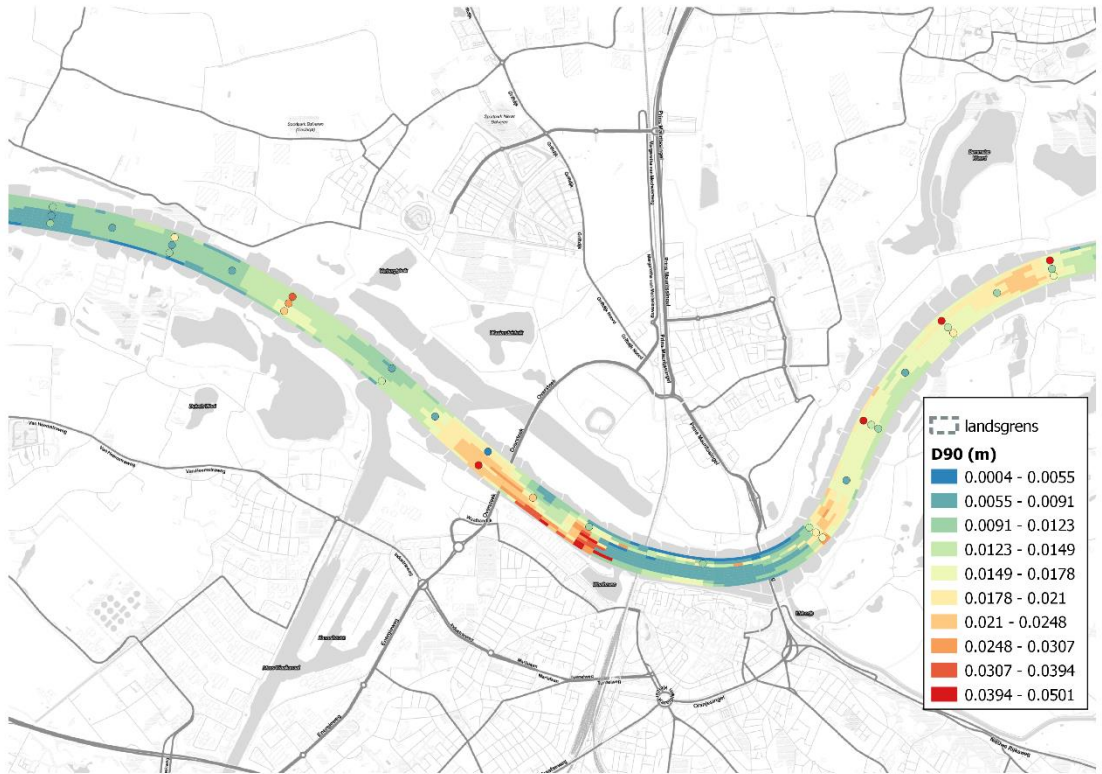
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



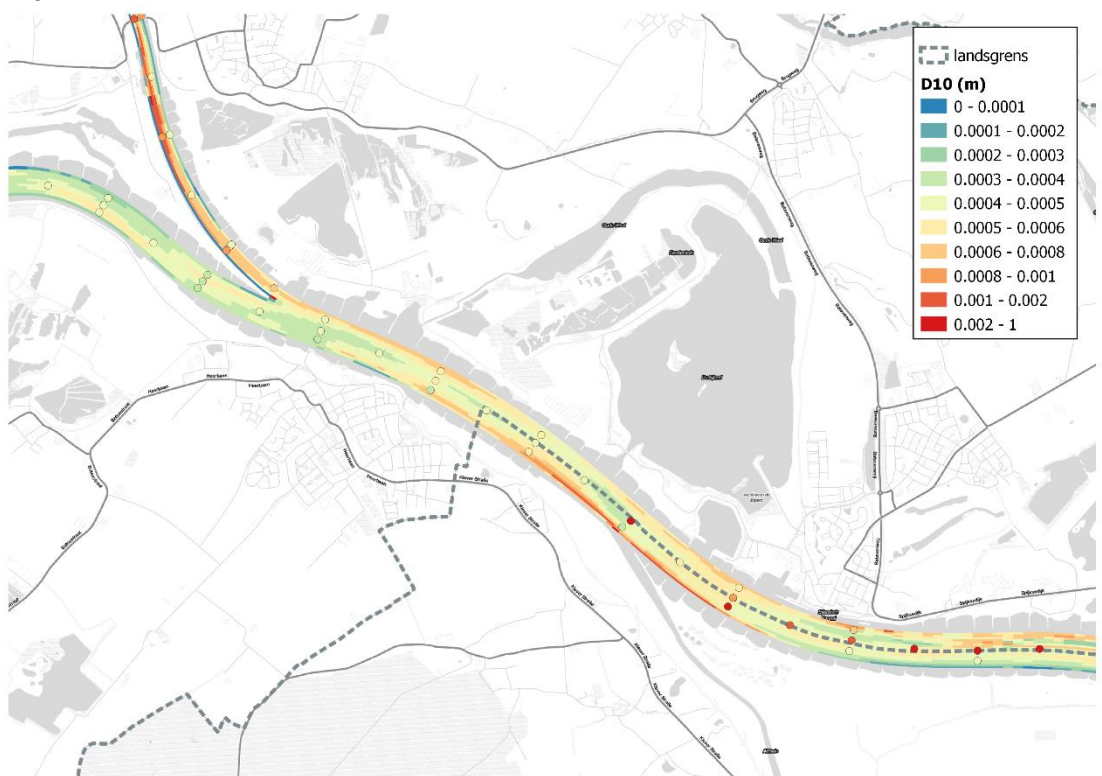
Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

A.3.4 Inspeelberekeningen met $\alpha = 0,12$ en aangepaste bodemligging bij bodemkribben Erlecom

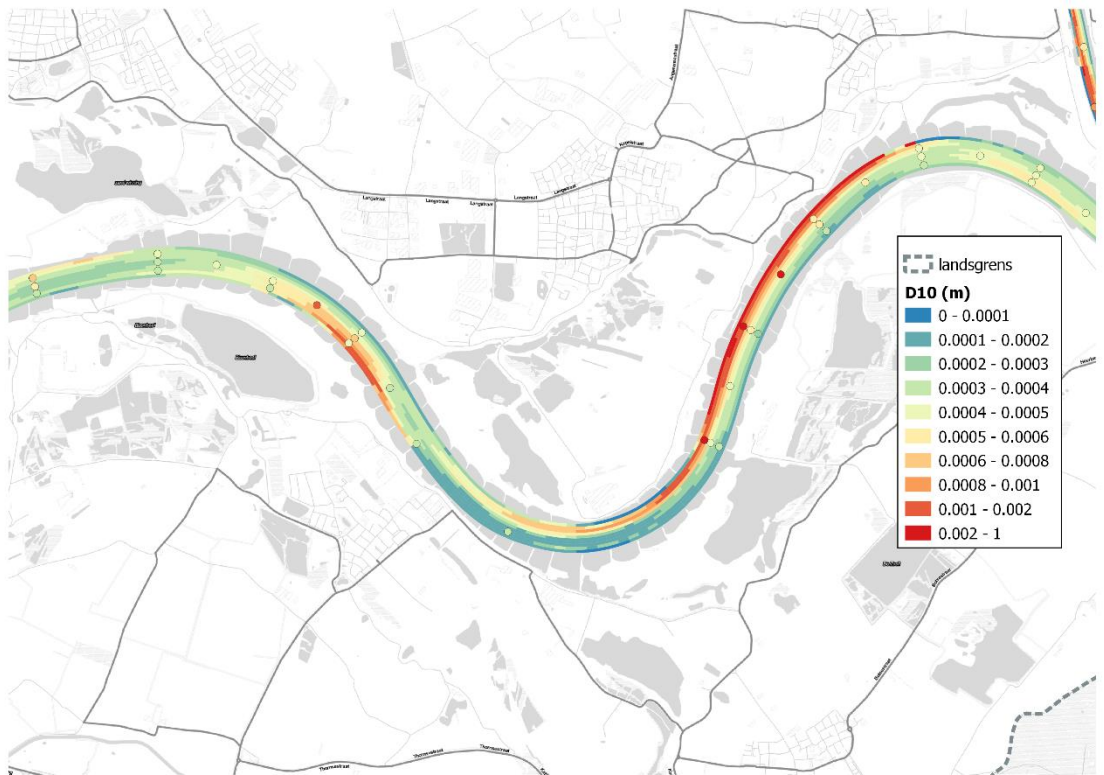
A.3.4.1. D10



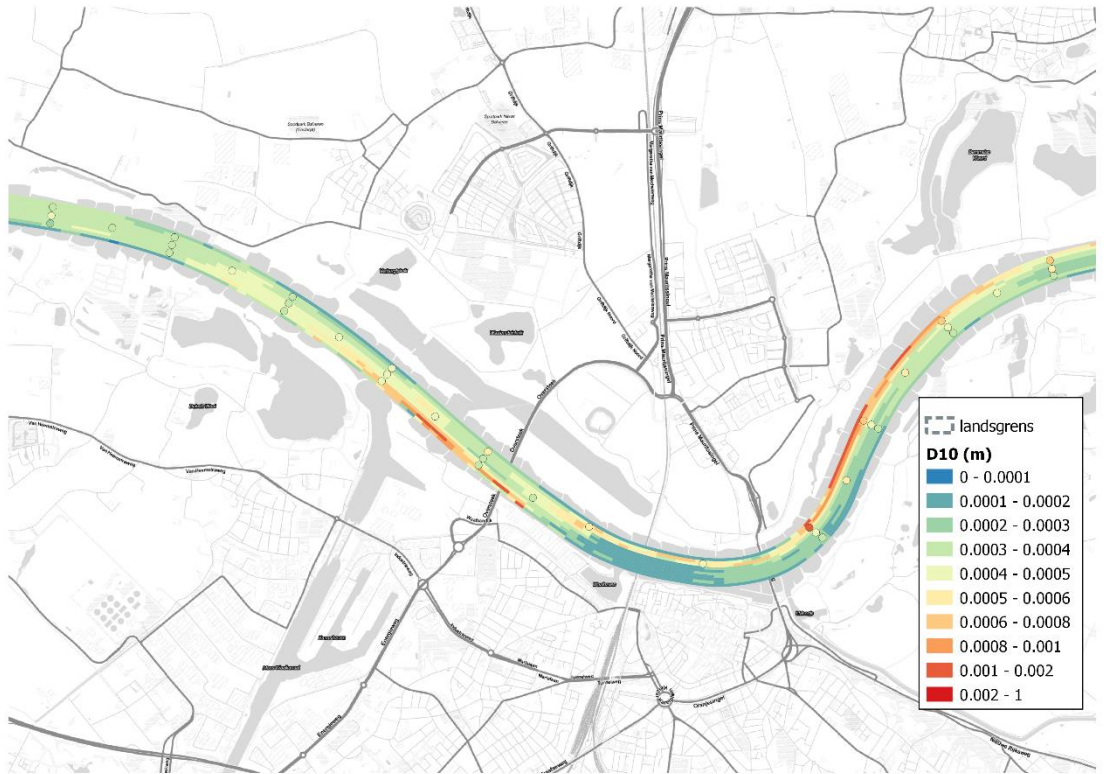
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal

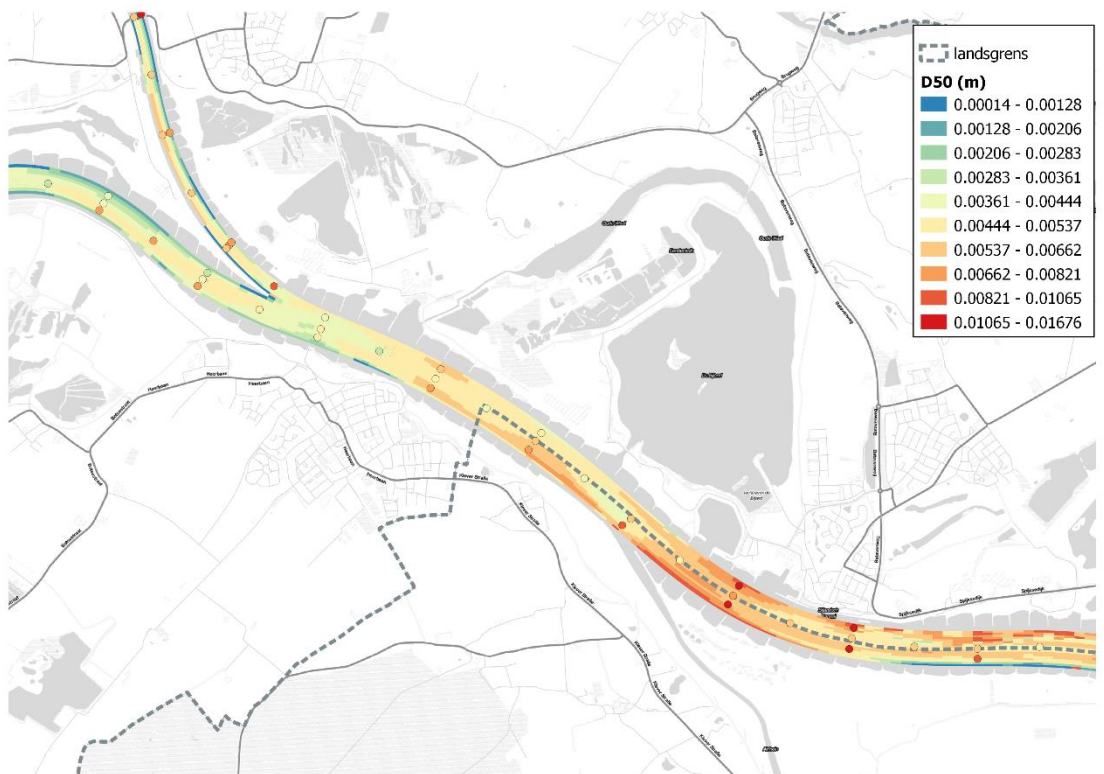


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

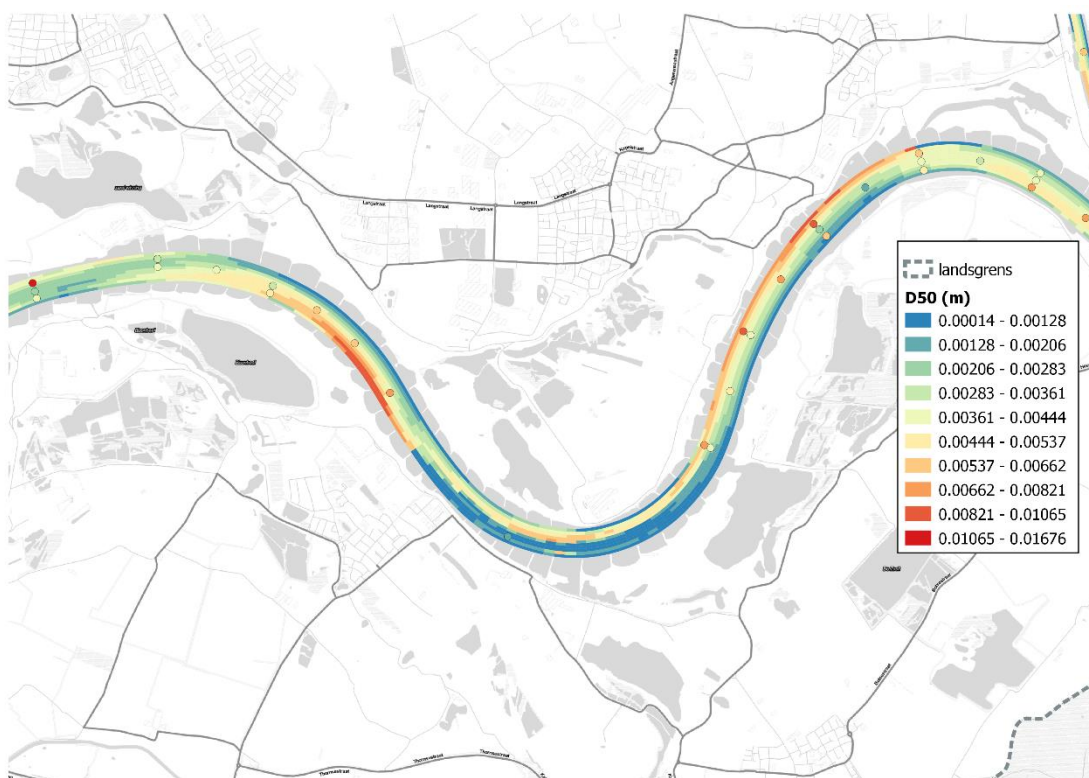
A.3.4.2. D50



Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal

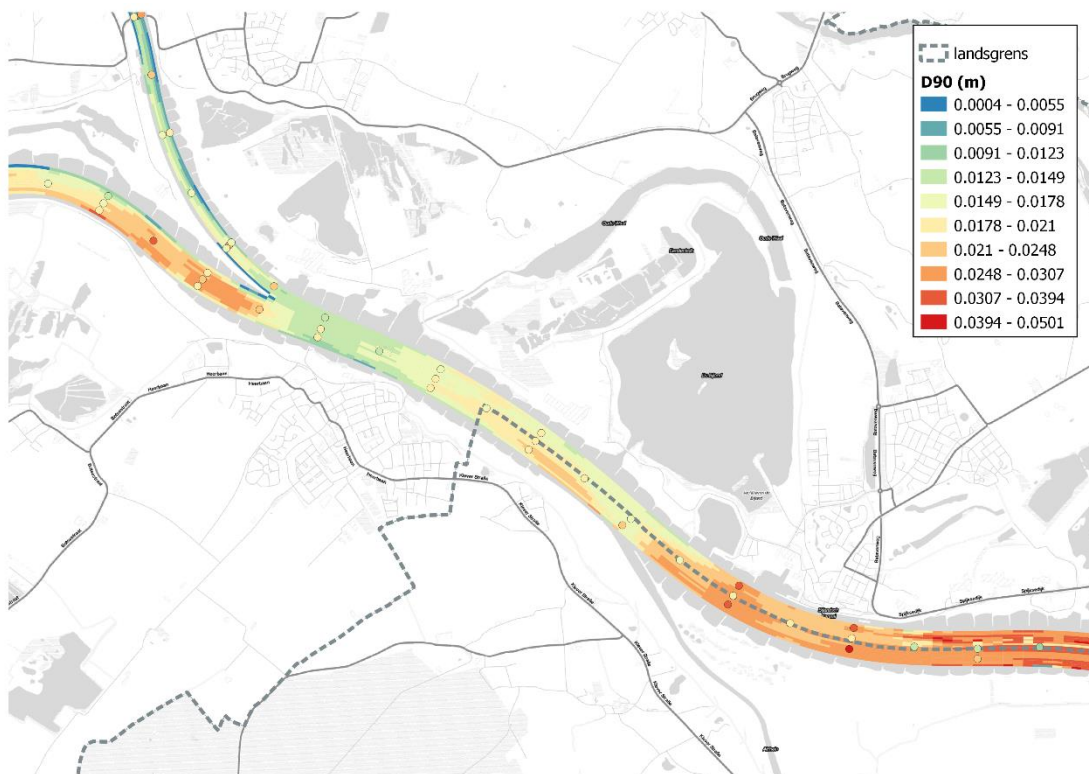


Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

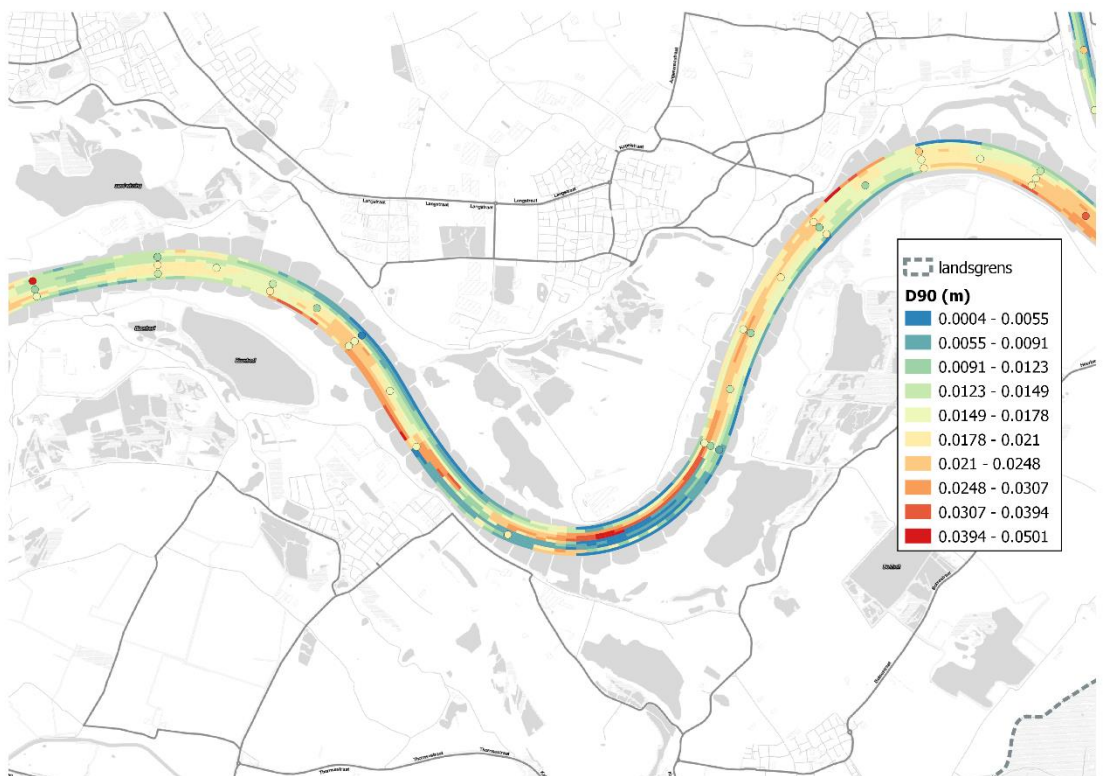
A.3.4.3. D90



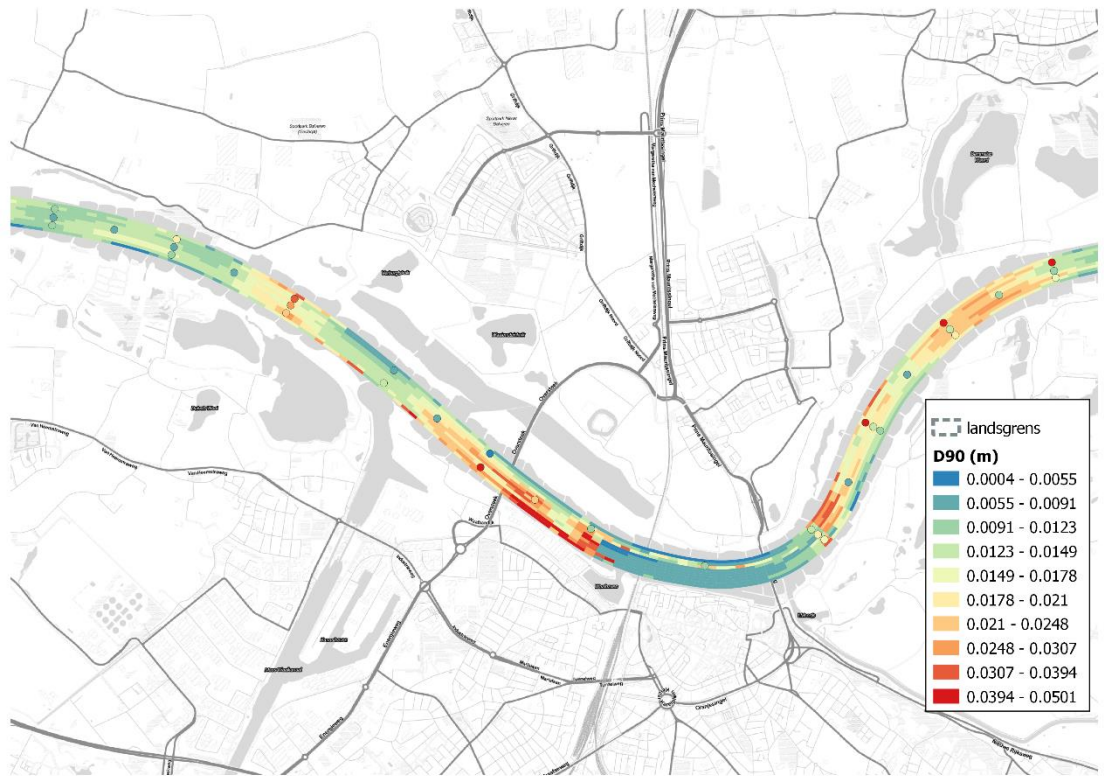
Boven-Rijn en Pannerdensche Kop



Pannerdensch Kanaal



Boven-Waal (Hulhuizen en Haalderen)



Boven-Waal (Nijmegen)

B Schematisatie van de suppletievarianten

B.1 Ligging, geometrie en volume van de suppletievarianten

De suppleties worden in het model aangebracht in de initiële bodemligging en samenstelling. De ligging en dikte van de suppletievarianten wordt getoond in Figuur 5. In variant 1 is de buitenbocht bij Hulhuizen opgevuld tot 3,5 m onder OLR. Variant 2 is een profielvolgende suppletie van 1 m dikte. Variant 1 is in het deel van de buitenbocht gelegd waarin al een redelijk constante dwarsgradiënt in sedimentdiameters bereikt is (Figuur 45).

Varianten 3 t/m 5 hebben dezelfde geometrie als variant 1. In variant 6 is de suppletie een bocht verder naar benedenstrooms gelegd om te voorkomen dat de MGD¹²-locatie aan de rechterkant van de rivier benedenstrooms van de bodemkribben Erlecom door de suppletie een nog grotere knelpunt wordt. Bovendien kan op die manier onderzocht worden wat de invloed van de afstand tot het splitsingspunt is. Tegelijkertijd met de suppletie in de buitenbocht wordt in deze variant de erosiekuil benedenstrooms van de bodemkribben opgevuld omdat daardoor de bodem bij de MGD-locatie ernaast zal eroderen (vergelijkbaar met de werking van een vaste laag, maar dan tijdelijk).

Omdat de erosiesnelheid op de suppletievariant 1 in de modelberekeningen overschat lijkt te worden is er voor variant 6 voor een profielvolgende suppletie in de buitenbocht van 1 m dikte gekozen. De erosiekuil is opgevuld tot ongeveer de hoogte van de bodemkribben. In totaal is op deze manier minder ruimte beschikbaar voor de suppletie, waardoor het suppletievolume iets kleiner is dan in de overige varianten (171.623 m³ in variant 6 ten opzichte van 214.449 m³ in varianten 1 en 3 t/m 5 en 222.930 m³ in varianten 4 en 5).

B.2 Samenstelling van de suppletievarianten

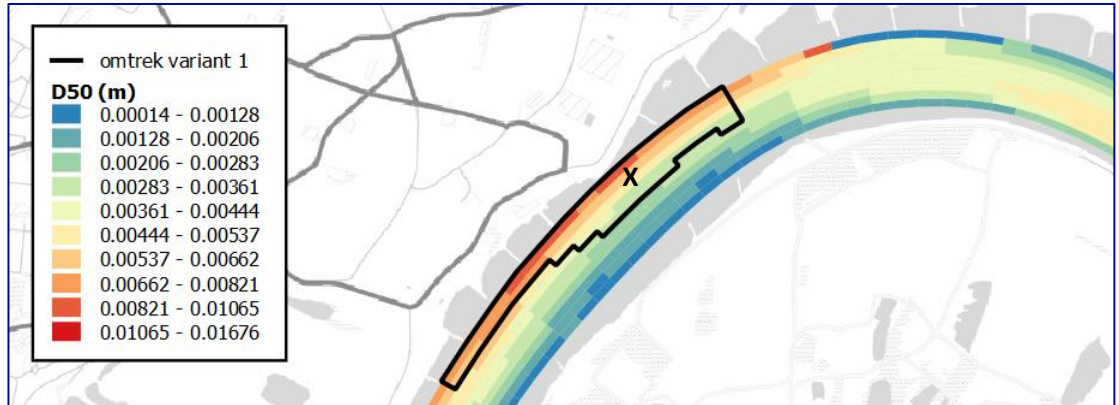
Het bodemmateriaal in het DVR-model bestaat uit 10 fracties (zie Tabel 4 voor de diameters). Het suppletiemateriaal bestaat uit dezelfde 10 fracties, die in het model echter aangemerkt worden als tracers, om in de modelresultaten onderscheid te kunnen maken tussen bodem- en suppletiemateriaal.

De samenstelling van de suppletie is in varianten 1 t/m 3 en 6 gelijk gehouden aan de samenstelling van de toplaag ter plekke van de suppletievariant 1 na inspelen van het model (paragraaf 2.3). Daarvoor is de samenstelling geprikt op een locatie op ongeveer de helft van de breedte van de suppletie (Figuur 45).

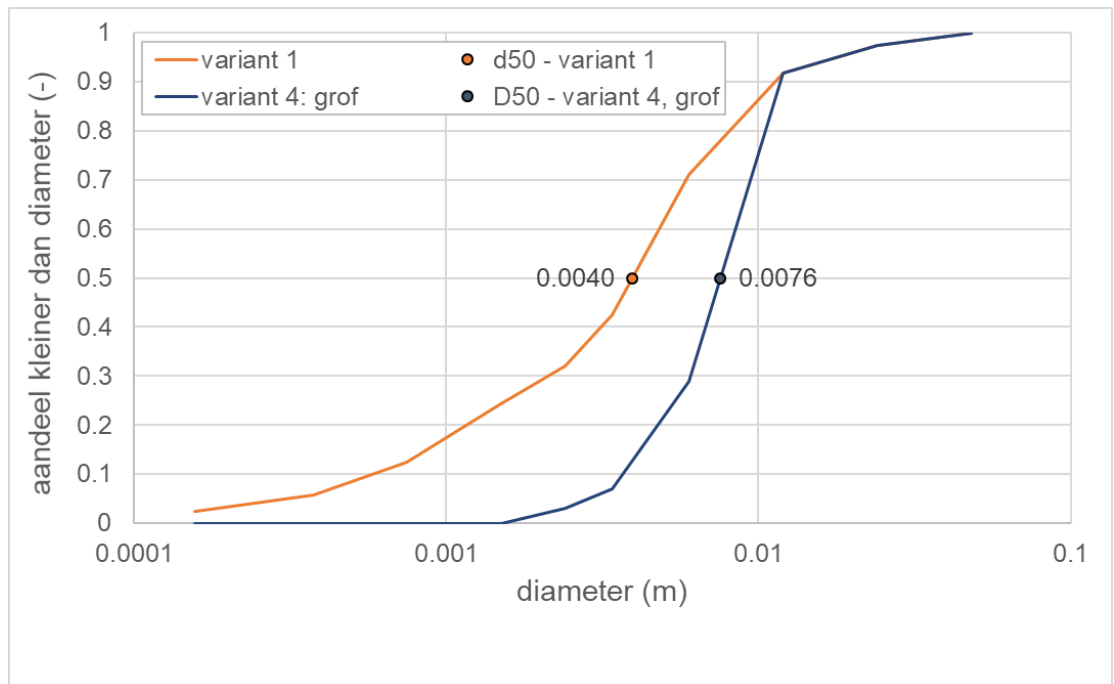
Voor de varianten 4 en 5 is een grovere samenstelling gebruikt die vergelijkbaar is met die van de eerste pilotsuppletie op de Boven-Rijn (Figuur 13). Figuur 46 en Tabel 4 tonen de gebruikte samenstellingen. De keuze voor het grovere materiaal is gemaakt op basis van een analyse van de mobiliteit van het sediment (paragraaf B.3). Daaruit blijkt dat het niet zinvol is om grover materiaal dan fractie 10 te suppleren, omdat die fractie al nagenoeg immobiel is. Een grovere suppletie kan dus alleen worden gerealiseerd door de hoeveelheid sediment van fracties 9 en 10 ongeveer gelijk te houden en vooral de hoeveelheid van fractie 8 te verhogen. Het suppletiemateriaal voor varianten 4 en 5 wordt dan uniformer dan het in variant 1 was en bestaat met name uit matig grof grind, terwijl in varianten 1 t/m 3 en 6 ook grof zand een belangrijk aandeel heeft.

¹² MGD = minst gepeilde diepte

Omdat de eerste vier fracties waarschijnlijk te fijn zijn om gericht aan te brengen zijn deze voor varianten 4 en 5 op nul gezet. Voor de modelresultaten is dat waarschijnlijk niet relevant, maar zou eventueel een kunstmatige invloed van de correctie voor hiding&exposure kunnen voorkomen. De D_{50} van varianten 1 t/m 3 en 6 is 4 mm, de D_{50} van varianten 4 en 5 is 7,6 mm (Figuur 46).



Figuur 45 Sedimentdiameter D_{50} (in meter, na inspelen samenstelling en bodemligging), ligging van suppletievariant 1 (zwarte lijn) en locatie waar de samenstelling van de toplaag is geprikt (X).



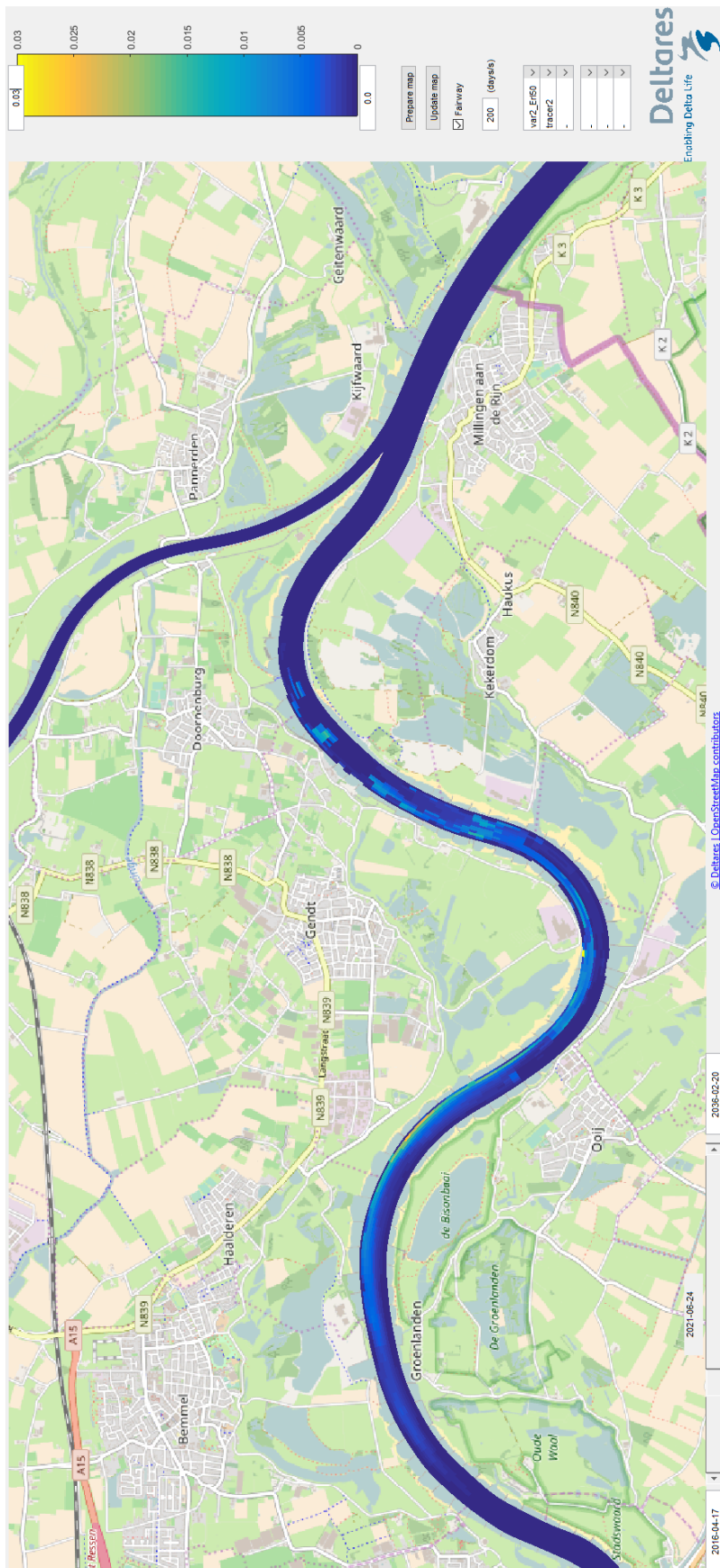
Figuur 46 Sedimentsamenstelling van de suppletievarianten.

Tabel 4 Samenstelling van het suppletiemateriaal voor de verschillende varianten.

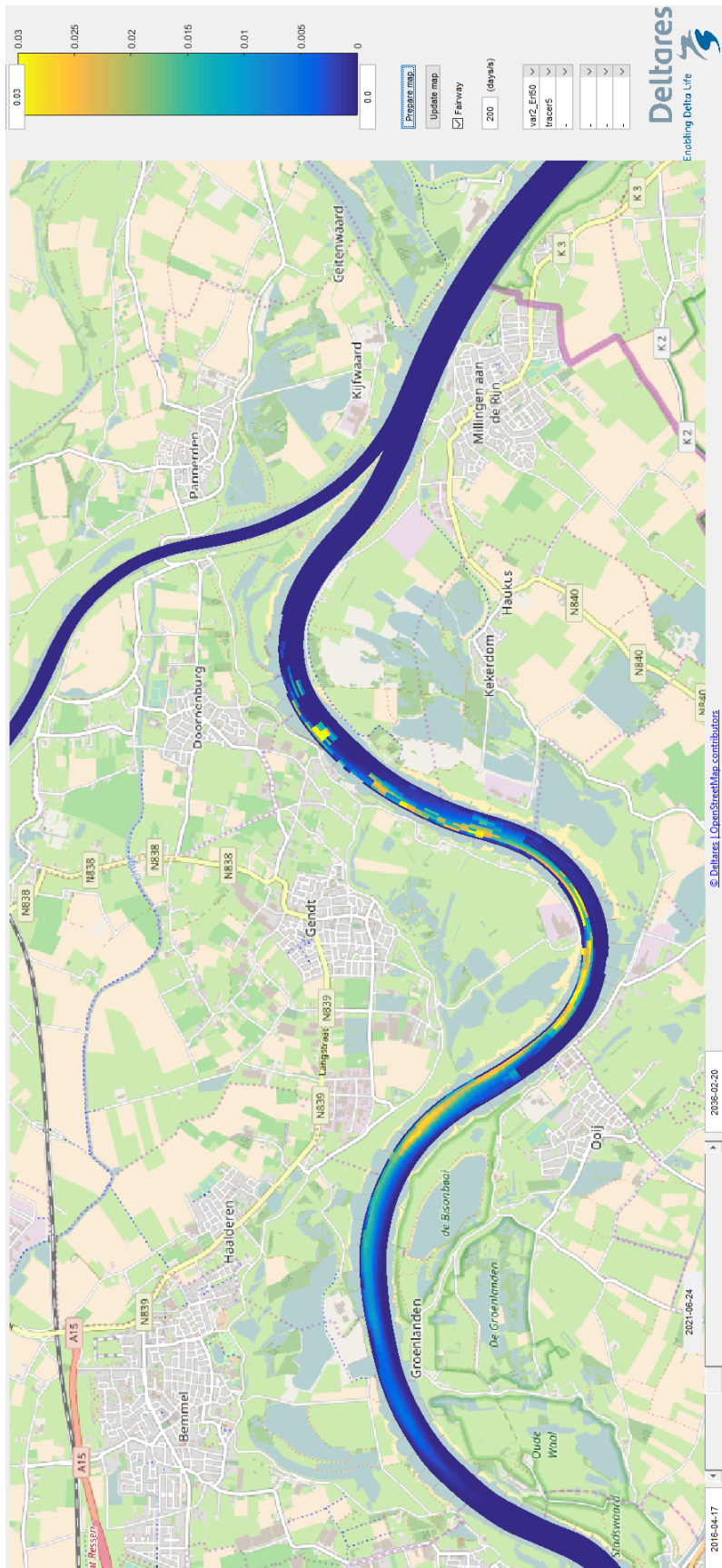
fractie	D _{min} (m)	D _{max} (m)	D _i (m)	varianten 1 t/m 3 en 6		varianten 4 en 5	
				percentage	cumulatief	percentage	cumulatief
1	0.000063	0.00025	0.000157	0.02381	0.02381	0	0
2	0.00025	0.0005	0.000375	0.03331	0.05712	0	0
3	0.0005	0.001	0.00075	0.06687	0.12399	0	0
4	0.001	0.002	0.0015	0.11900	0.24299	0	0
5	0.002	0.0028	0.0024	0.07761	0.32060	0.030	0.030
6	0.0028	0.004	0.0034	0.10392	0.42452	0.040	0.070
7	0.004	0.008	0.006	0.28581	0.71033	0.220	0.290
8	0.008	0.016	0.012	0.20790	0.91823	0.628	0.918
9	0.016	0.032	0.024	0.05588	0.97411	0.056	0.974
10	0.032	0.064	0.048	0.02589	1.00000	0.026	1.000

B.3 Mobiliteit van het bodemmateriaal

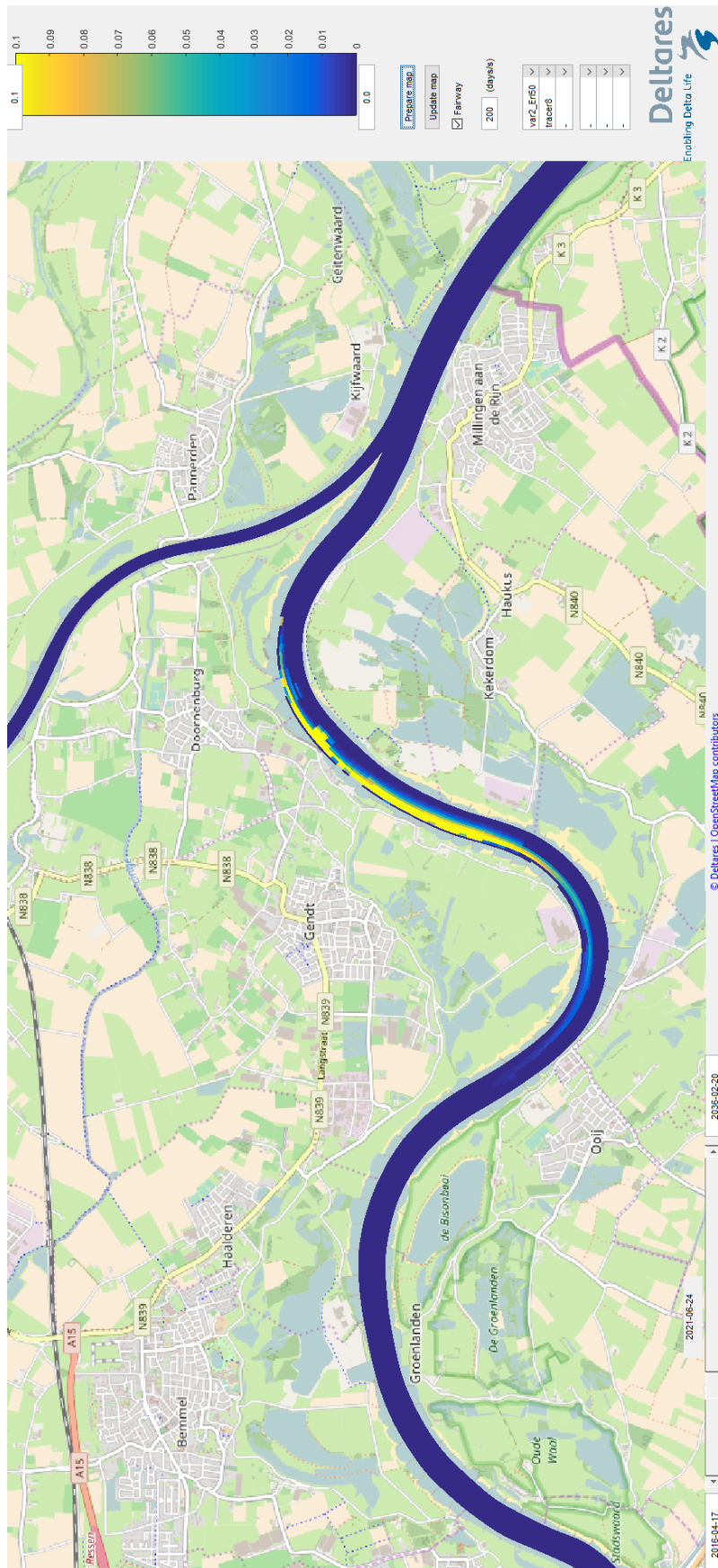
Onderstaande figuren geven aan hoe mobiel het suppletiemateriaal is bij de suppletievariant 1 (eenheid kleurenschaal: dikte beschikbaar sediment in meters). De fijnste fractie (fractie 1) beweegt snel, de grofste fractie (fractie 10) beweegt nagenoeg niet. Fractie 9 beweegt nog wel duidelijk tijdens de hoogste afvoeren.



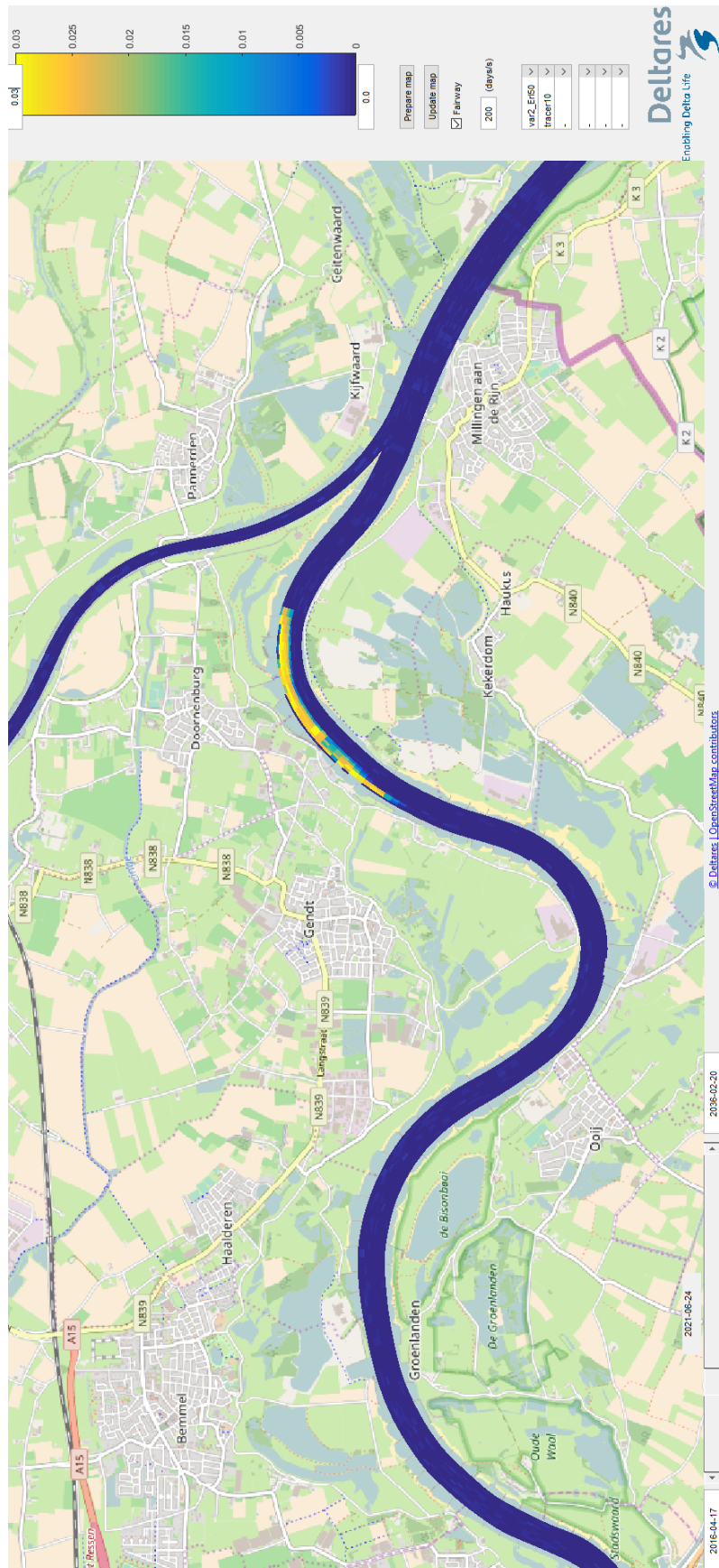
Figuur 47 Beschikbare hoeveelheid sediment van suppletie-fractie 2 na 5 jaar: Deze fractie is voor een groot deel al langs Haalderen gekomen.



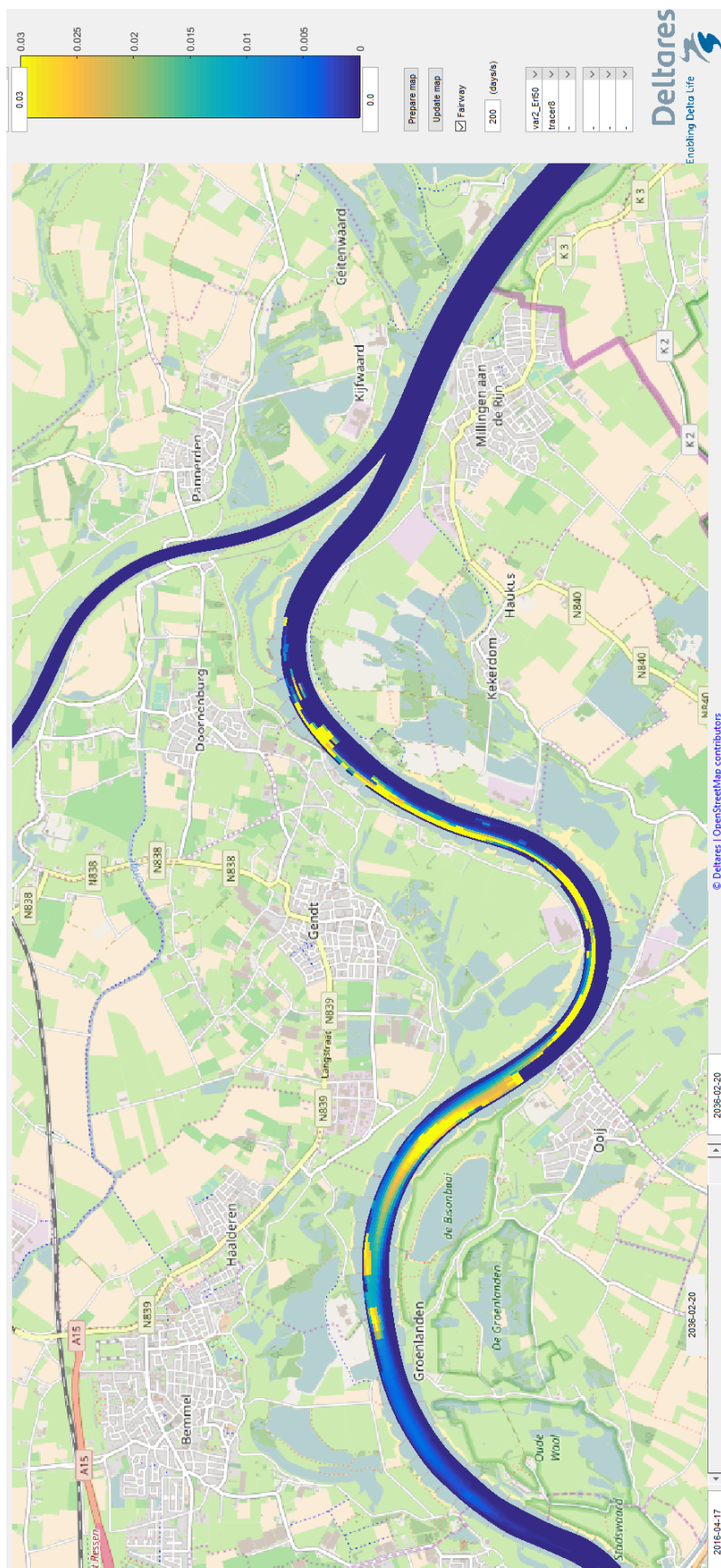
Figuur 48 Beschikbare hoeveelheid sediment van suppletie-fractie 5 na 5 jaar: Deze fractie bereikt de bocht bij Haalteren.



Figuur 49 Beschikbare hoeveelheid sediment van suppletie-fractie 8 na 5 jaar: Deze fractie bereikt de bocht bij Erlecom.



Figuur 50 Beschikbare hoeveelheid sediment van suppletie-fractie 10 na 5 jaar: Deze fractie is nagenoeg immobiel en beweegt alleen bij de hoogwaterafvoer (8.592 m³/s bij Lobith) een heel klein beetje.



Figuur 51 Beschikbare hoeveelheid sediment van suppletie-fractie 8 na 20 jaar: Deze fractie bereikt de bocht bij Haalderen.

B.4 Varianten met minder mobiel sediment

B.4.1 Variant 3: vaste laag

Suppletievariant 3 is geschematiseerd als vaste laag. Daarvoor is de beschikbare hoeveelheid sediment ter plekke van de vaste laag op 0 m gezet. Dat betekent dat er op die locatie geen erosie plaats kan vinden. Wel kan er sedimentatie plaatsvinden (en dat materiaal vervolgens weer eroderen).

B.4.2 Variant 5: Semi-vaste lagen module

Variant 5 is een kopie van variant 4 met grover materiaal. Echter wordt in variant 5 gebruik gemaakt van het semi-vaste lagen module (Chavarrias et al., 2020, en Chavarrias & Ottevanger, 2021). Dat module zou beter rekening moeten houden met de aanwezigheid van immobiel sediment.

Dit module voegt naast de actieve laag een laag toe waarin op dat moment immobiel sediment wordt "geborgen". De belangrijkste parameter voor het gedrag van het sediment is daarbij de verhouding tussen de diktes van de actieve laag en de laag met immobiel sediment (Chavarrias & Ottevanger, 2021). Gebaseerd op het onderzoek van Chavarrias & Ottevanger (2021) zijn de volgende waarden voor de aanvullende parameters voor dit module gebruikt:

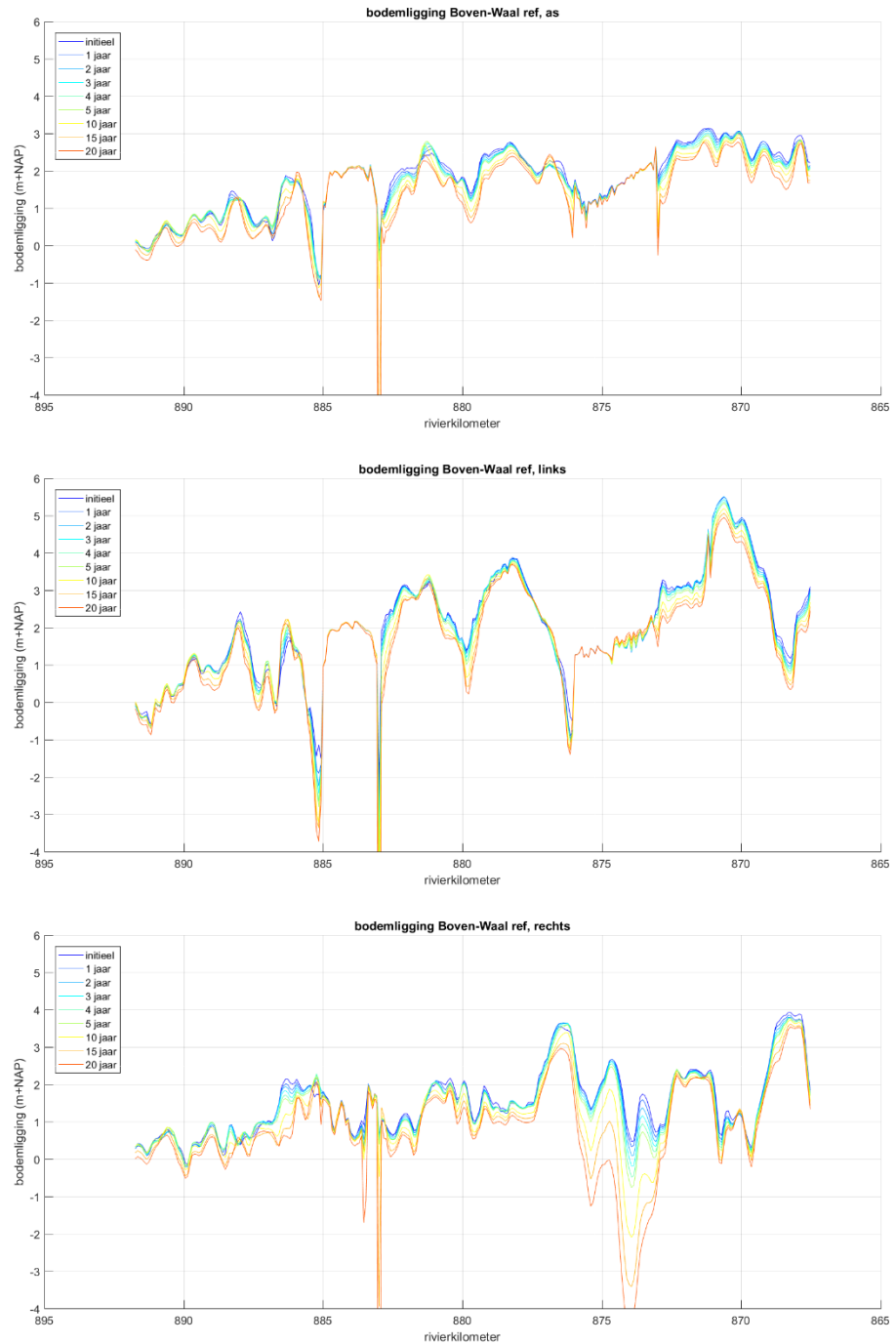
- $ThCLyr = 0.5$ [m] Dikte laag met immobiel sediment
- $Amax = 1$ [-] Inverse probability deep troughs
- $SinkFracMax = 0.6$ [-]
- $IHidExpTrCrs = 1$ [-] hiding&exposure berekenen met actieve en grove laag
- $IMobility = 4$ [-]
- $IFixLyr = 1$ [-]

De analyse van de resultaten heeft laten zien dat het gedrag van een suppletie ook met gebruik van het semi-vaste lagen module gesimuleerd kan worden. Echter moeten de parameters van het module of de parameters voor het 2D-gedrag in het model opnieuw worden gekalibreerd.

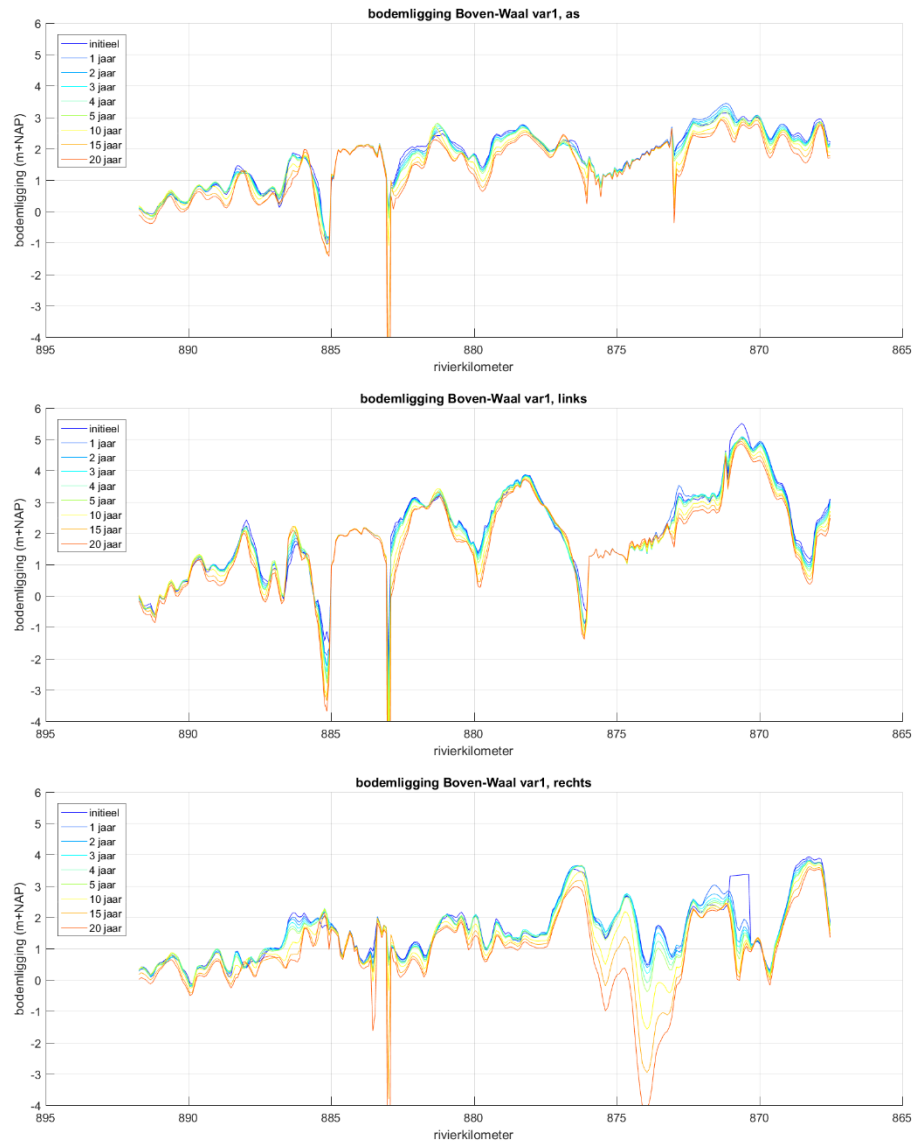
C Resultaten: morfologische ontwikkeling

C.1 Ontwikkeling van de absolute bodemligging (langsprofielen)

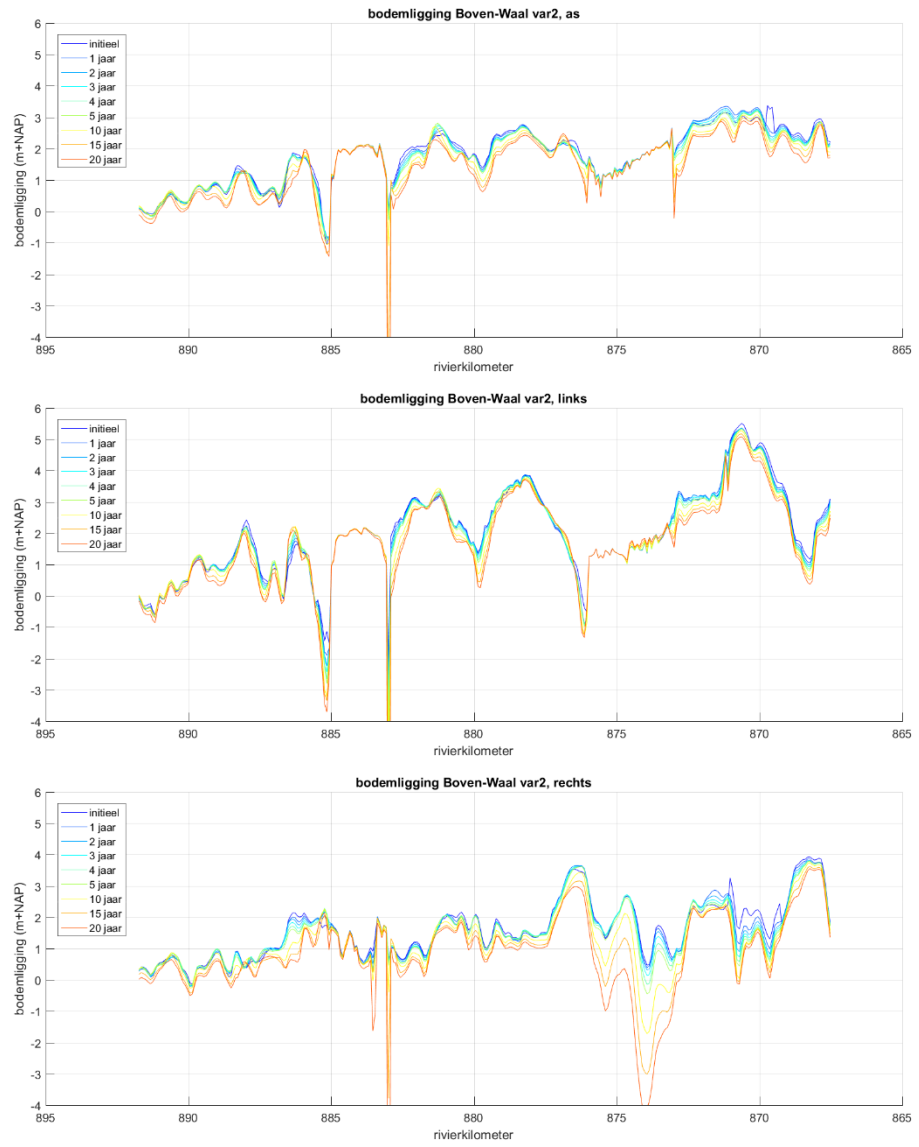
C.1.1 Referentie



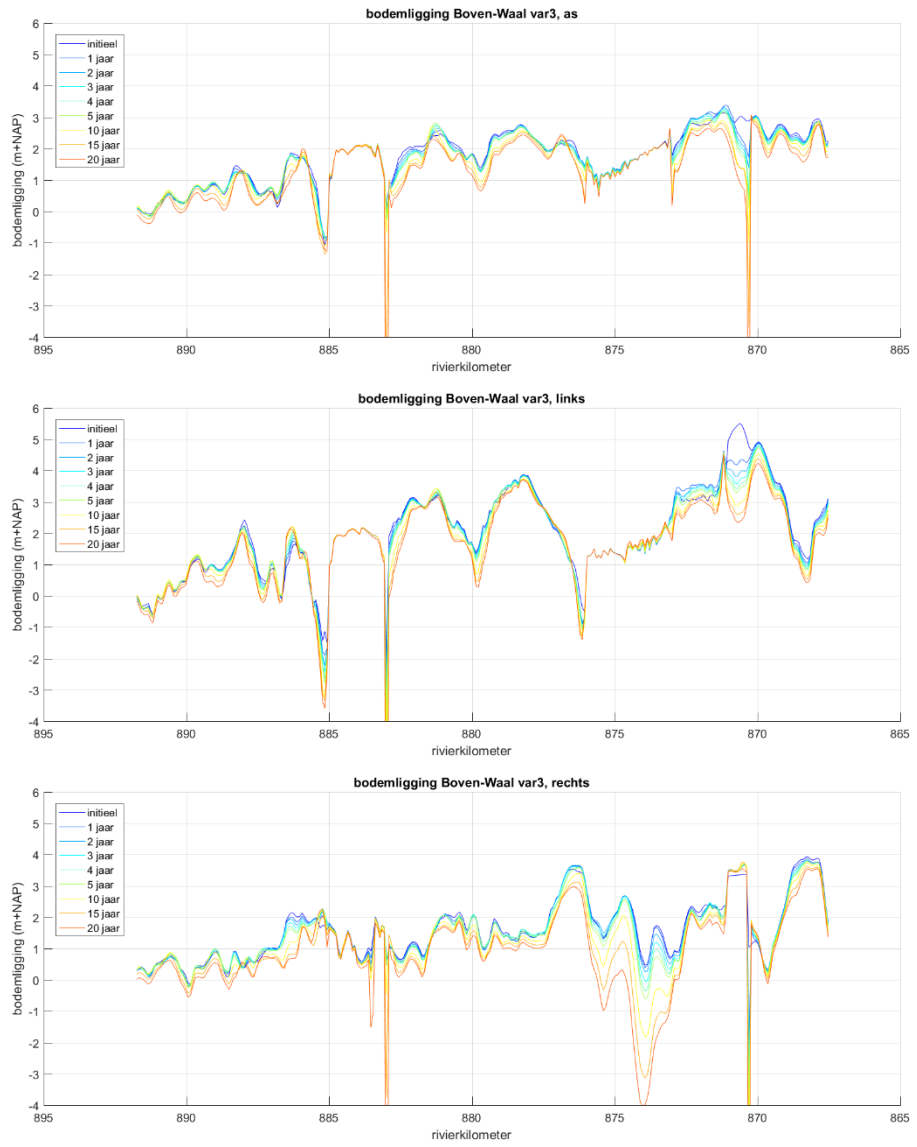
C.1.2 Variant 1



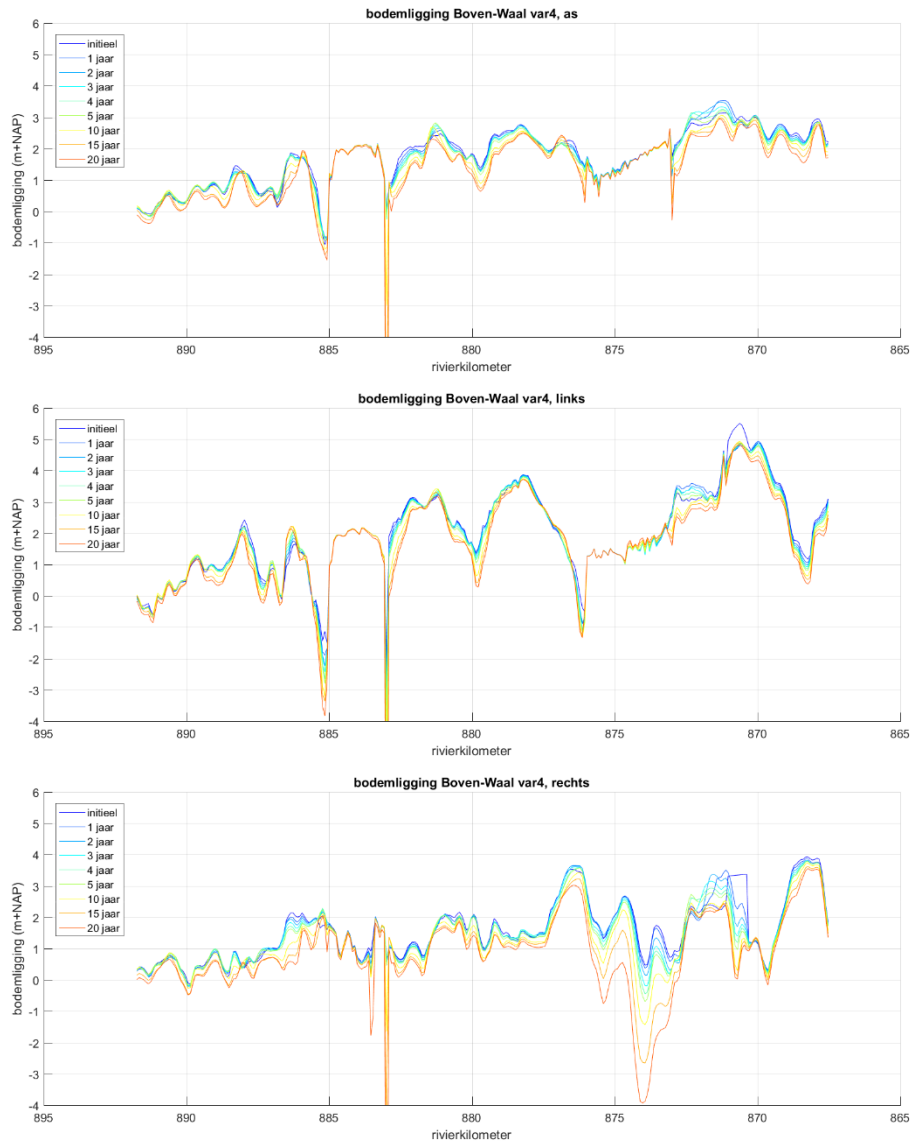
C.1.3 Variant 2



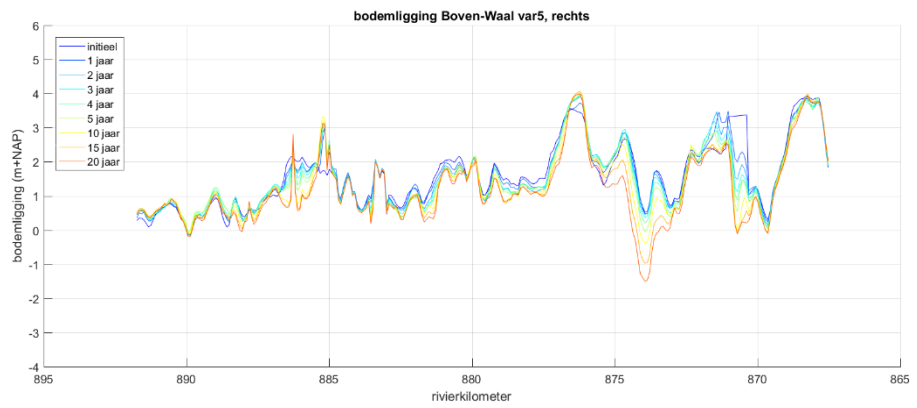
C.1.4 Variant 3



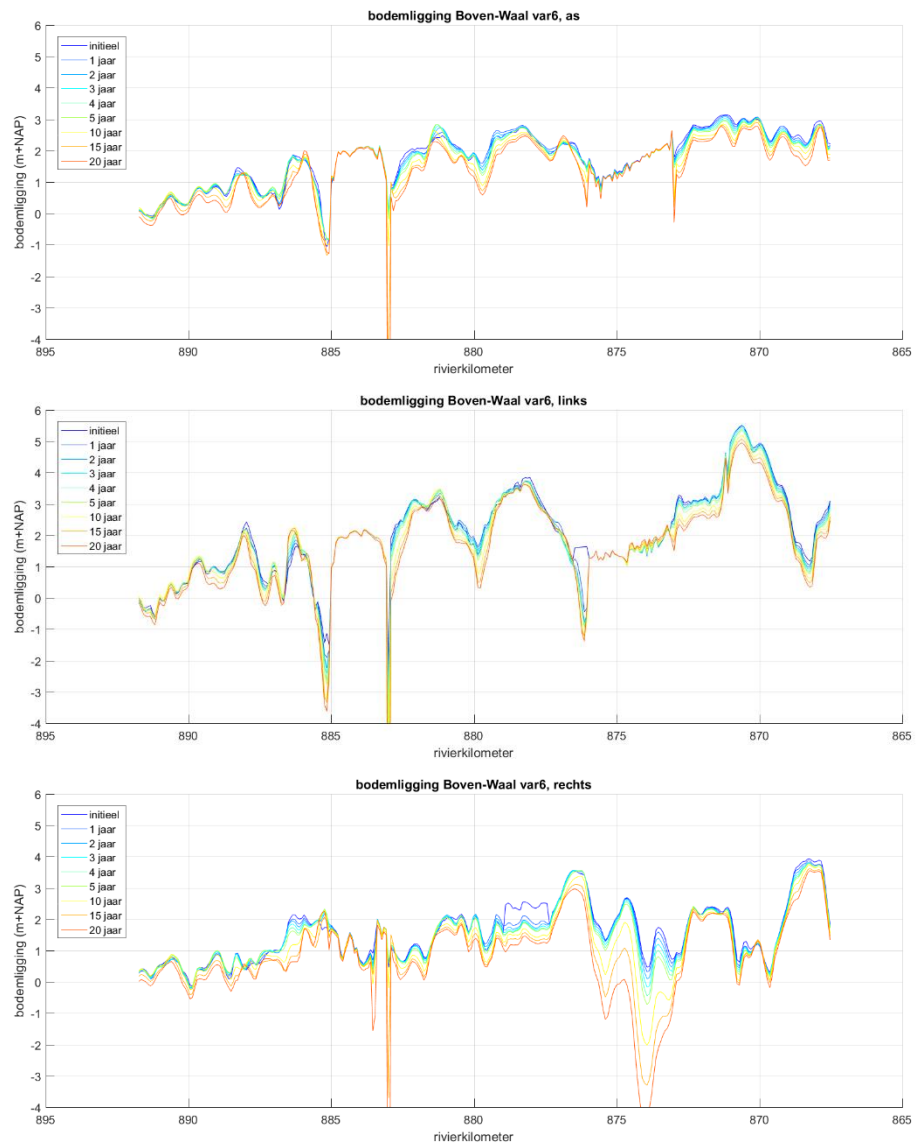
C.1.5 Variant 4



C.1.6 Variant 5



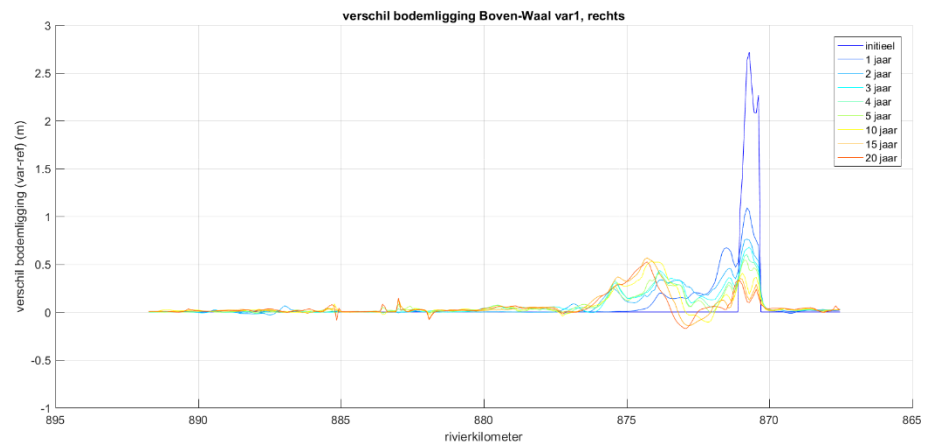
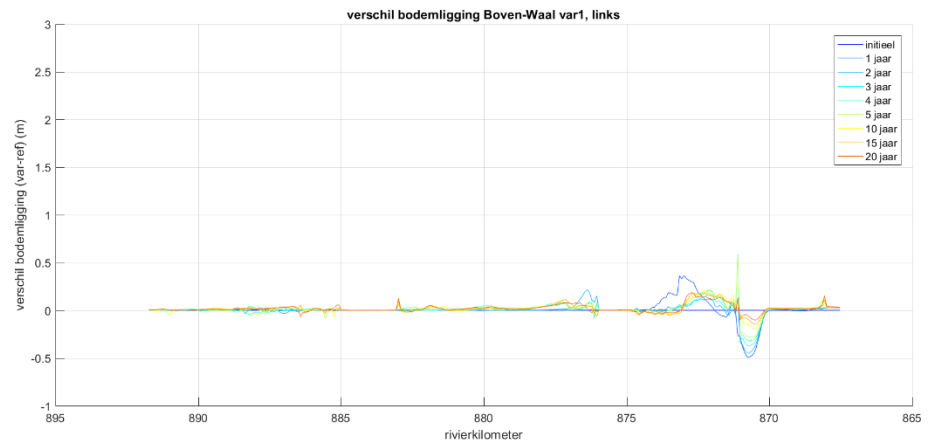
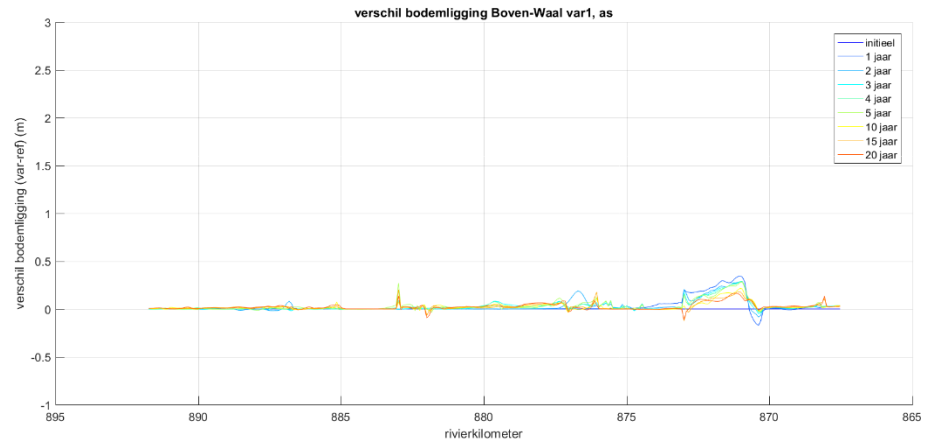
C.1.7 Variant 6



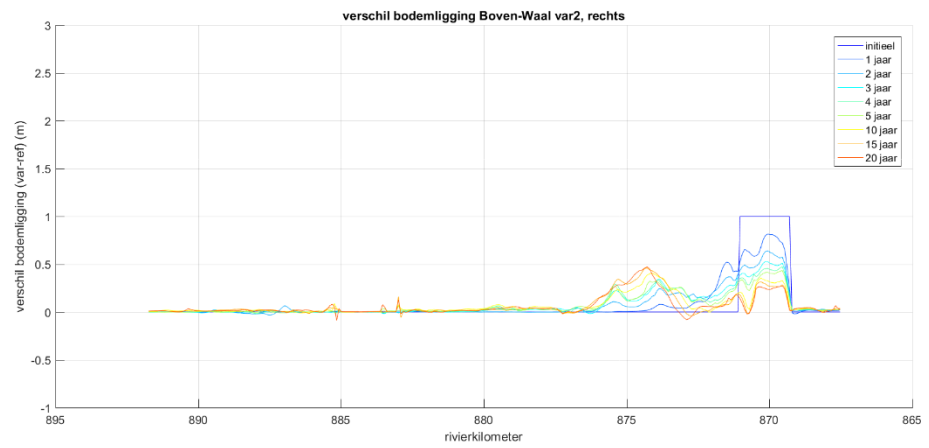
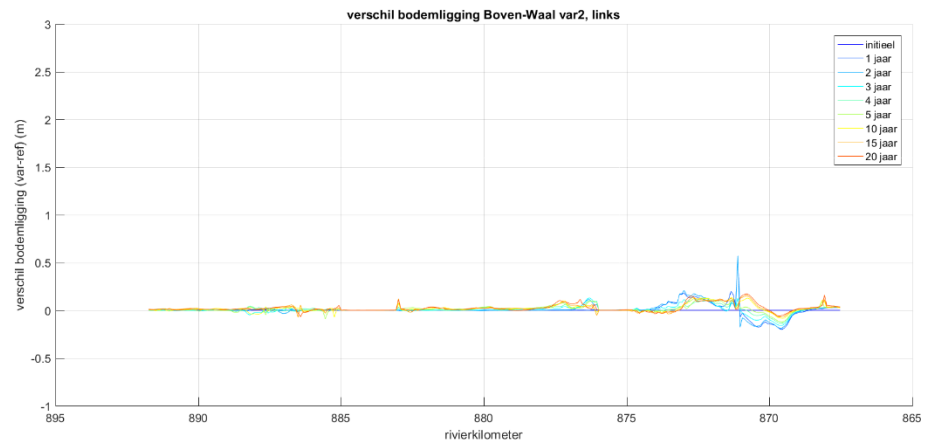
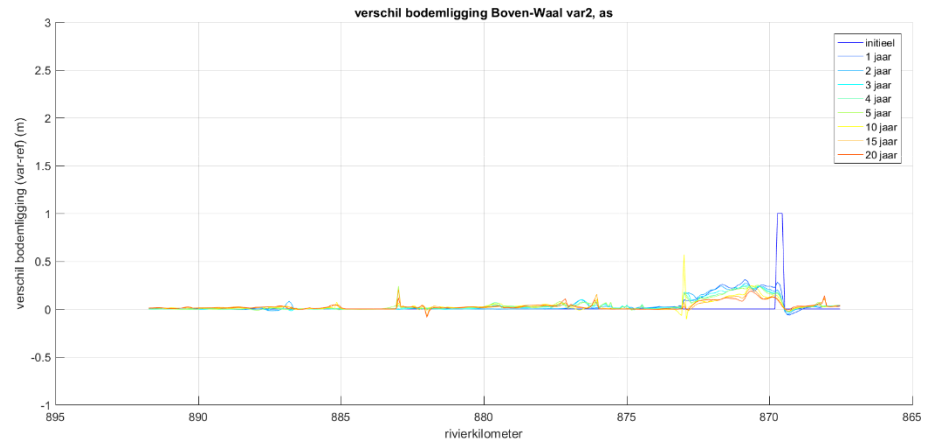
C.2 Ontwikkeling van de relatieve bodempligging t.o.v. de referentie (langsprofielen)

De figuren voor variant 5 tonen de relatieve bodempligging ten opzichte van de referentieberekening met semi-vaste lagen module. De figuren voor de andere varianten tonen de relatieve bodempligging ten opzichte van de referentie zonder semi-vaste lagen module.

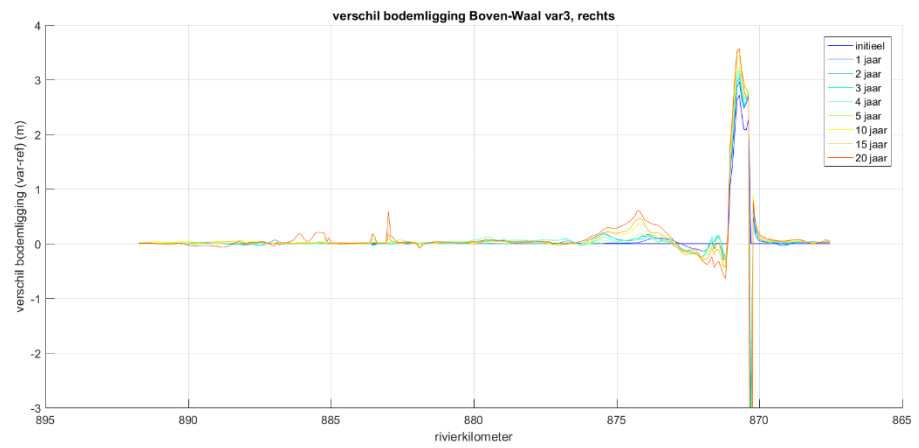
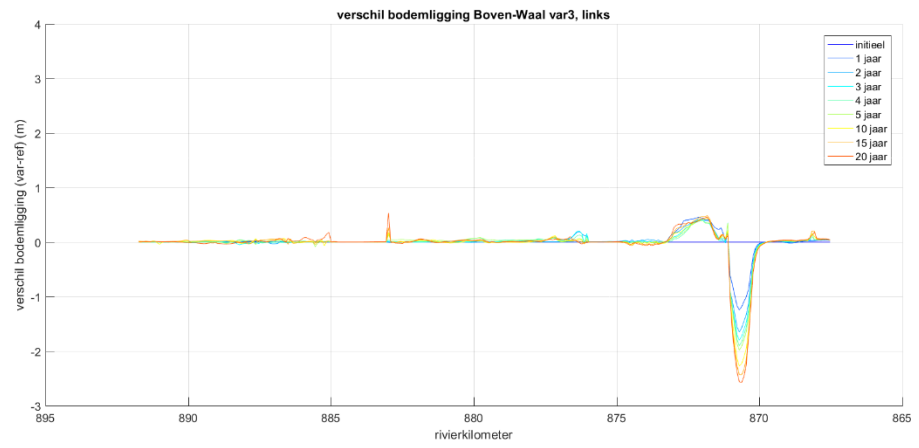
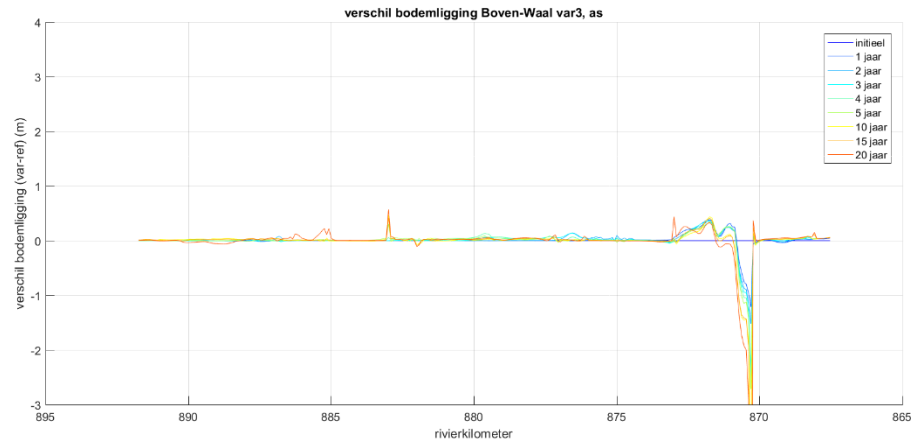
C.2.1 Variant 1



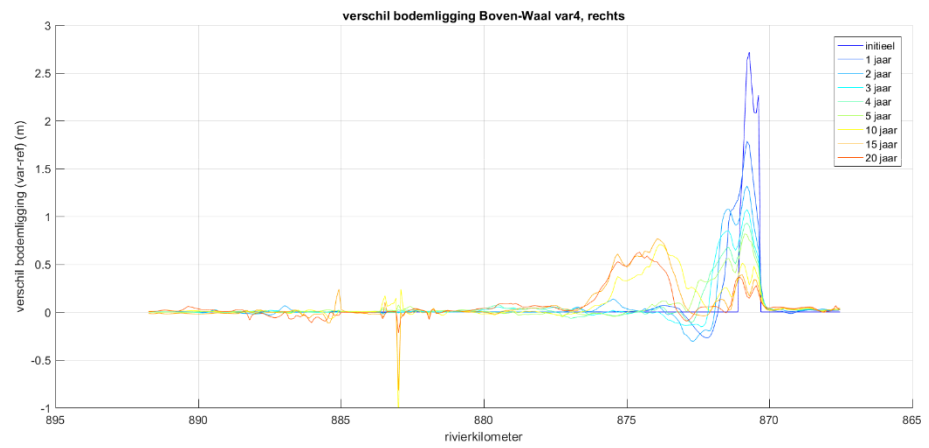
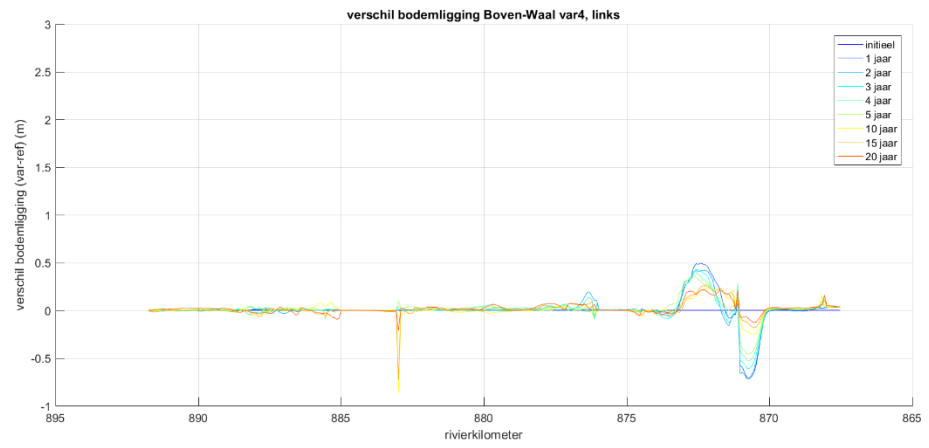
C.2.2 Variant 2



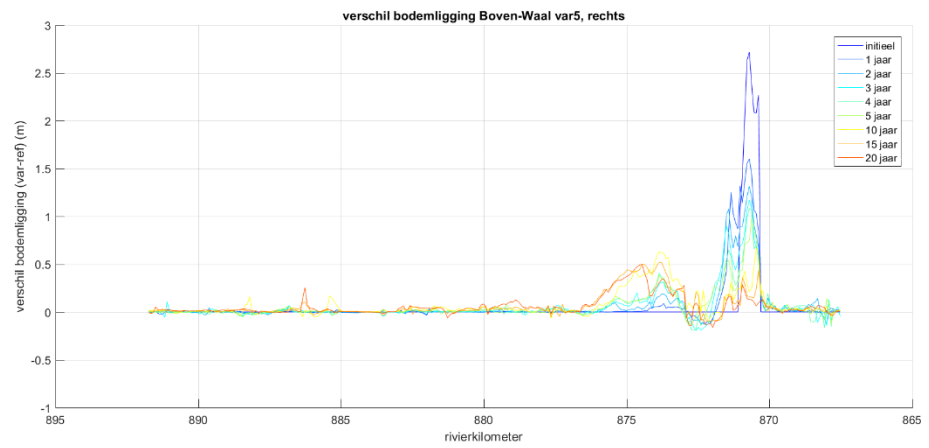
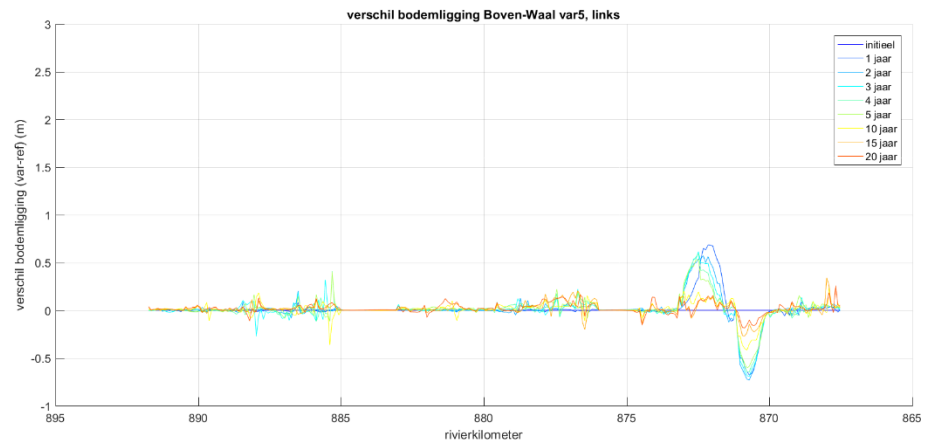
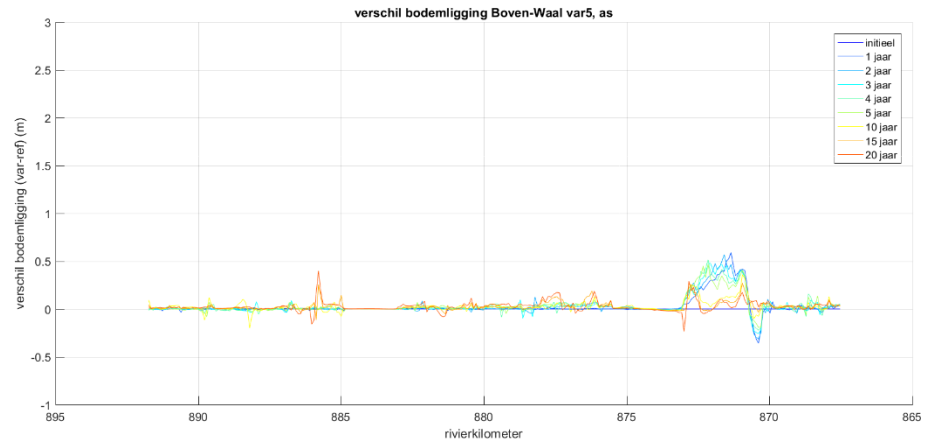
C.2.3 Variant 3



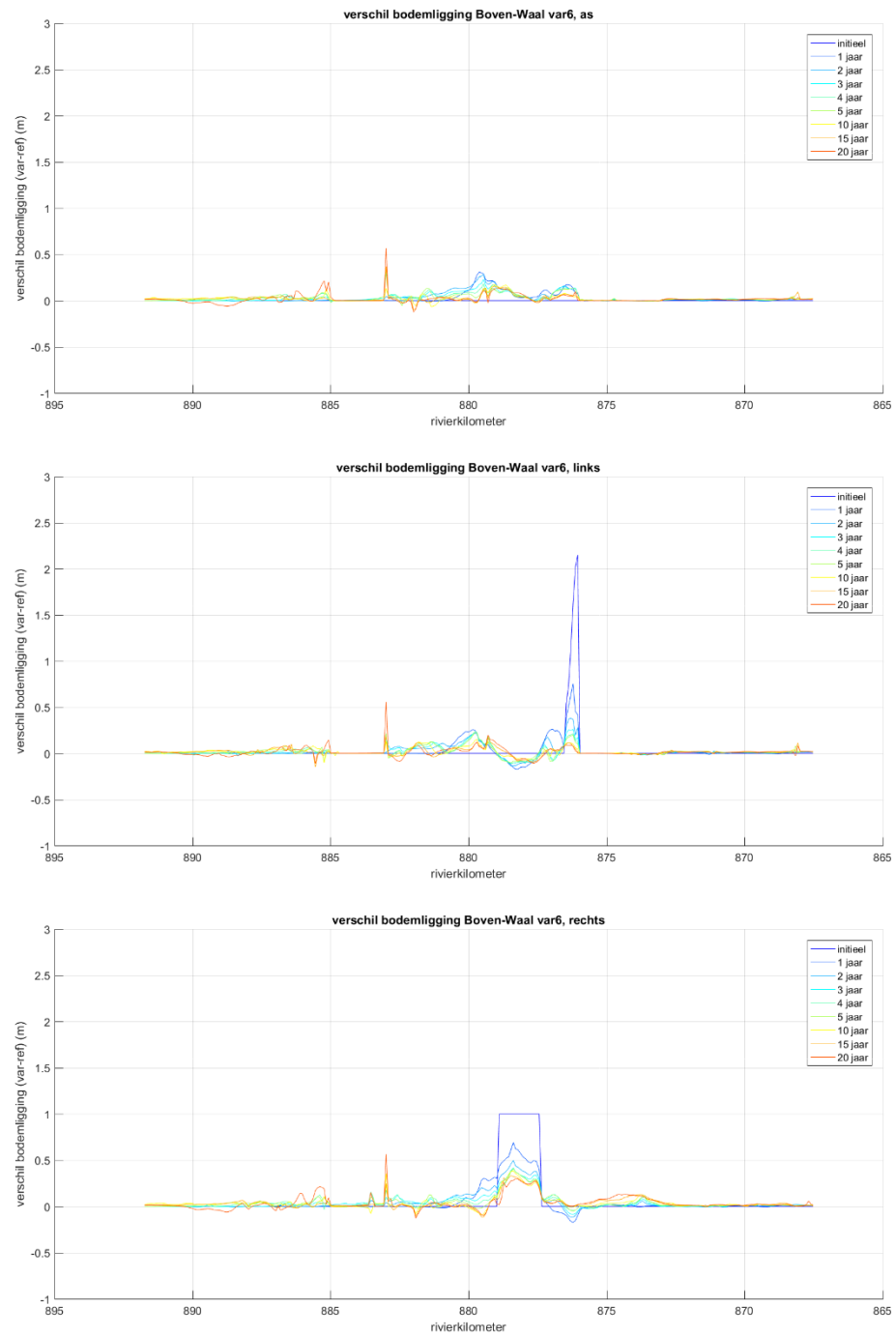
C.2.4 Variant 4



C.2.5 Variant 5



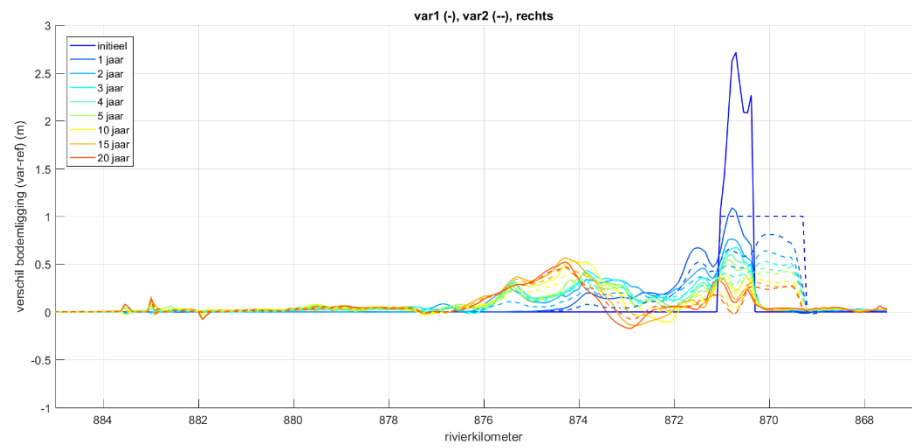
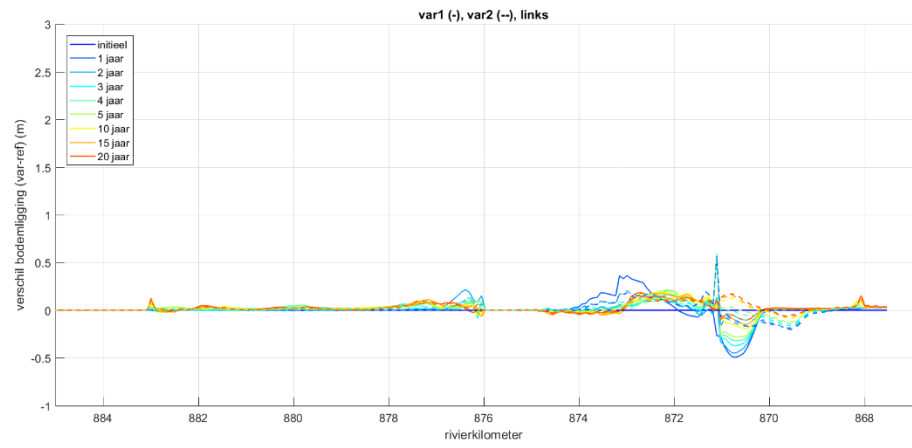
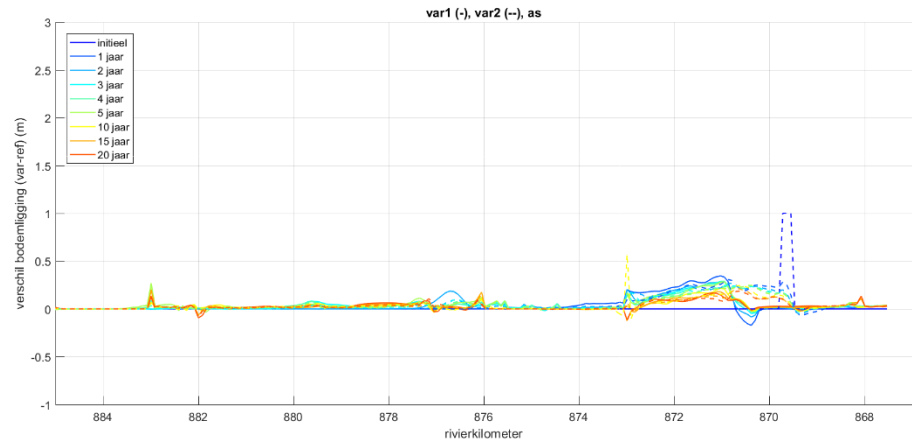
C.2.6 Variant 6



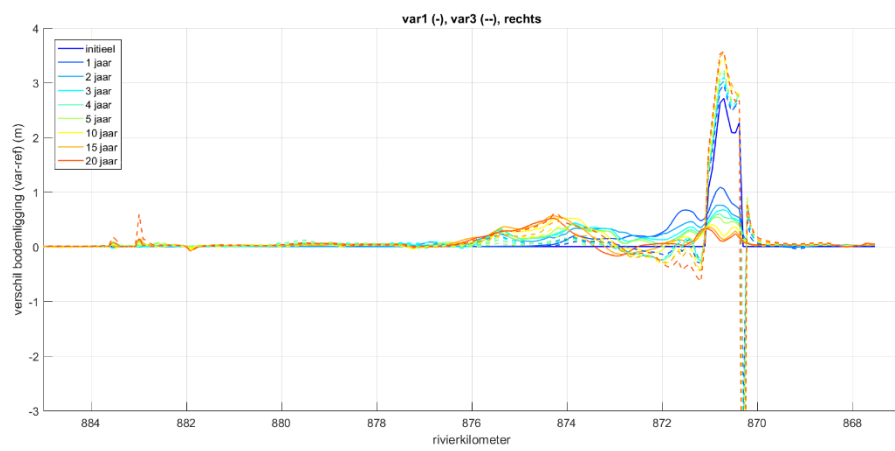
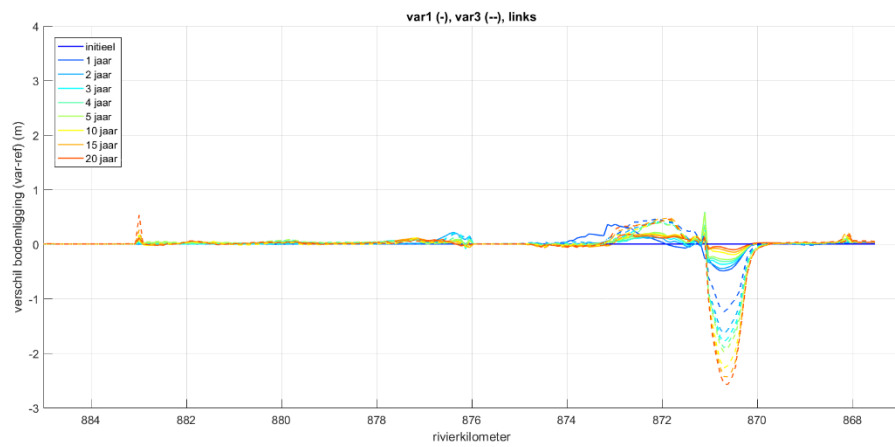
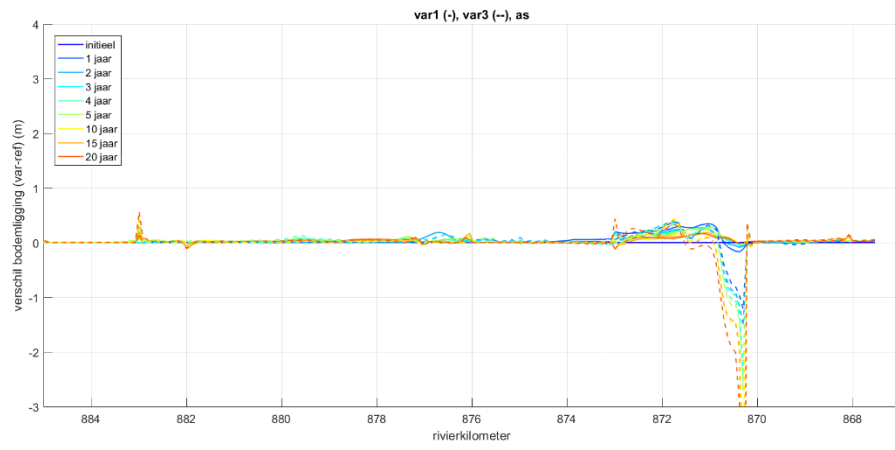
C.3 Vergelijking tussen de varianten (langsprofielen)

De figuren in deze paragraaf tonen weer de relatieve bodemligging ten opzichte van de referentiesituatie, net als de figuren in paragraaf C.2. Er worden echter steeds twee varianten met elkaar vergeleken, en om de verschillen makkelijker zichtbaar te maken is ingezoomd op het riviertraject waarin de grootste morfologische veranderingen ten opzichte van de referentie plaatsvinden.

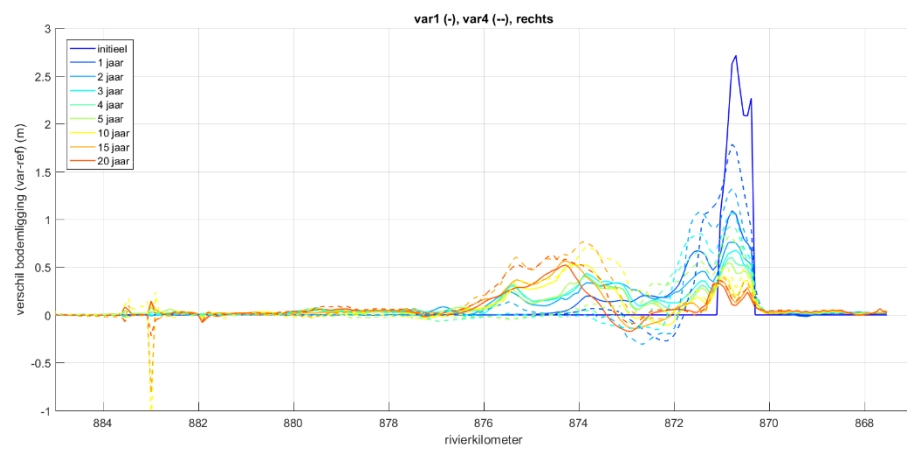
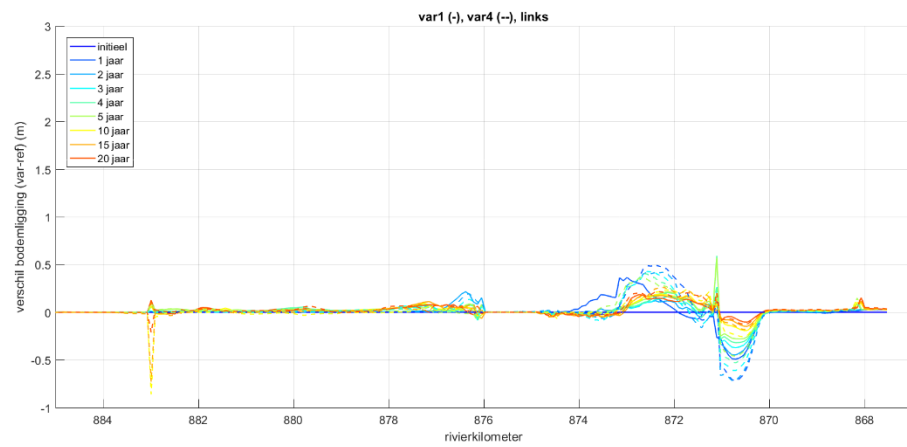
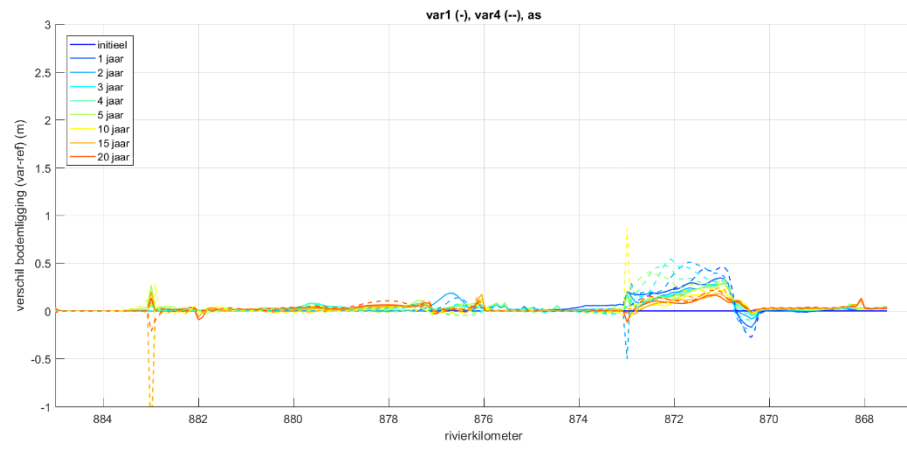
C.3.1 Variant 2 en variant 1: geometrie



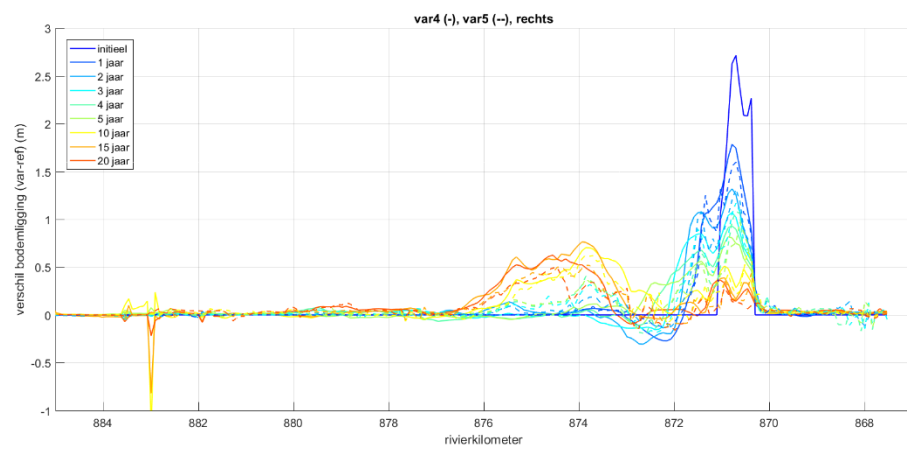
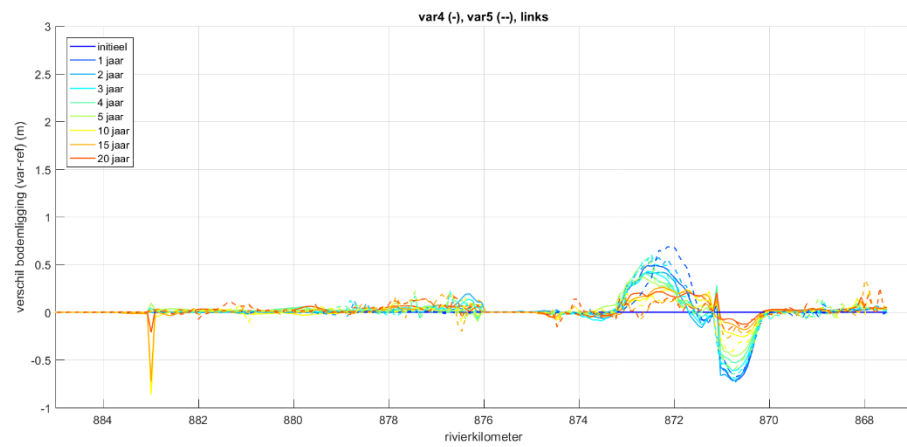
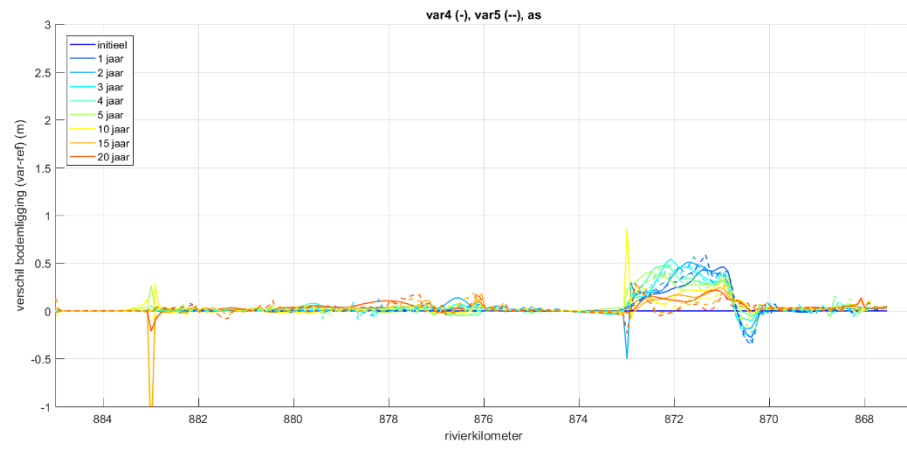
C.3.2 Variant 3 en variant 1: vaste laag



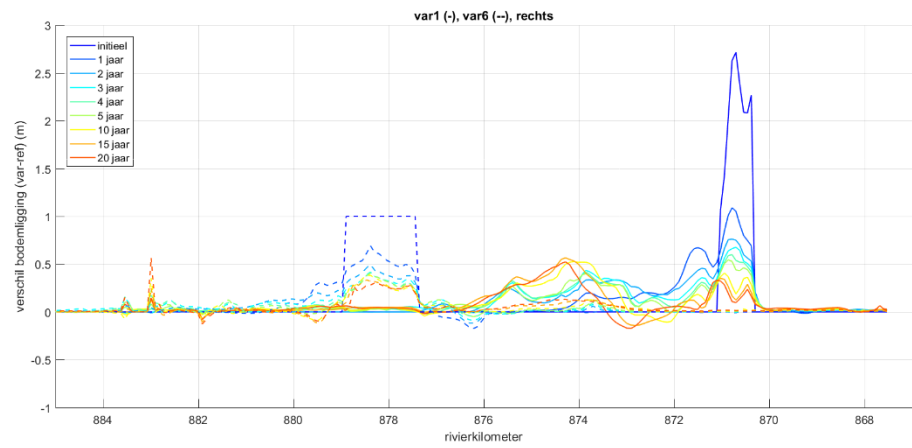
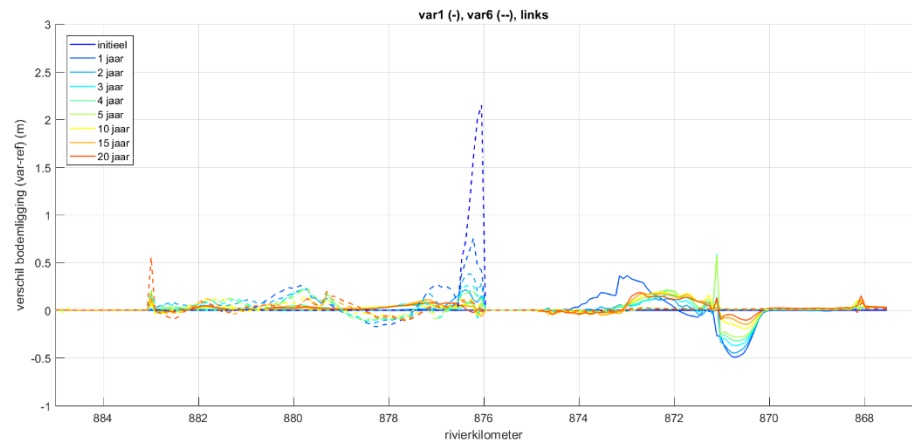
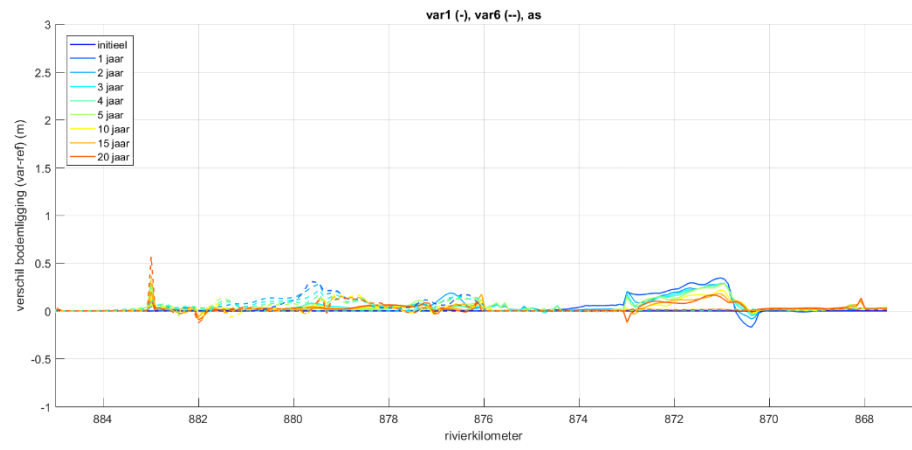
C.3.3 Variant 4 en variant 1: grover materiaal



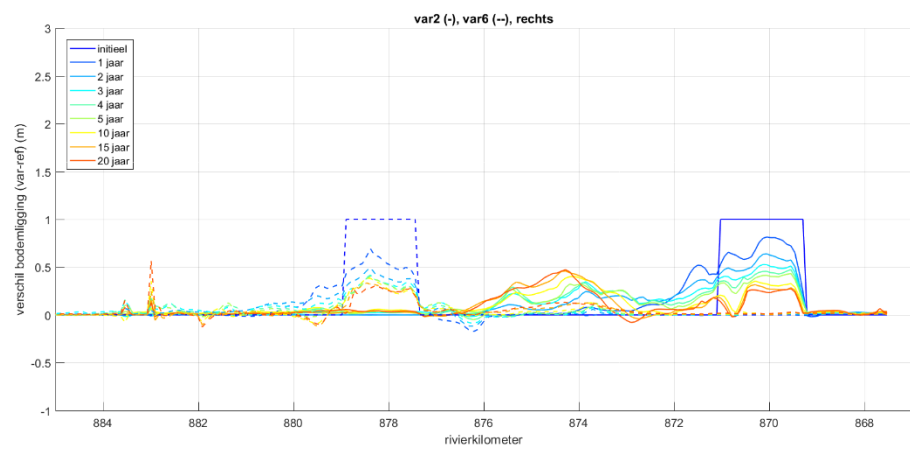
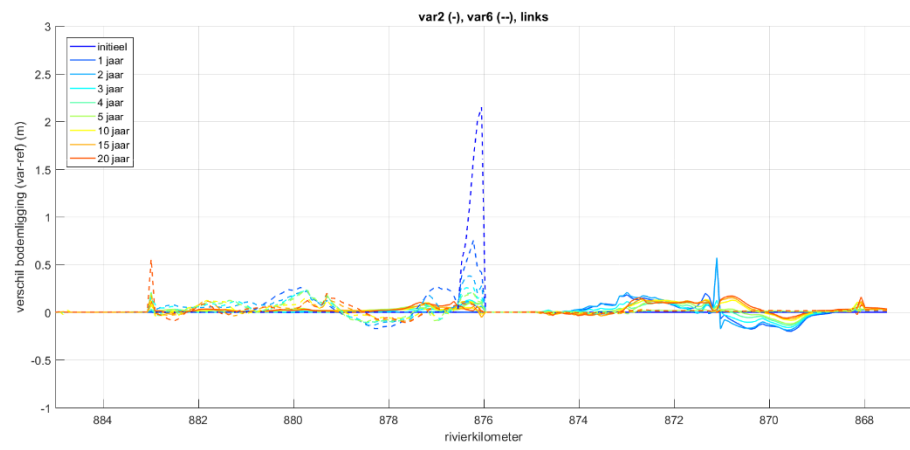
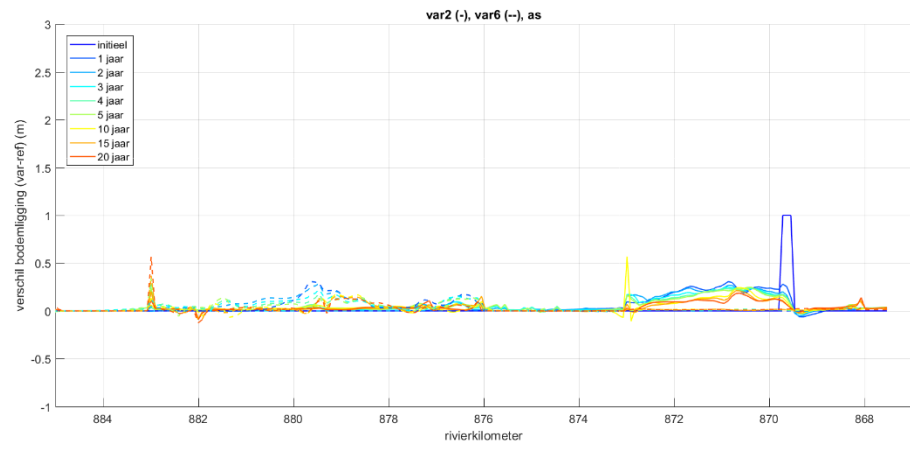
C.3.4 Variant 5 en variant 4: semi-vaste lagen module



C.3.5 Variant 6 en variant 1

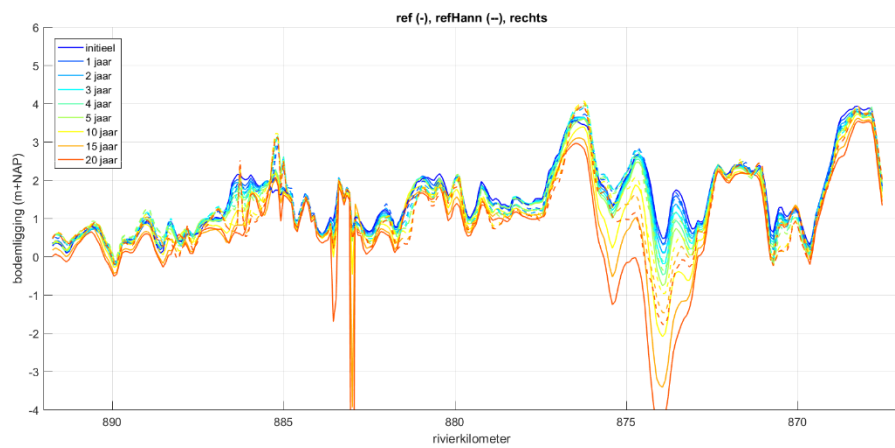
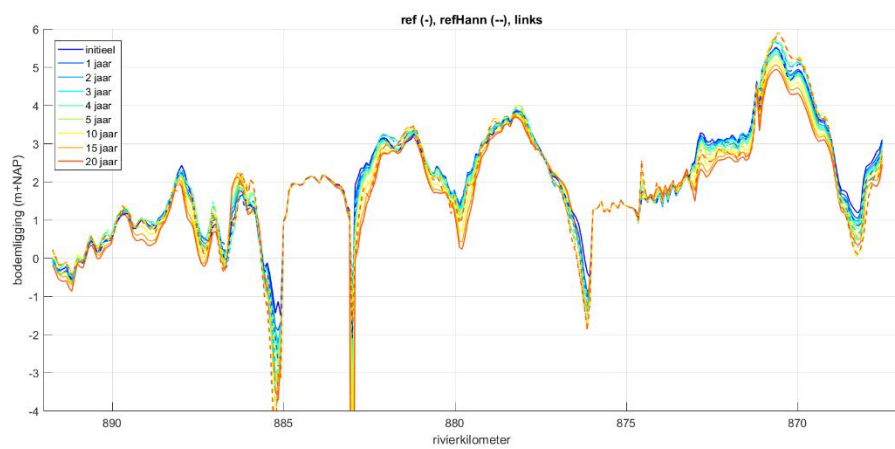
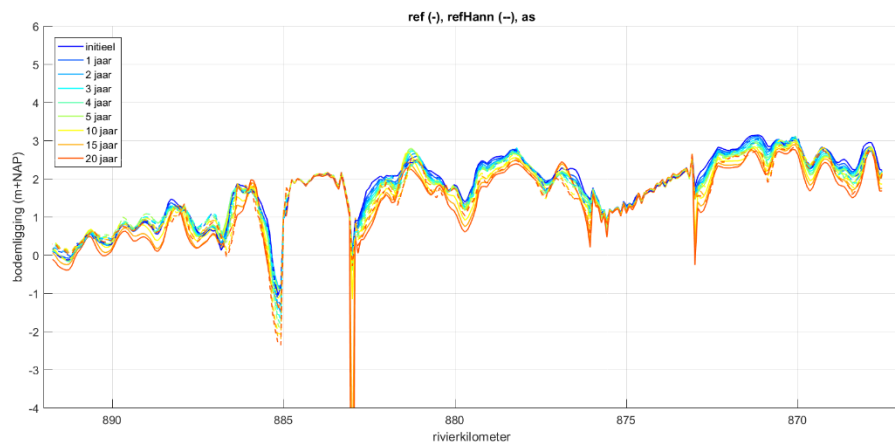


C.3.6 Variant 6 en variant 2

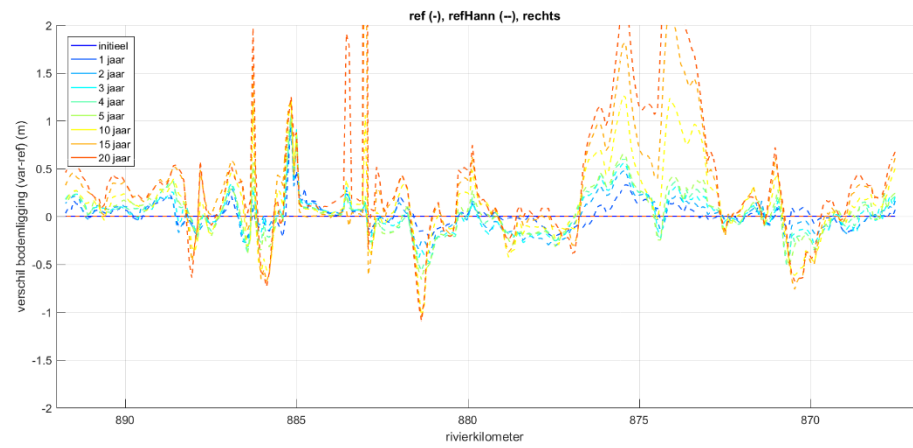
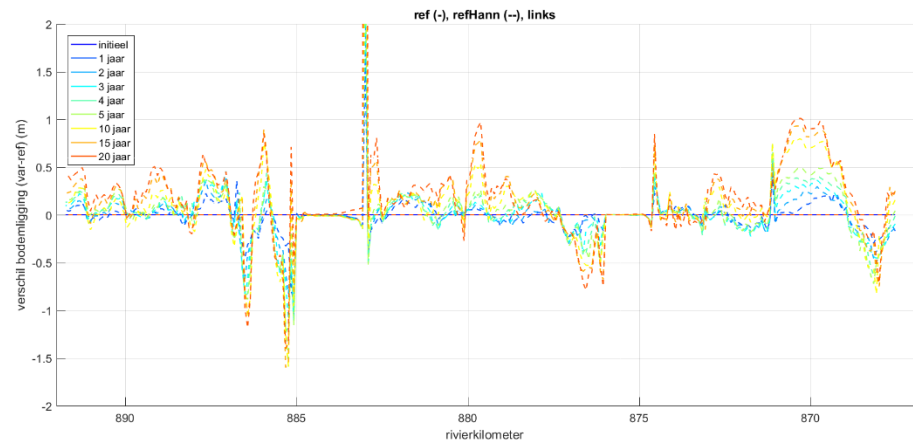
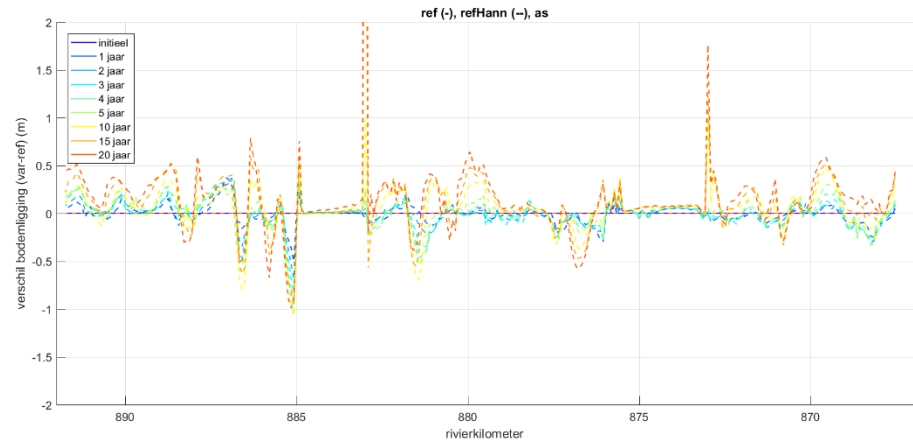


C.3.7 Referentie zonder en met semi-vaste lagen module (refHann = met semi-vaste lagen module, ref = zonder)

C.3.7.1. Absolute bodemligging

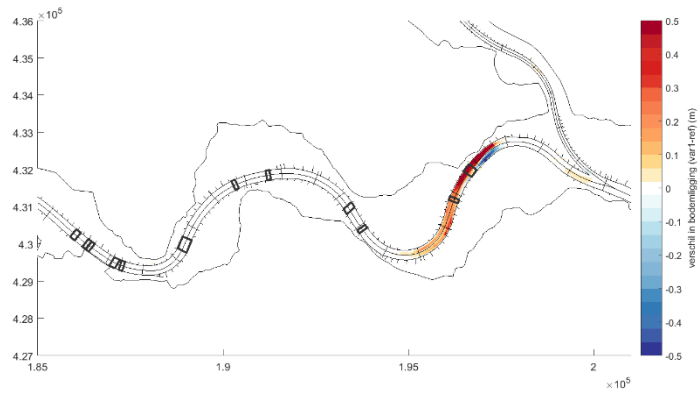


C.3.7.2. Relatieve bodemligging

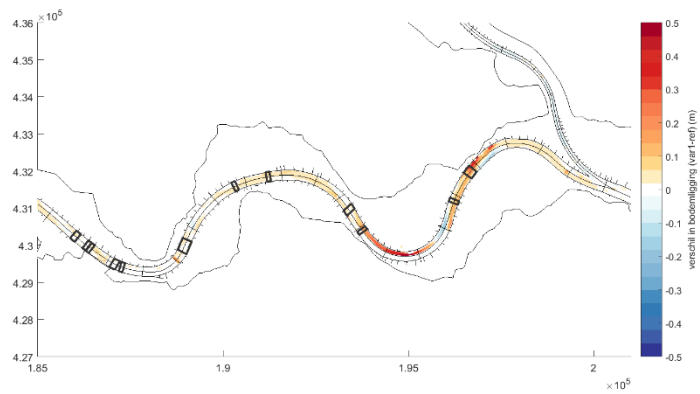


C.4 Ontwikkeling van de relatieve bodemligging t.o.v. de referentie (2D-kaarten)

C.4.1 Variant 1

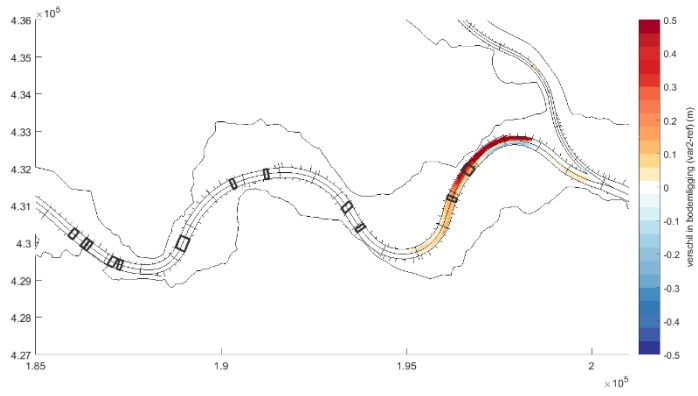


na 1 jaar

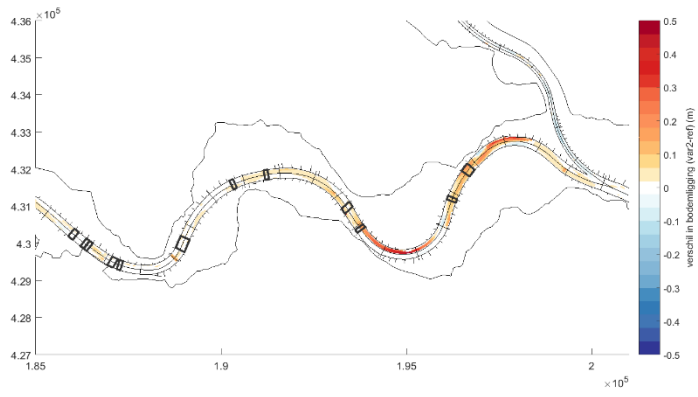


na 20 jaar

C.4.2 Variant 2

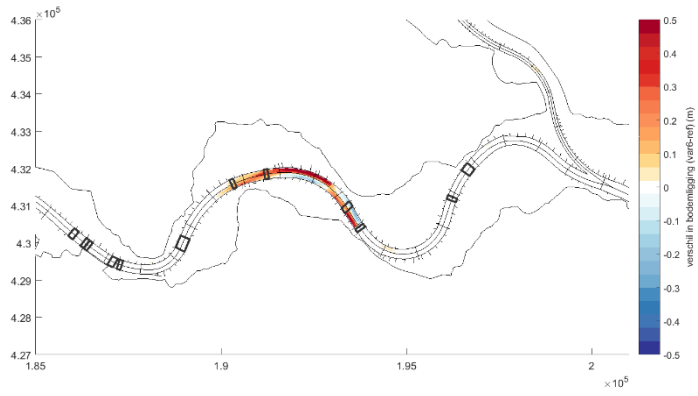


na 1 jaar

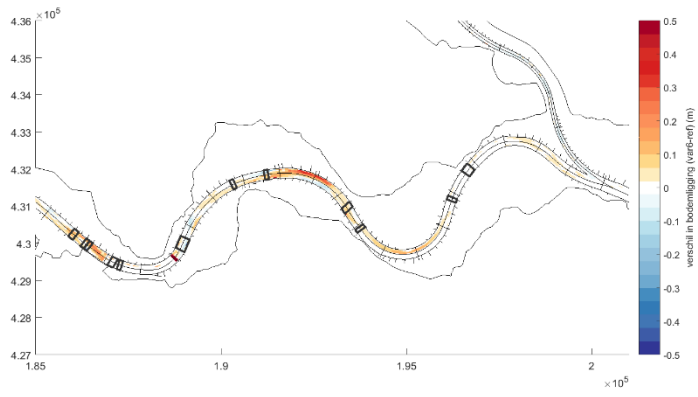


na 20 jaar

C.4.3 Variant 6



na 1 jaar



na 20 jaar

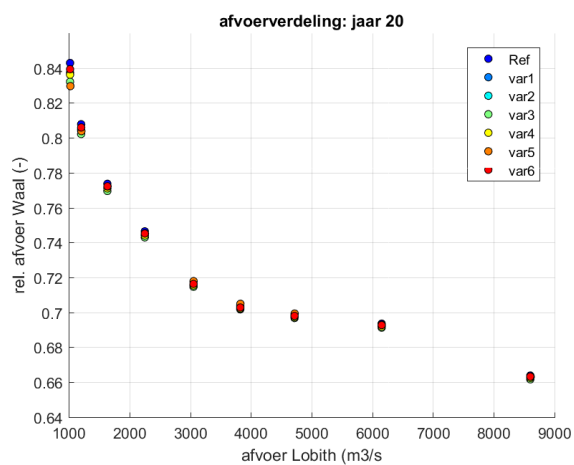
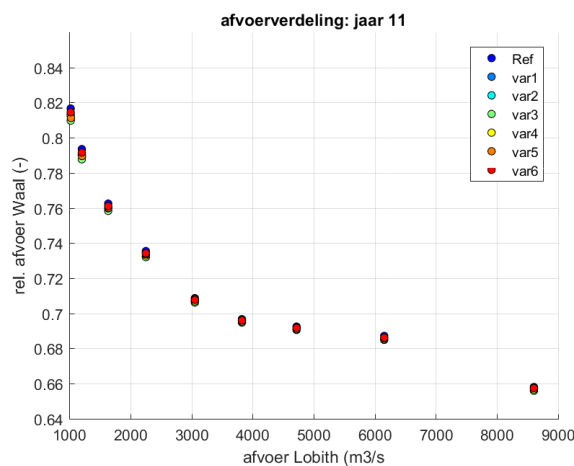
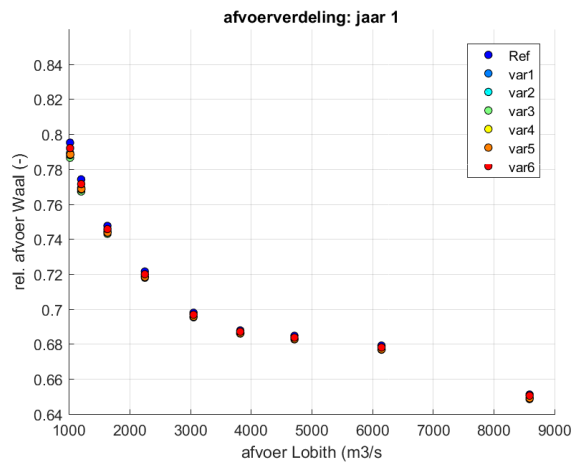
D Animaties morfologische ontwikkeling

Zie map **Animaties**

E Effect op de afvoerverdeling

E.1 Waal-afvoer relatief t.o.v. de afvoer bij Lobith

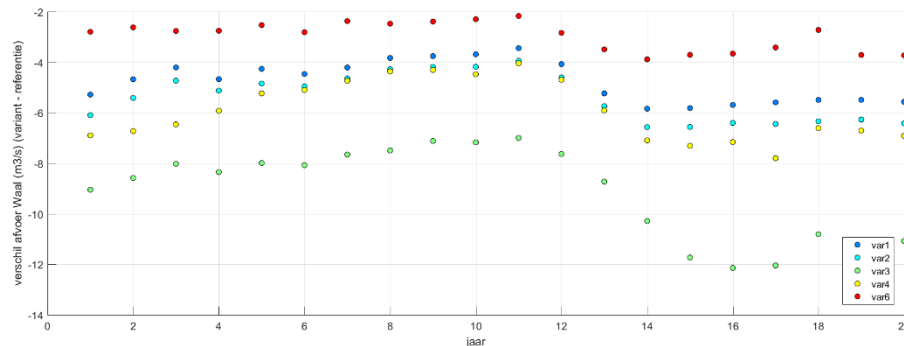
Onderstaande figuren tonen de afvoer naar de Waal voor de negen doorgerekende afvoerniveaus bij Lobith en voor verschillende momenten in de berekeningen: in het eerste, 11^e en 20^e (laatste) jaar. De afvoer naar de Waal wordt gepresenteerd als het aandeel van de Waal-afvoer aan de afvoer bij Lobith. Er gaan in de berekeningen dus 65-85% van de afvoer bij Lobith naar de Waal.



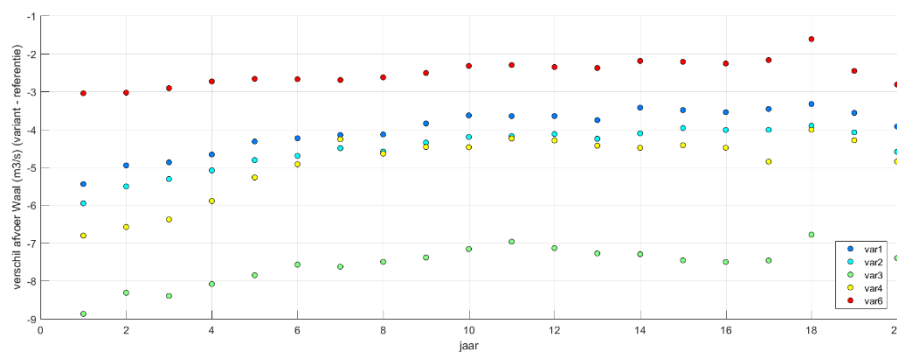
E.2 Verschil in Waal-afvoer tussen variant en referentie: verloop in de tijd voor lage afvoeren

De figuren hieronder laten het verschil in Waal-afvoer tussen de suppletievarianten en de referentie in de loop der tijd zien, elk figuur voor een ander afvoerniveau. Op de x-as staan de doorgerekende jaren, de berekeningen omvatten telkens 20 jaar.

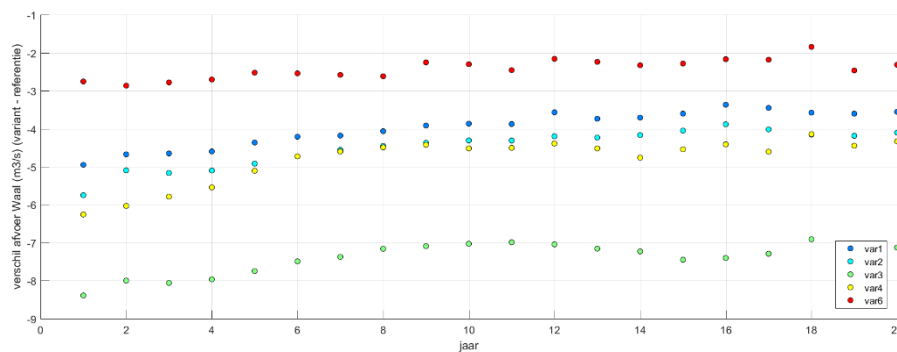
E.2.1 $Q_{\text{Lobith}} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



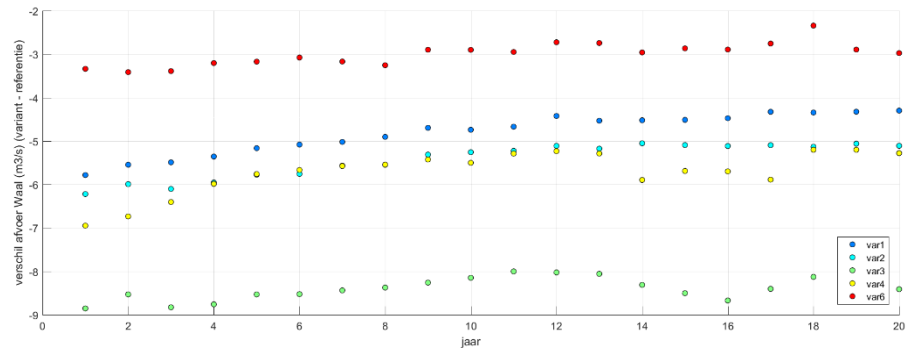
E.2.2 $Q_{\text{Lobith}} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



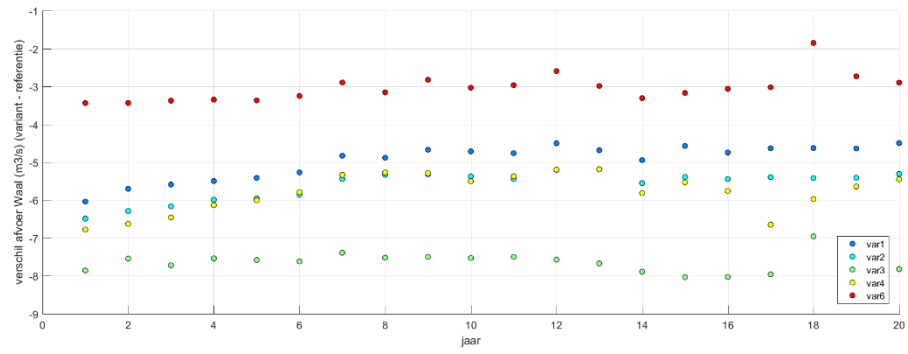
E.2.3 $Q_{\text{Lobith}} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



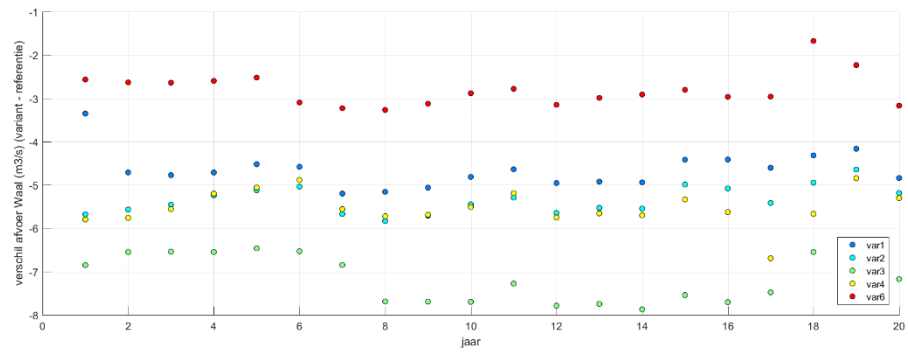
E.2.4 $Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



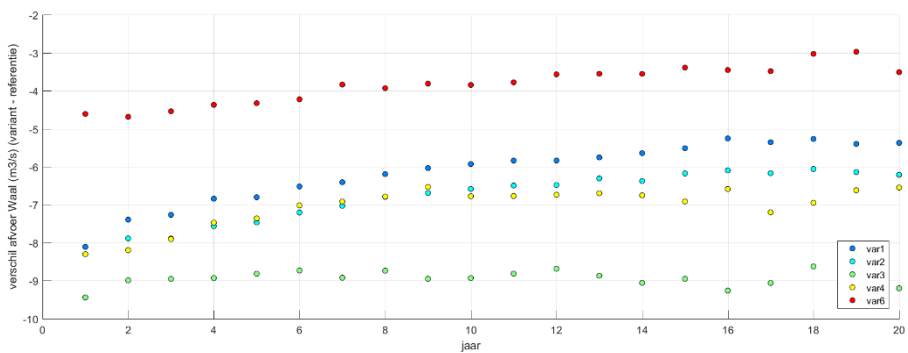
E.2.5 $Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



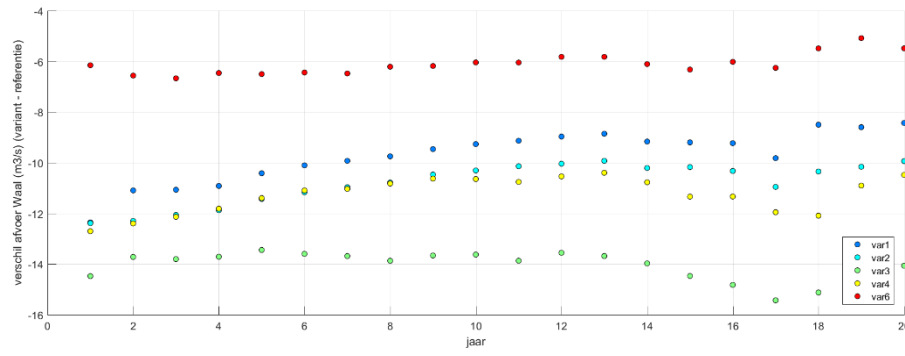
E.2.6 $Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



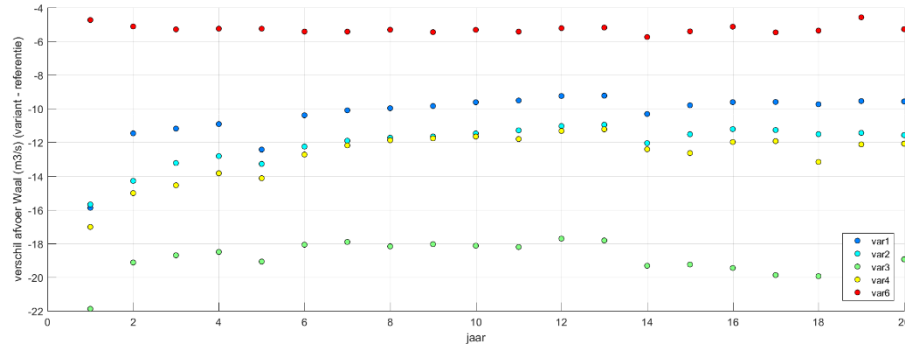
E.2.7 $Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



E.2.8 $Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$

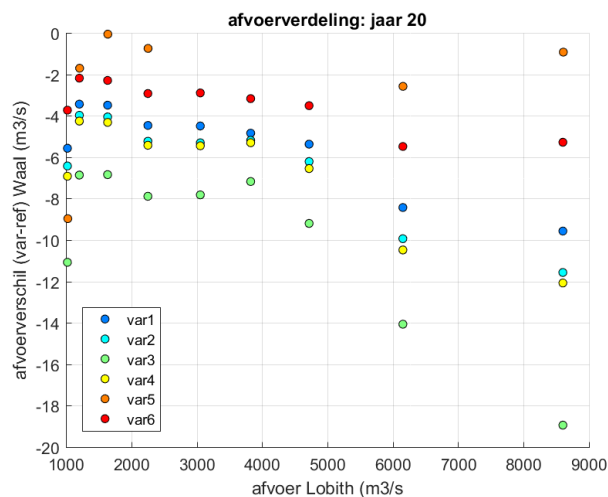
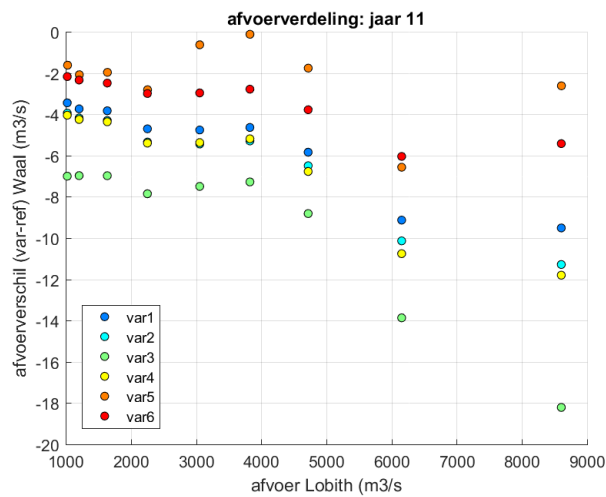
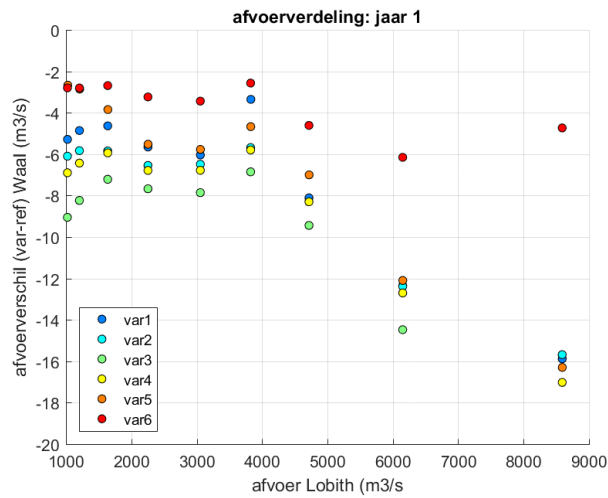


E.2.9 $Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



E.3 Verschil in Waal-afvoer tussen variant en referentie: voor alle afvoerniveaus en verschillende momenten in de berekening

De figuren hieronder tonen het verschil in Waal-afvoer tussen de varianten en de referentie voor de negen doorgerekende afvoerniveaus bij Lobith en voor verschillende momenten in de berekening.

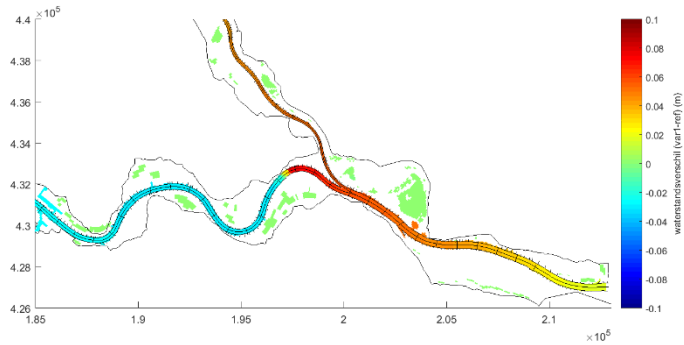


F Invloed op waterstanden

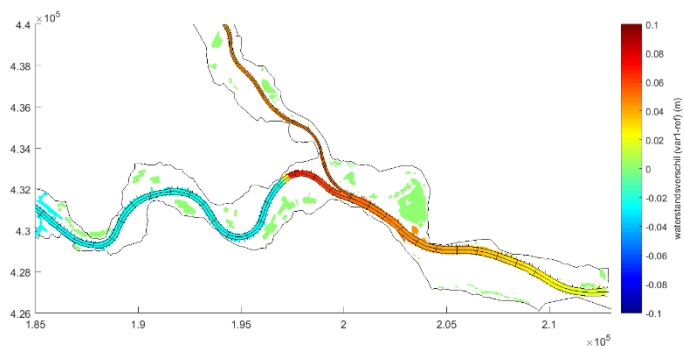
F.1 Waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 1 direct na aanleg

Onderstaande figuren tonen het waterstandsverschil tussen de situaties met en zonder suppletievariant 1, nog voordat er morfologische veranderingen zijn opgetreden. Er is voor elk doorgerekend afvoerniveau een figuur gemaakt.

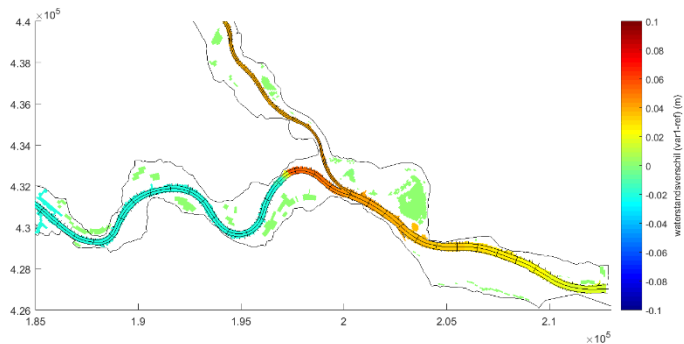
F.1.1 $Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



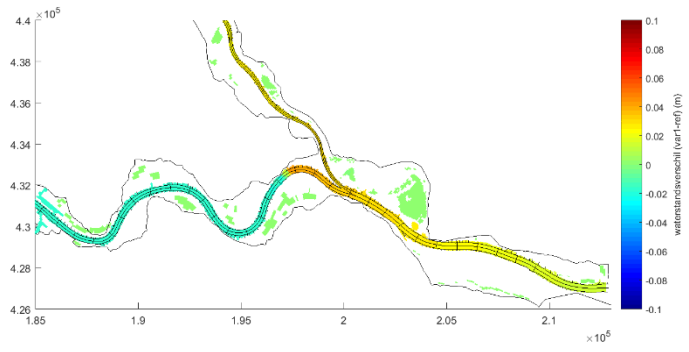
F.1.2 $Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



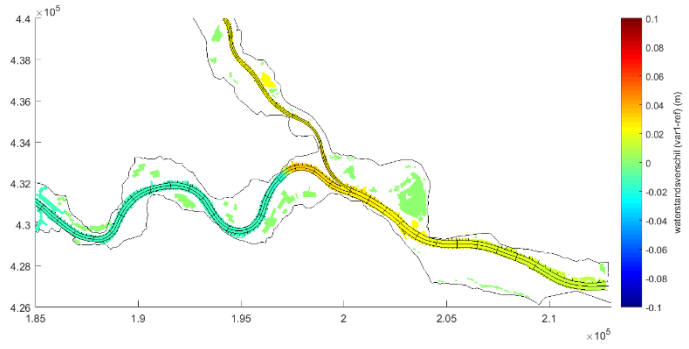
F.1.3 $Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



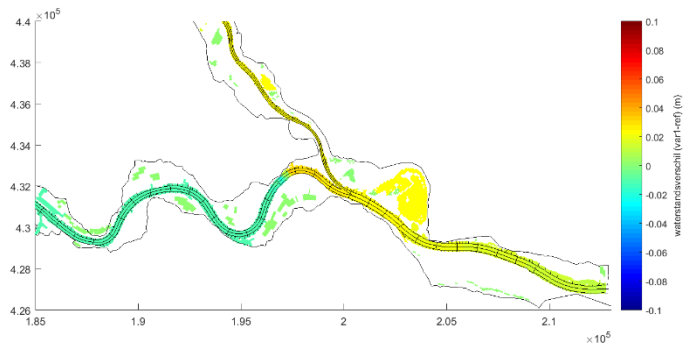
F.1.4 $Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



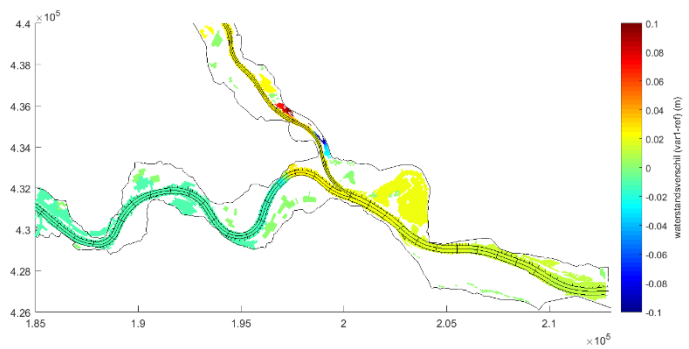
F.1.5 $Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



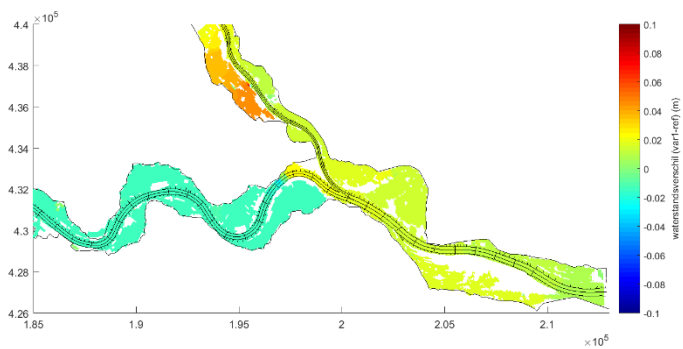
F.1.6 $Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



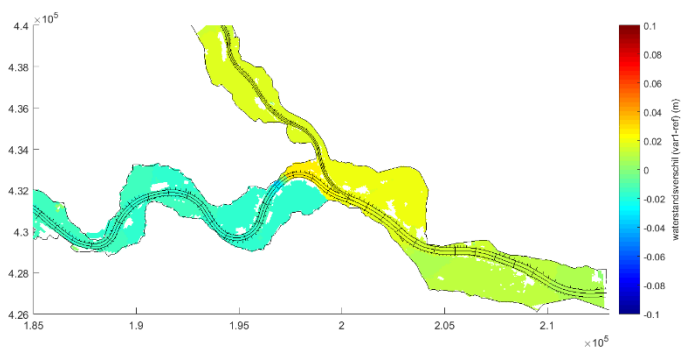
F.1.7 $Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



F.1.8 $Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$



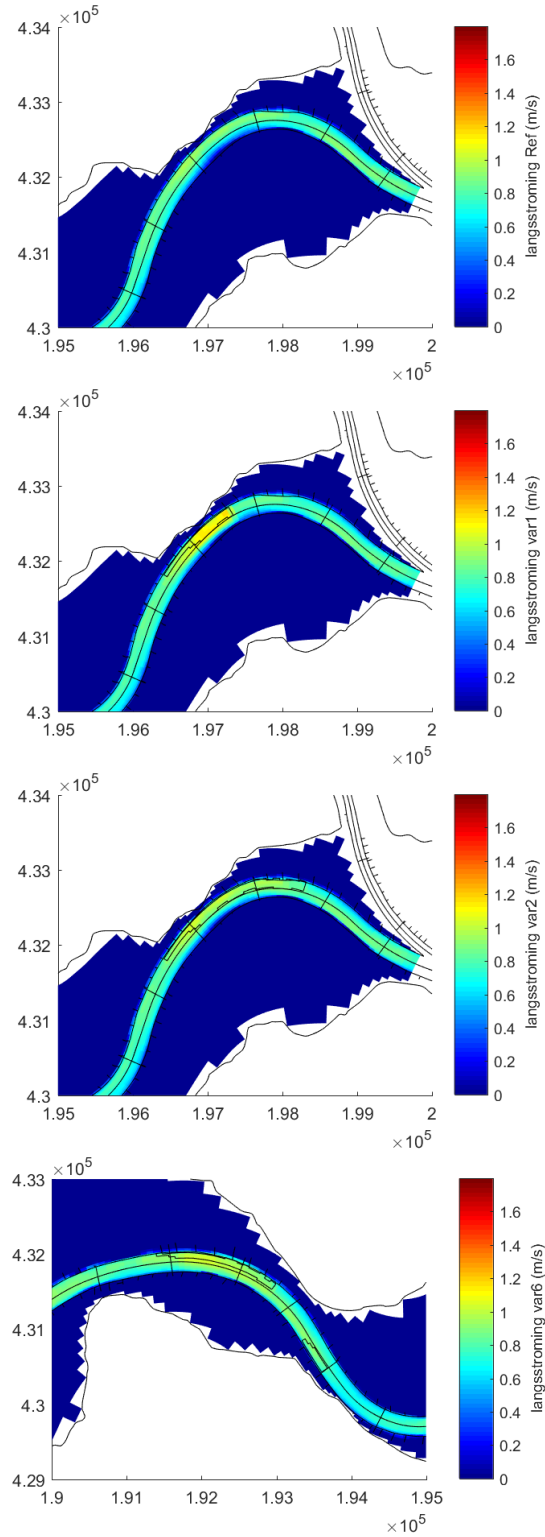
F.1.9 $Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



G Invloed op stroomsnelheden

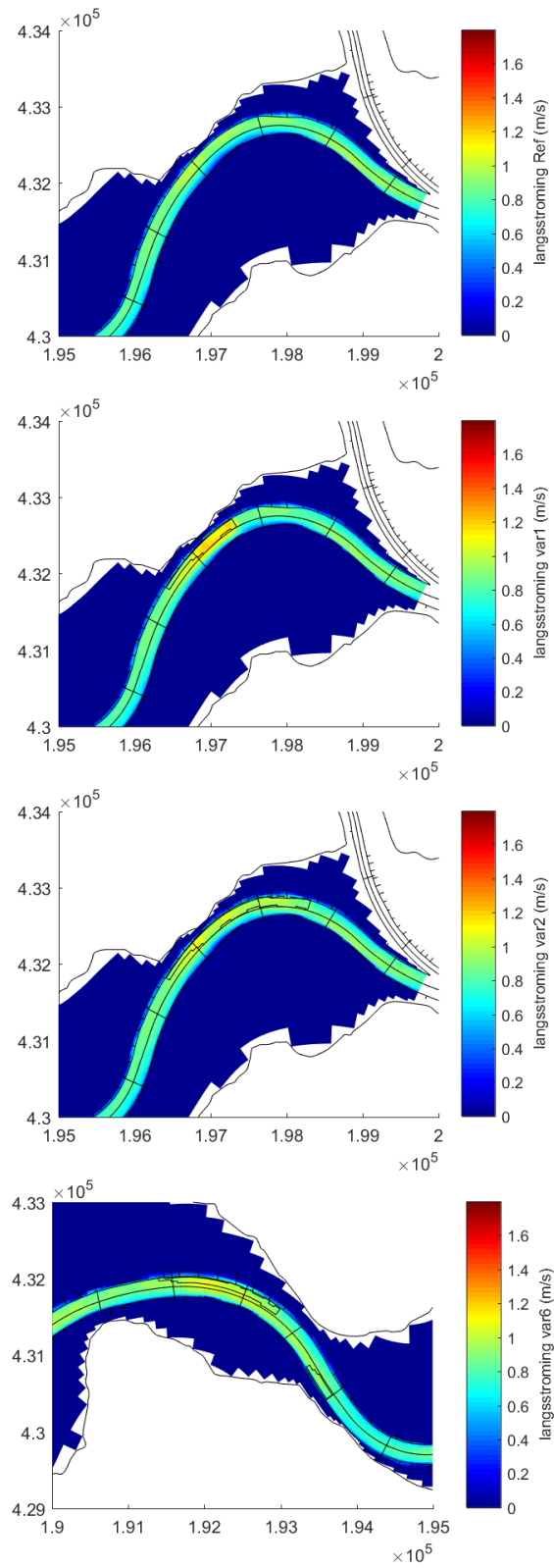
G.1 Absolute stroomsnelheid in langsrichting direct na aanleg

G.1.1 $Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



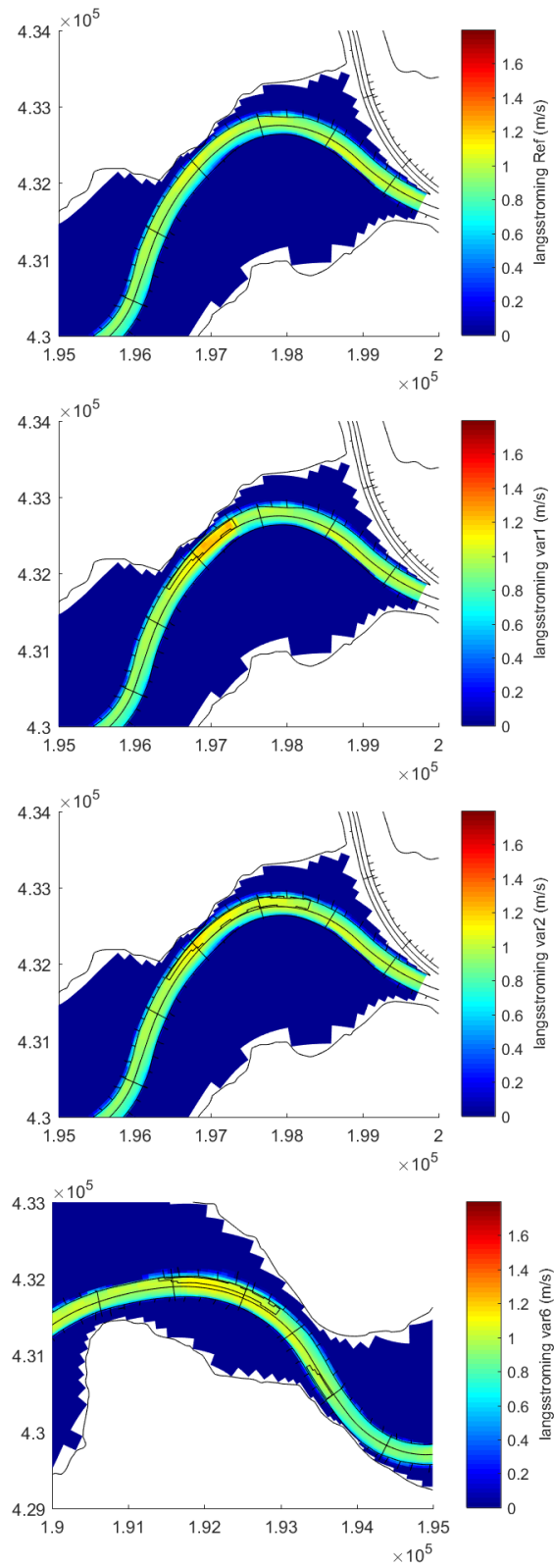
G.1.2

$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



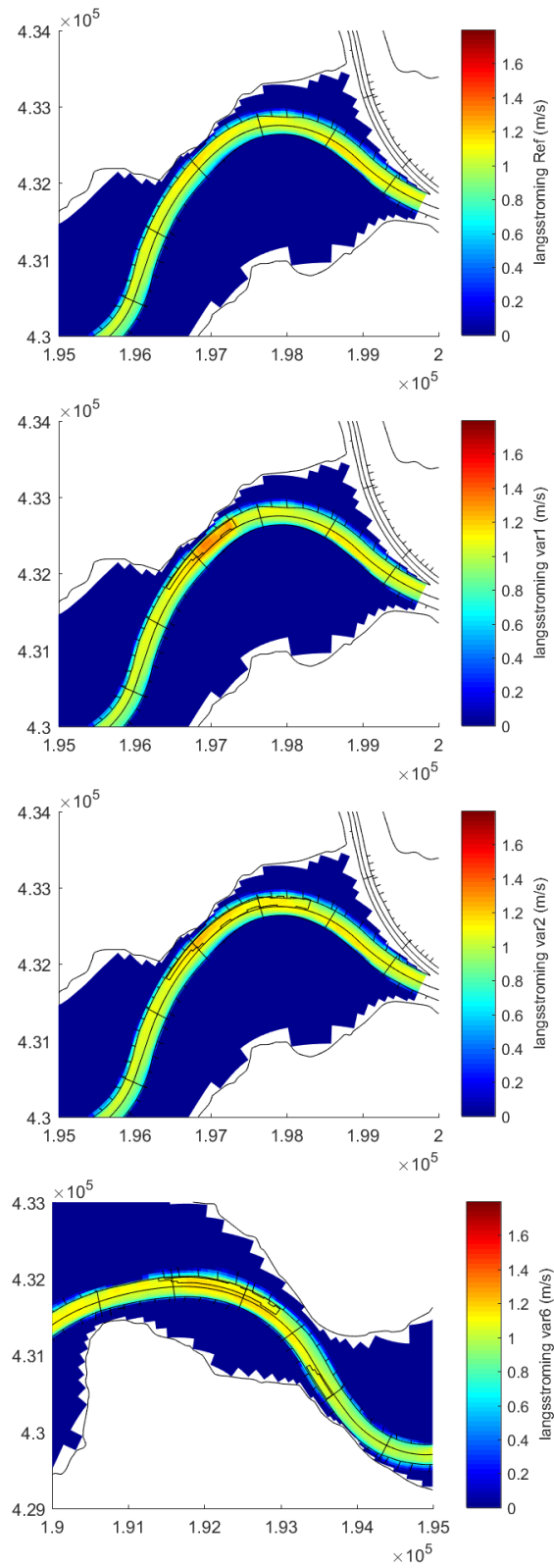
G.1.3

$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



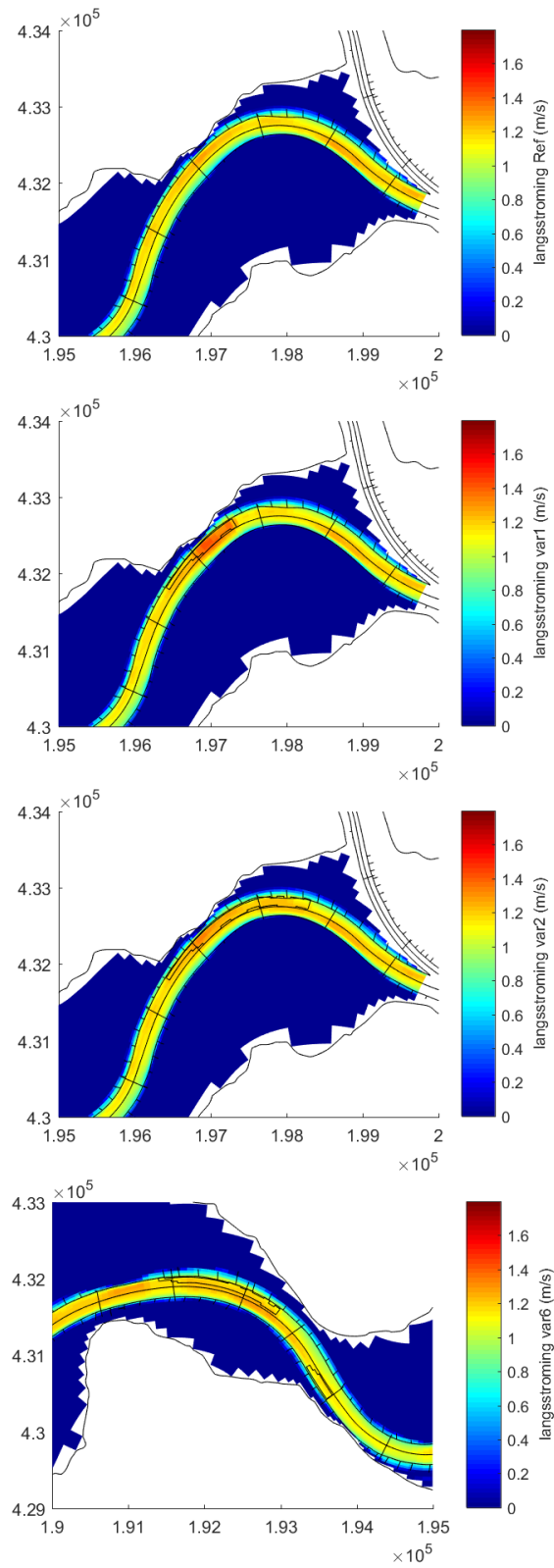
G.1.4

$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



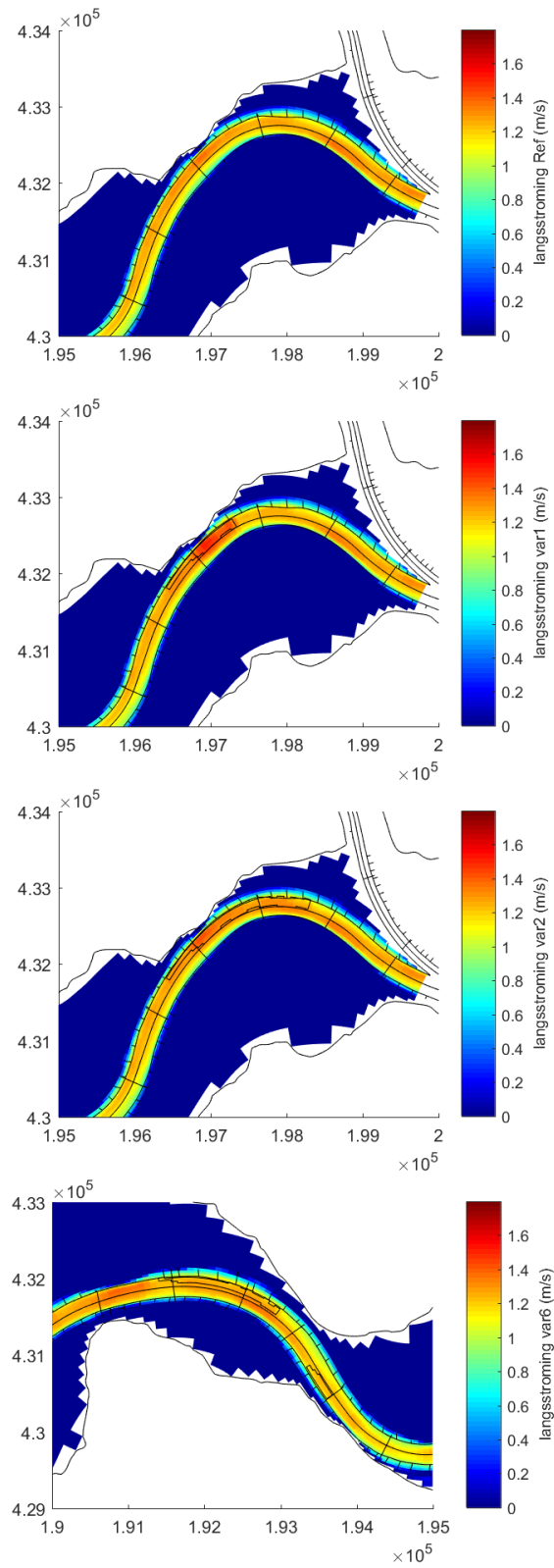
G.1.5

$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



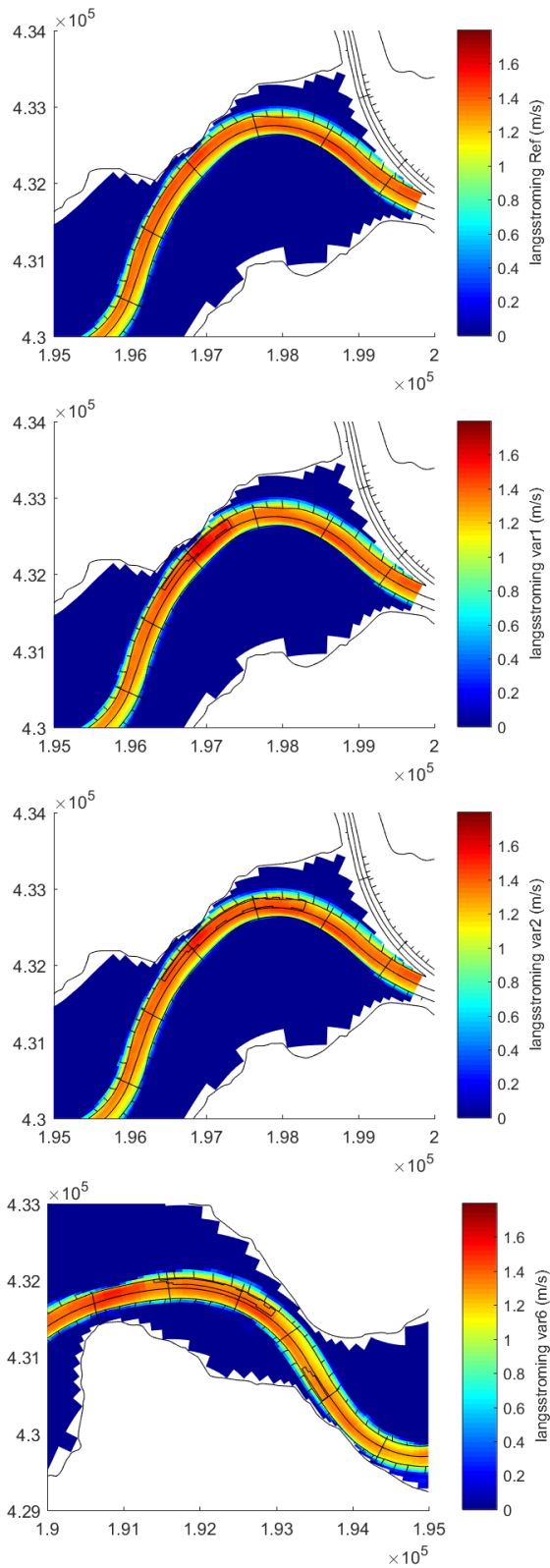
G.1.6

$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



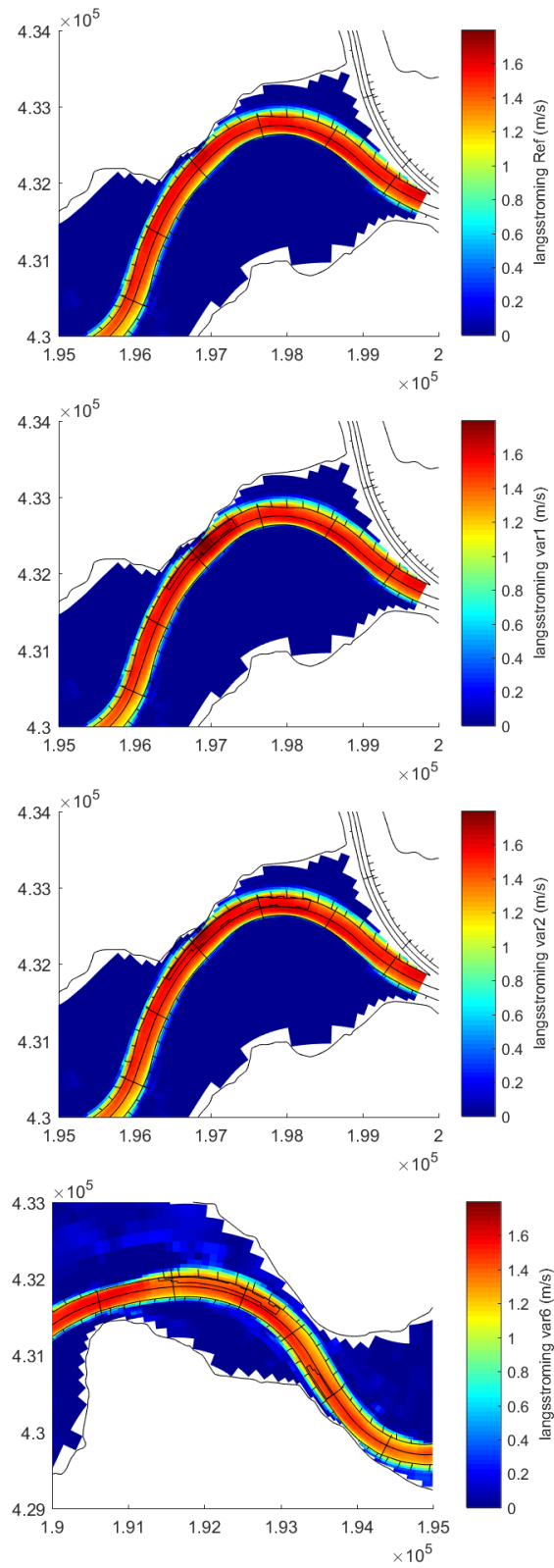
G.1.7

$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



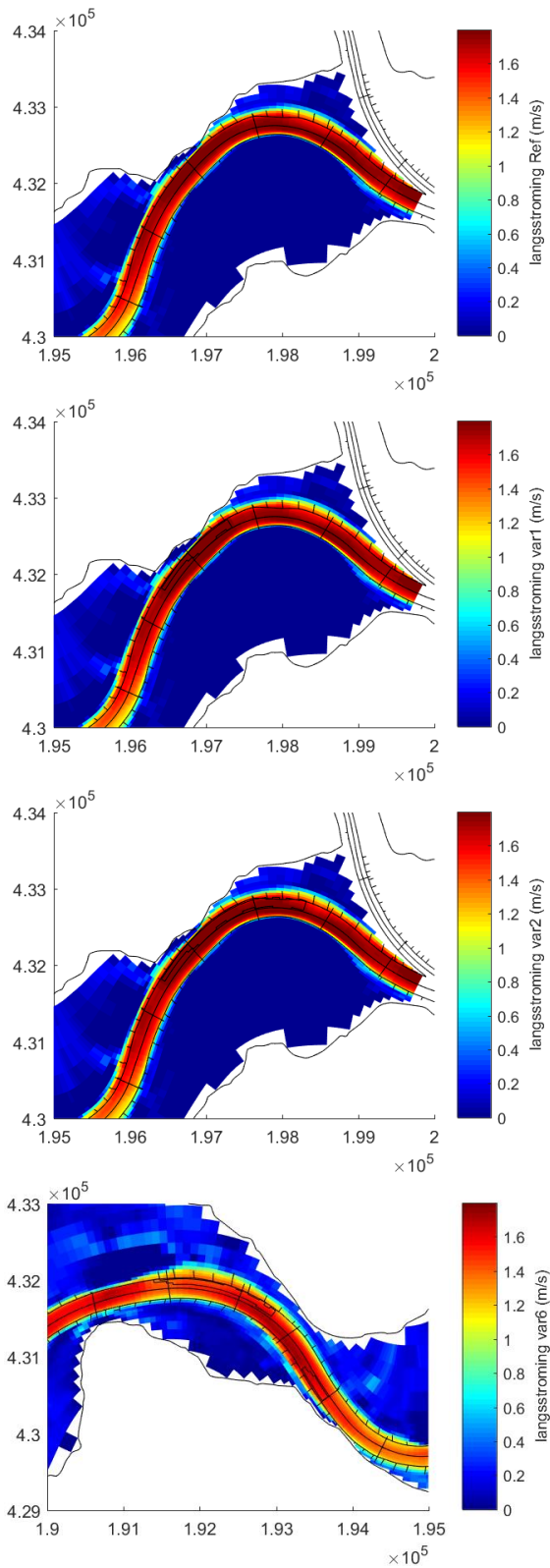
G.1.8

$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$



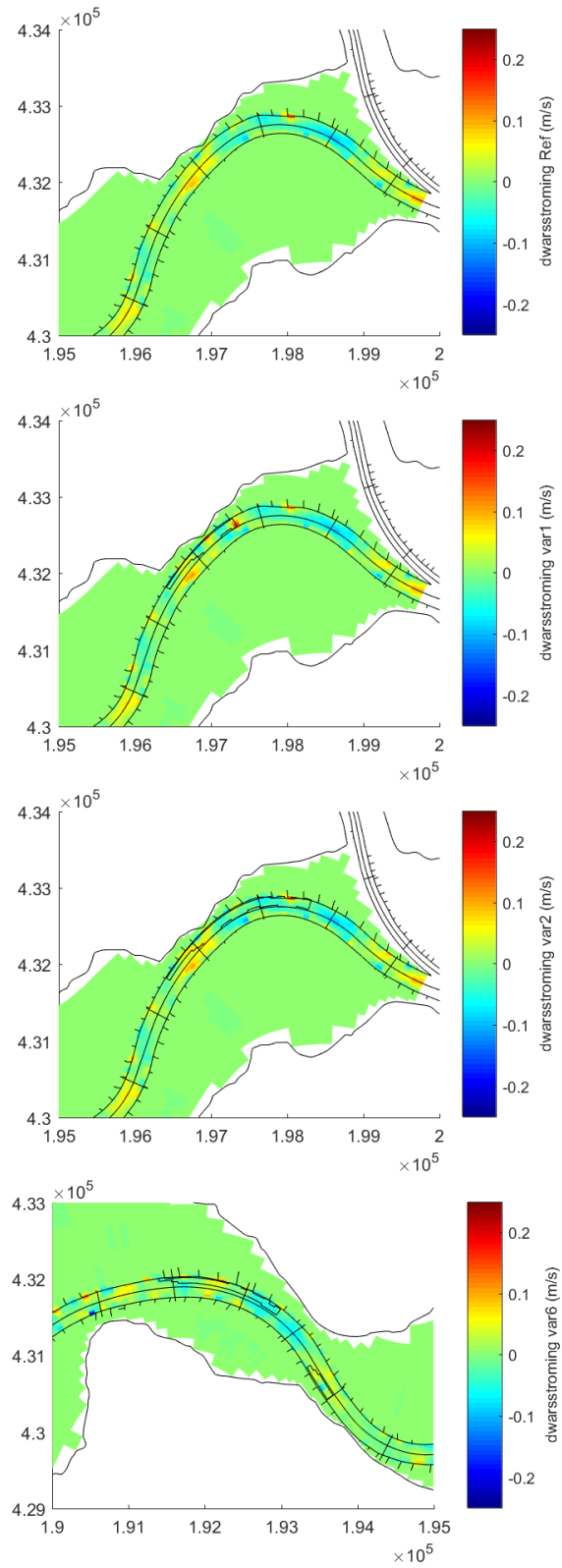
G.1.9

$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



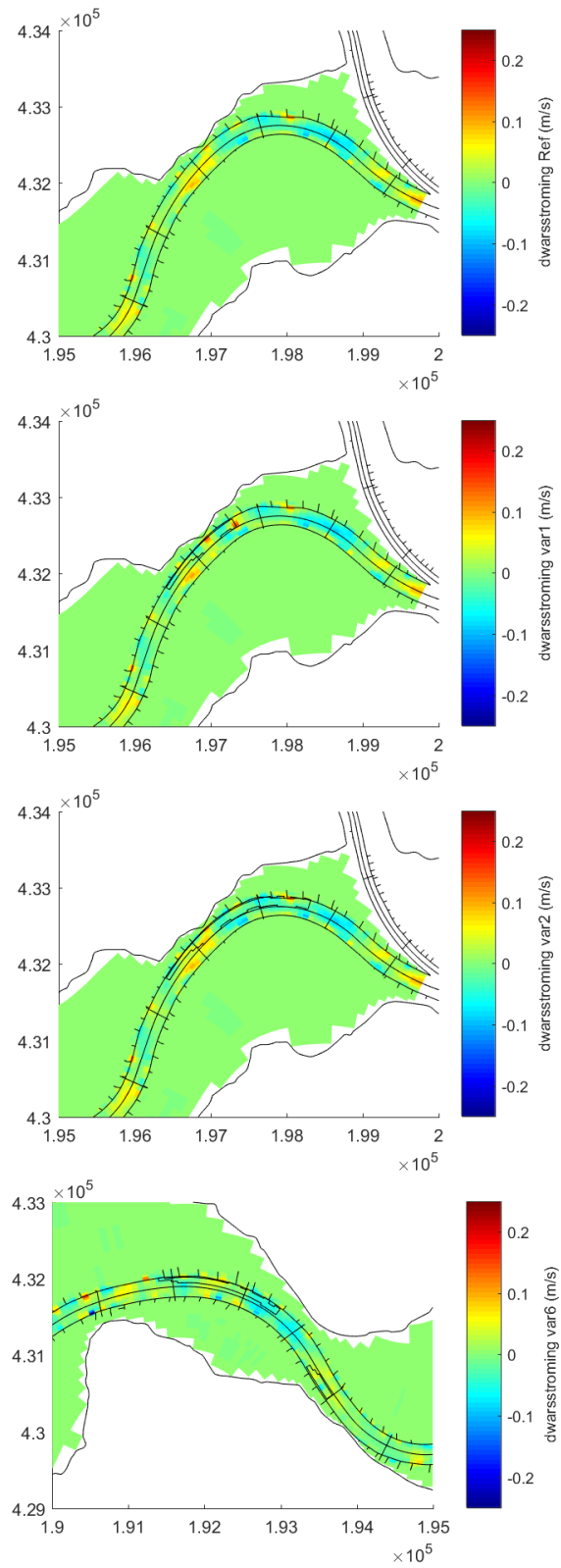
G.2 Absolute stroomsnelheid in dwarsrichting direct na aanleg

G.2.1 $Q_{\text{Lobith}} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



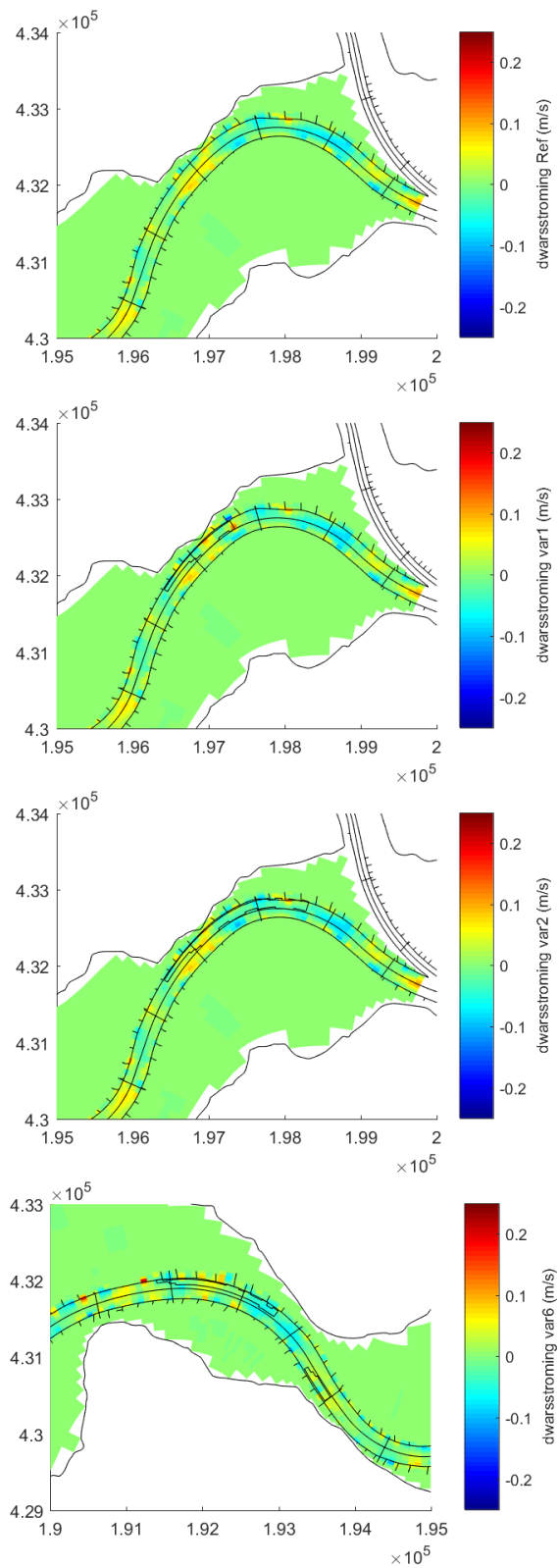
G.2.2

$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



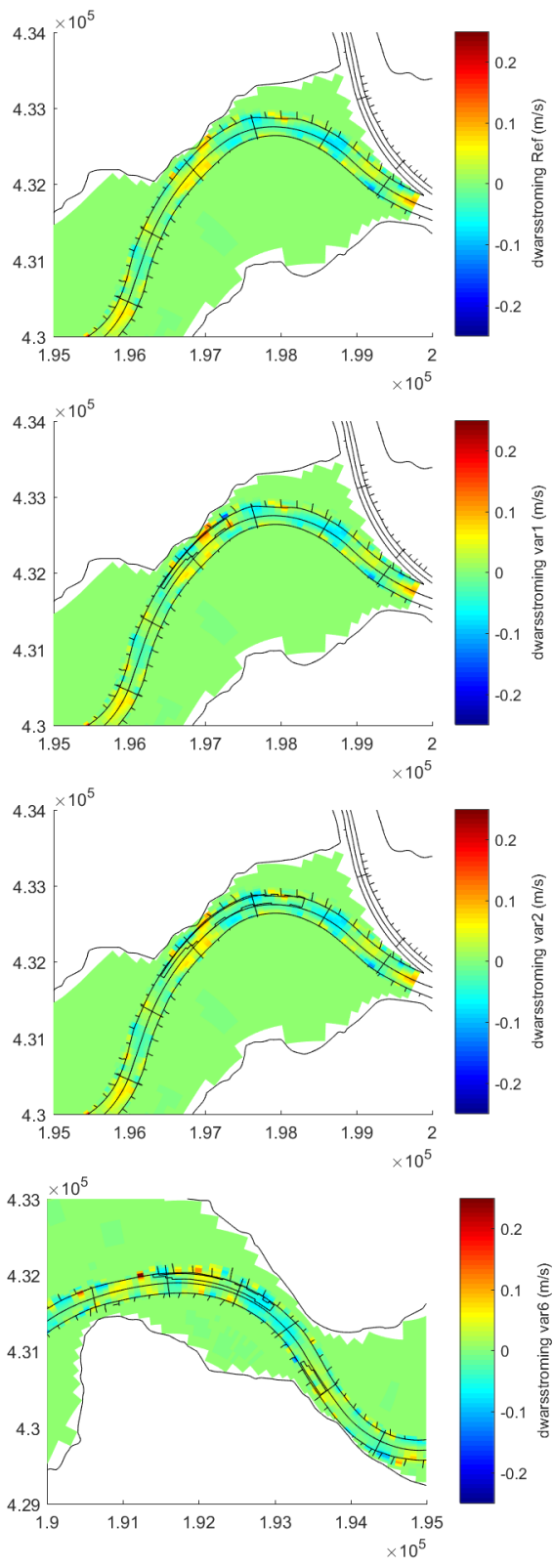
G.2.3

$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



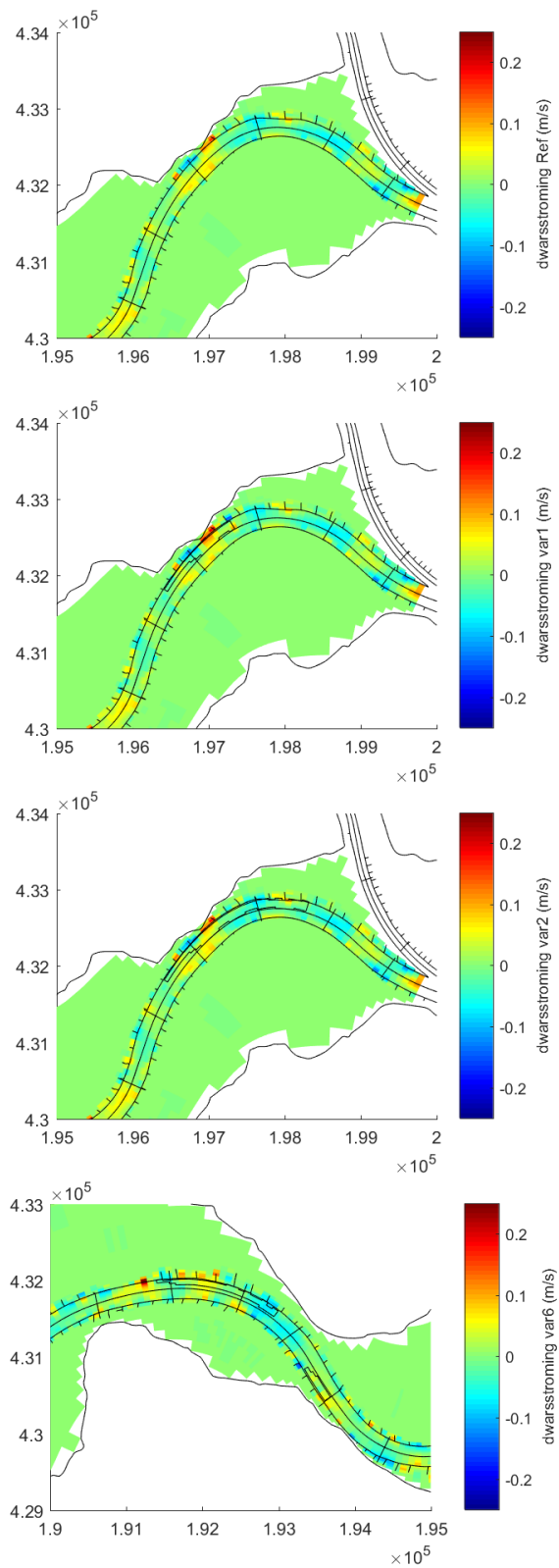
G.2.4

$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



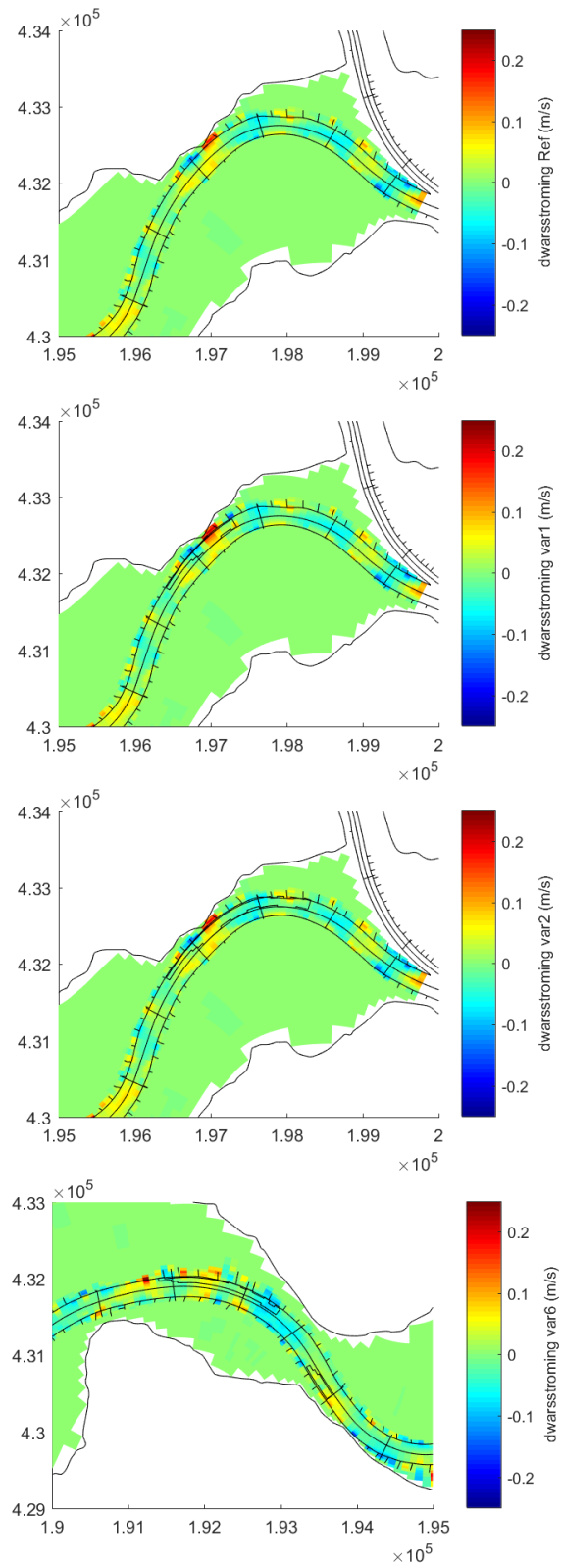
G.2.5

$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



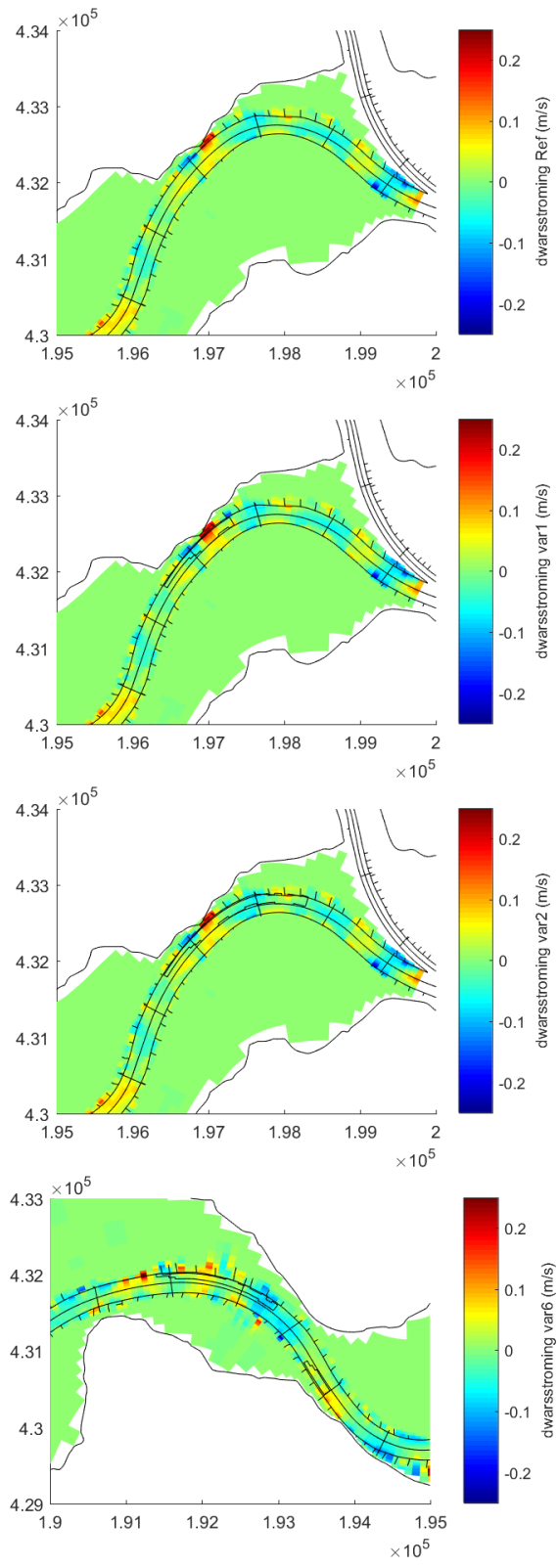
G.2.6

$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



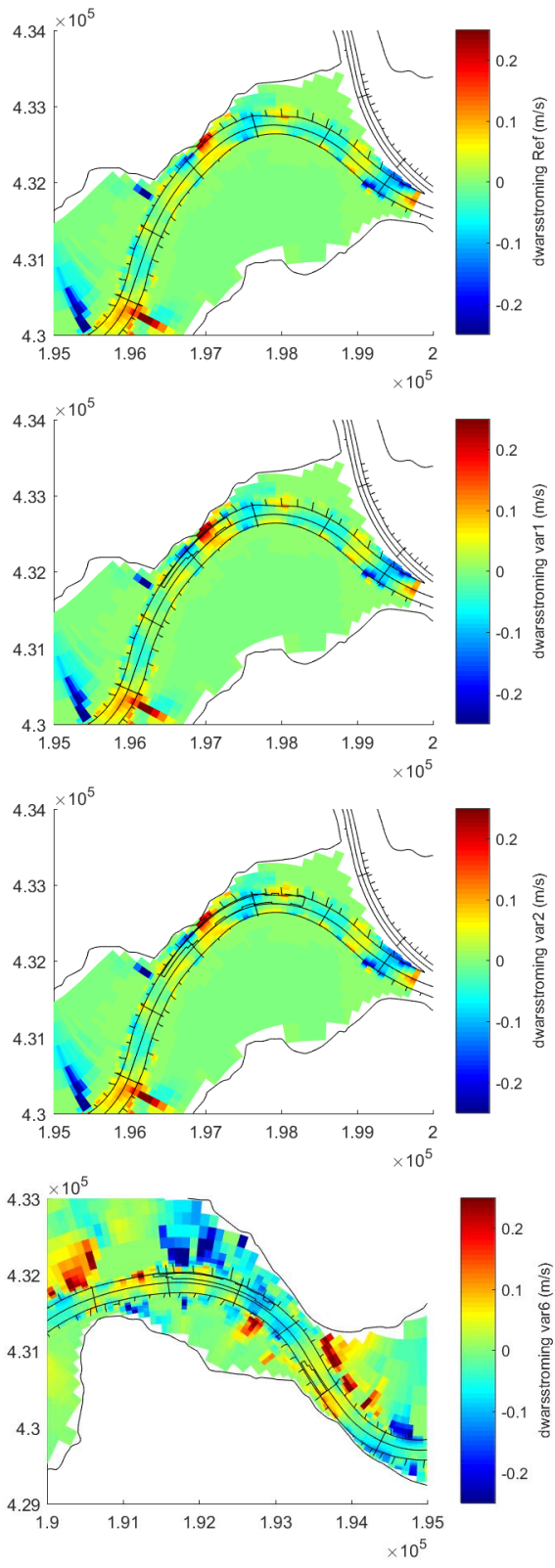
G.2.7

$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



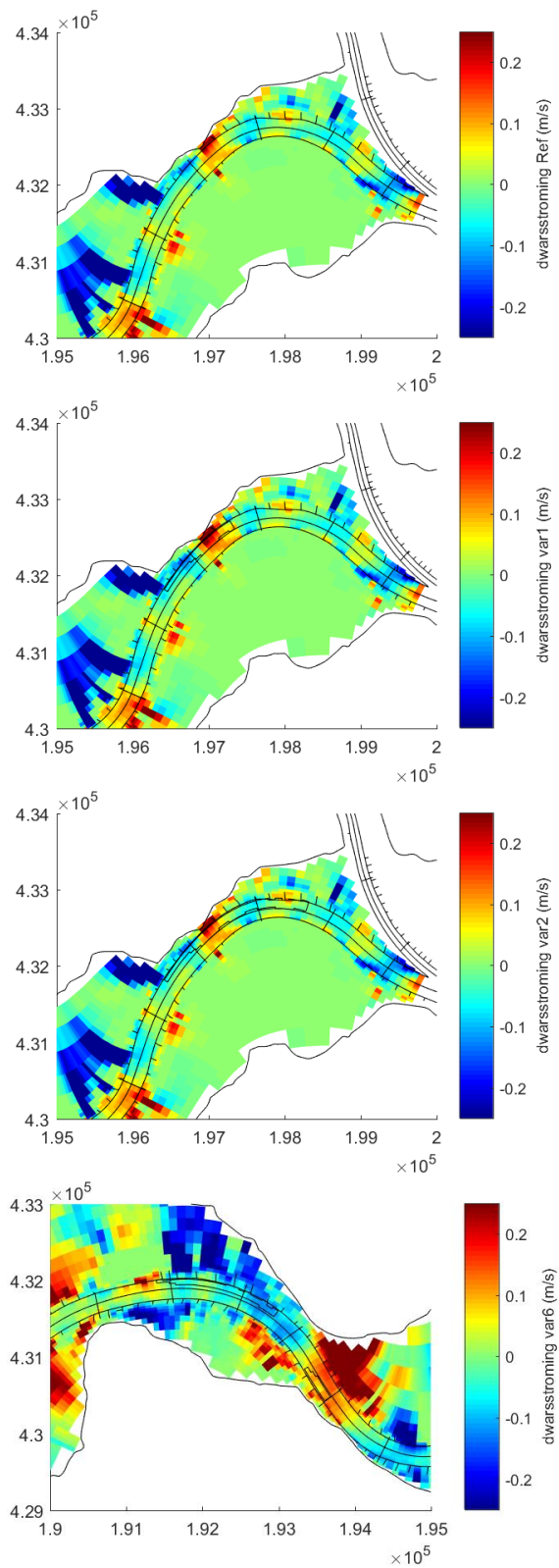
G.2.8

$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$



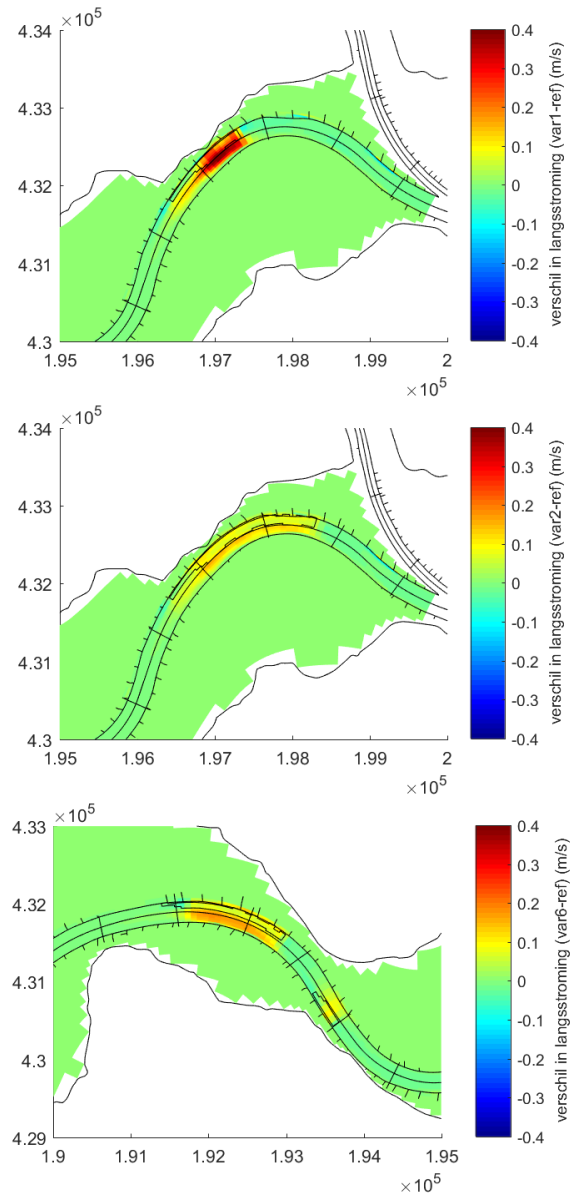
G.2.9

$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



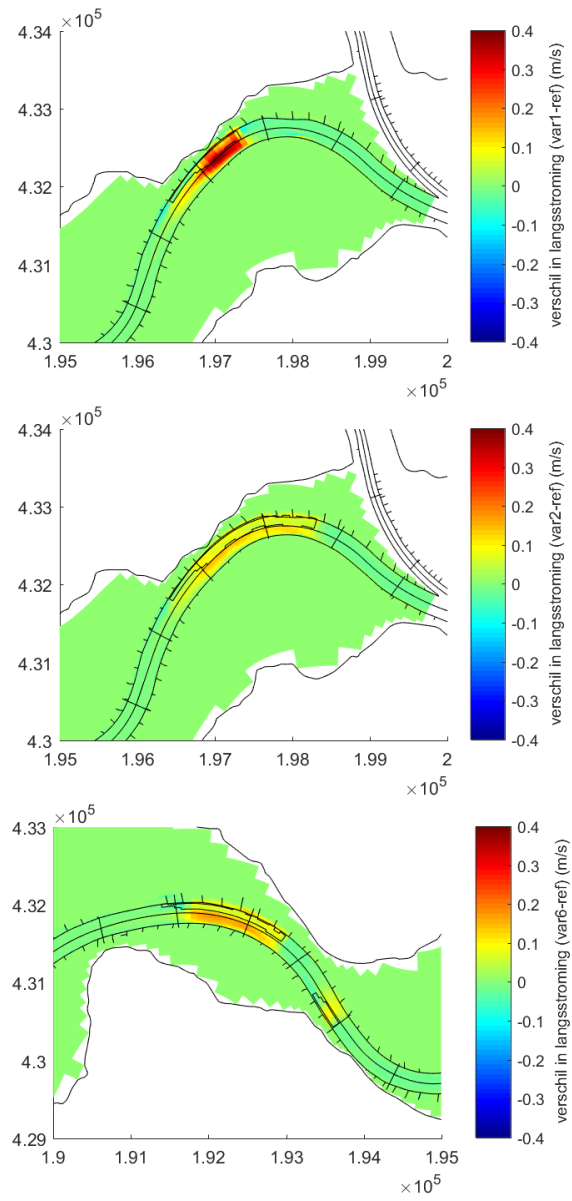
G.3 Verschil in stroomsnelheid in langsricting direct na aanleg

G.3.1 $Q_{Lobith} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



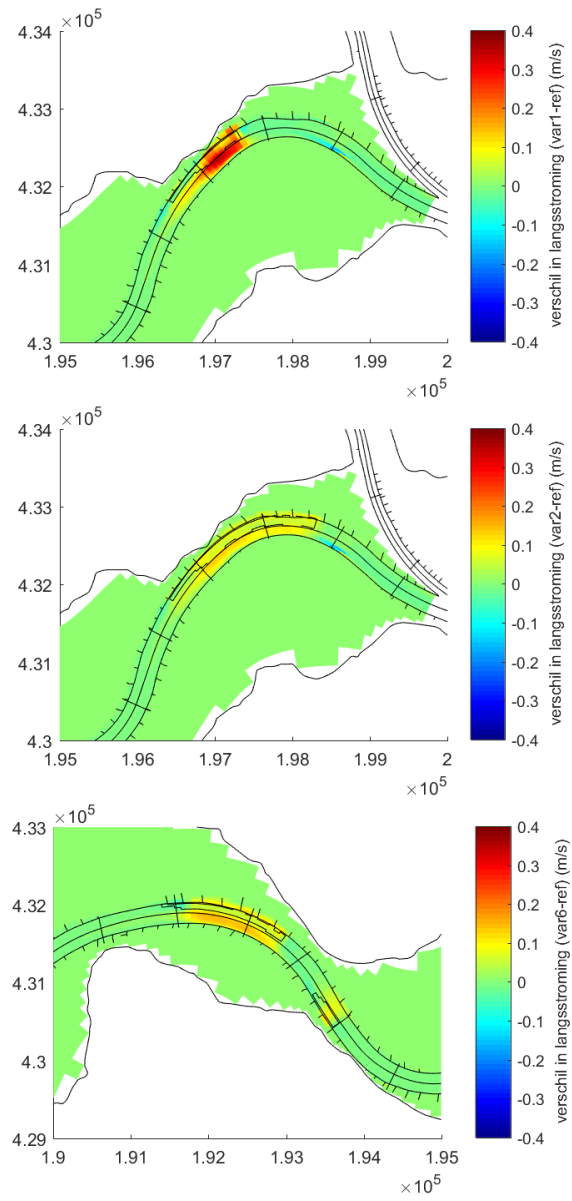
G.3.2

$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



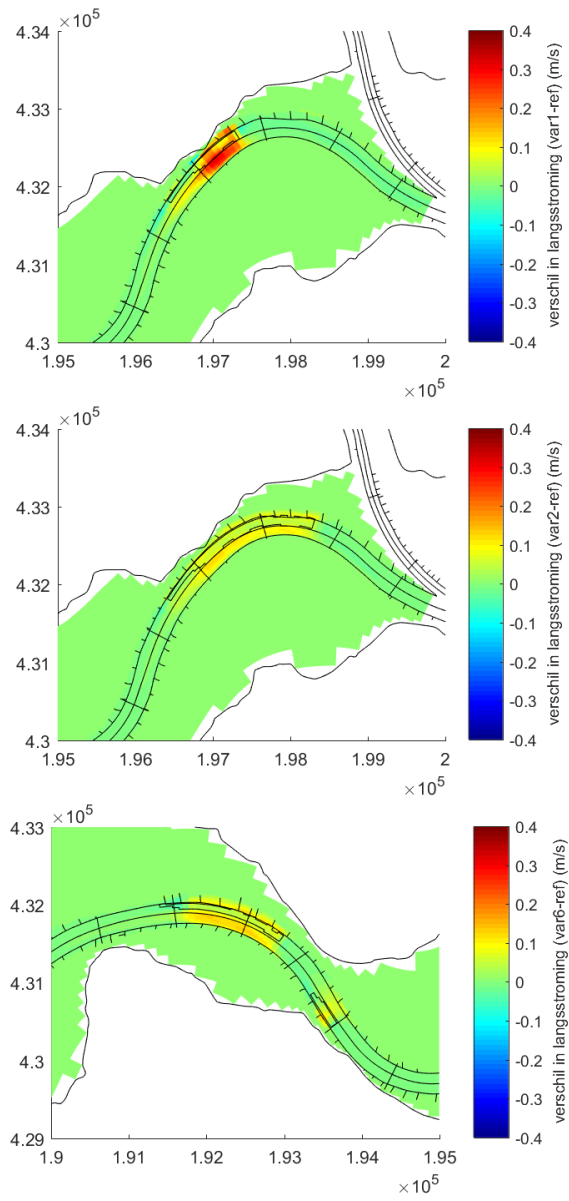
G.3.3

$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



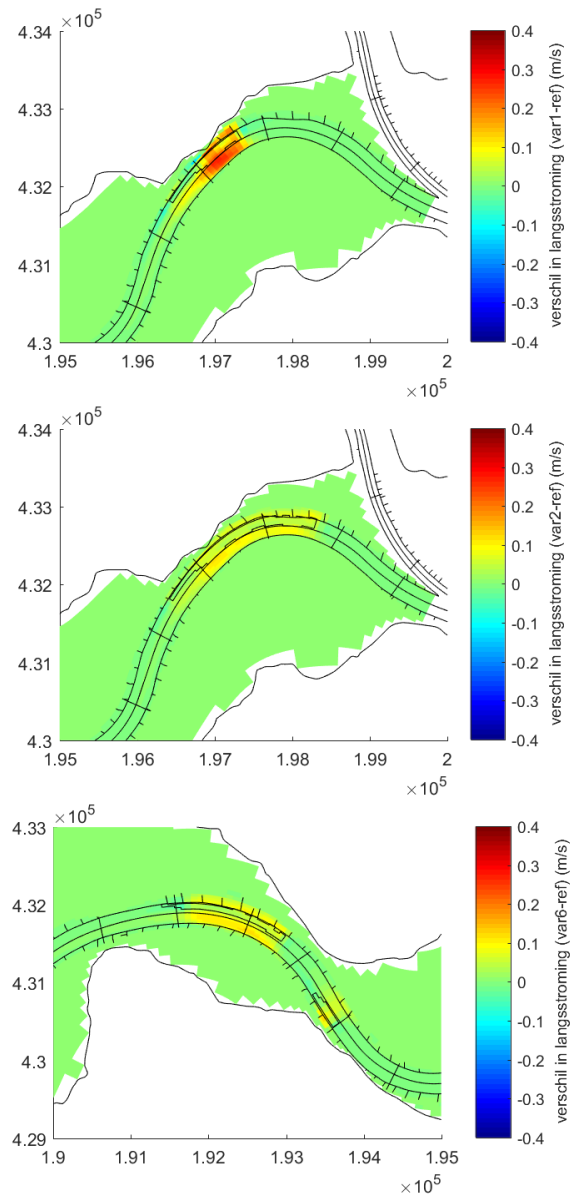
G.3.4

$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



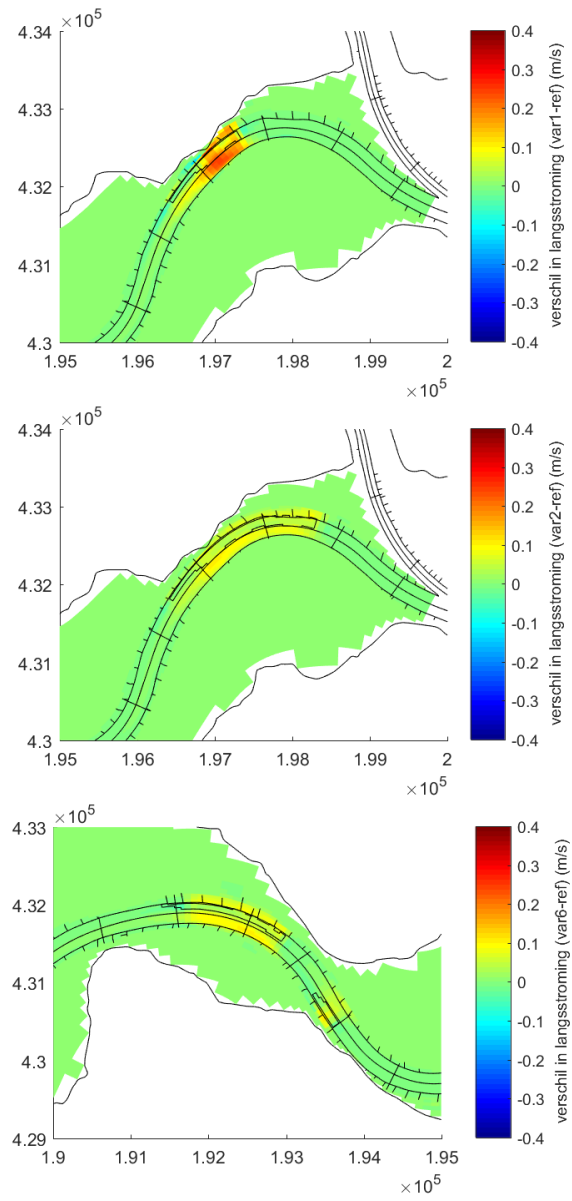
G.3.5

$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



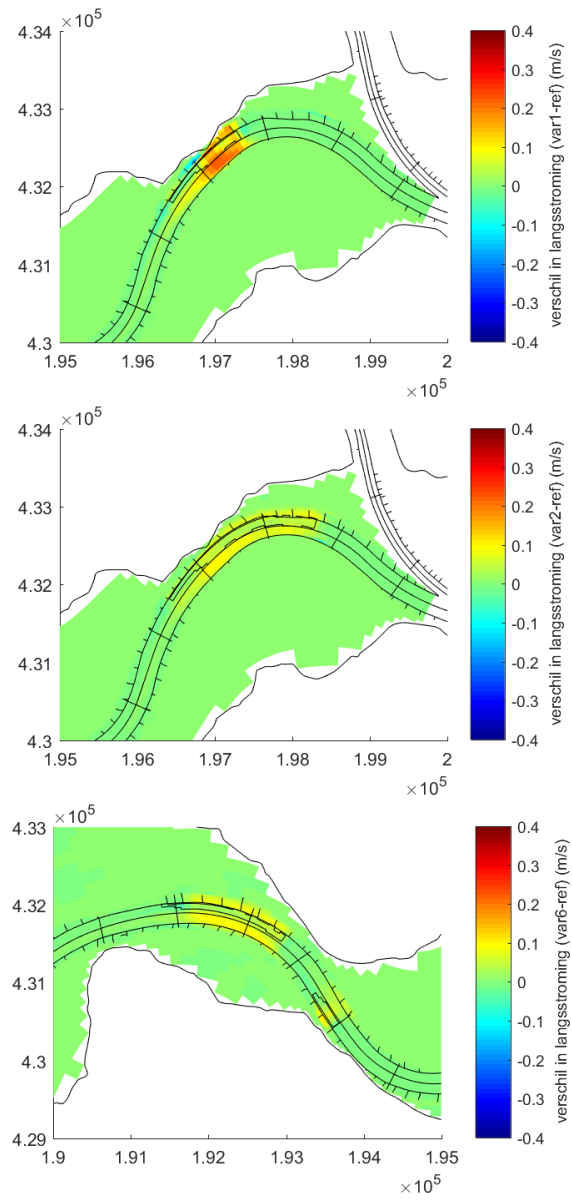
G.3.6

$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



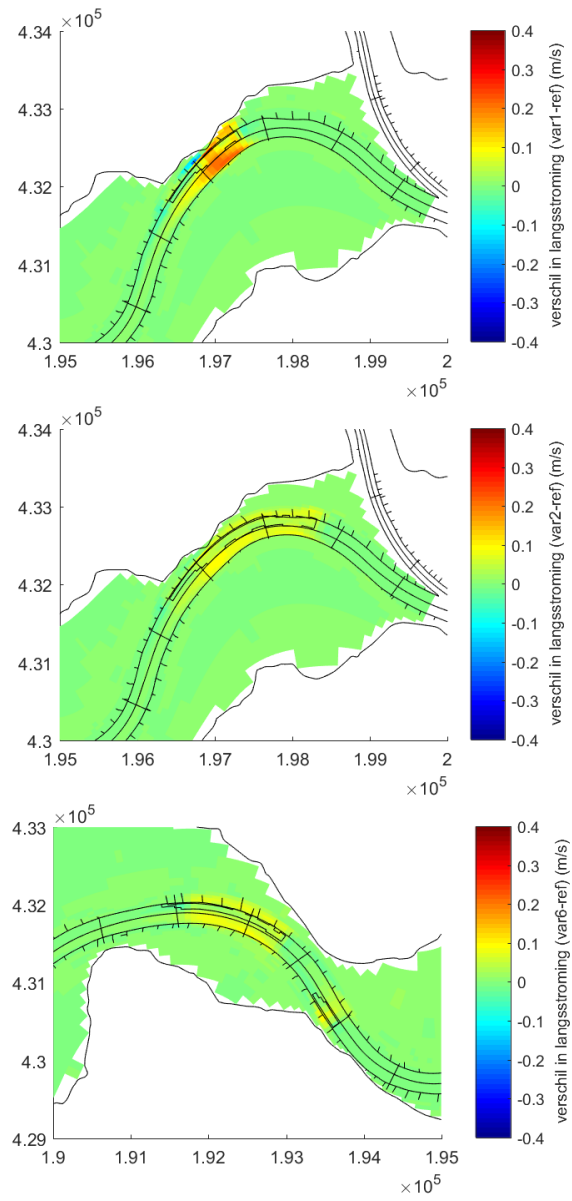
G.3.7

$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



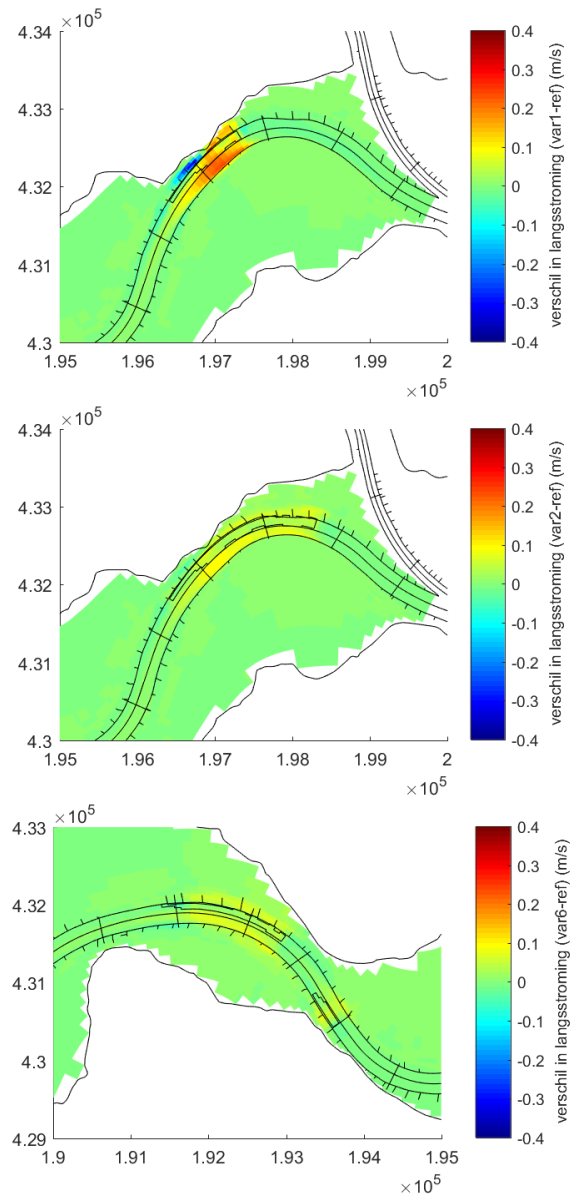
G.3.8

$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$



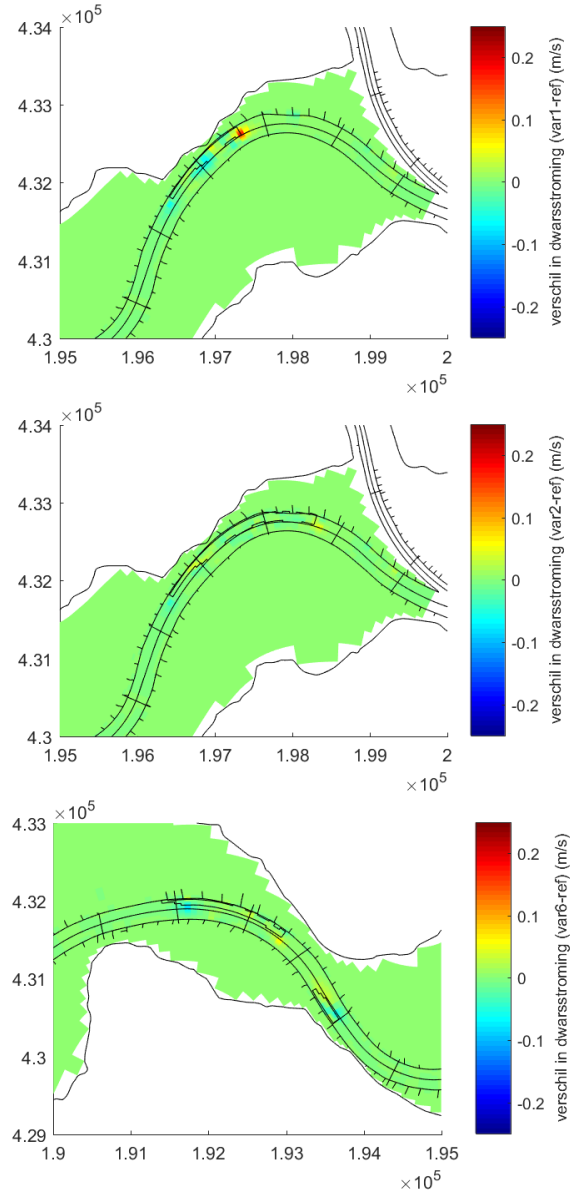
G.3.9

$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



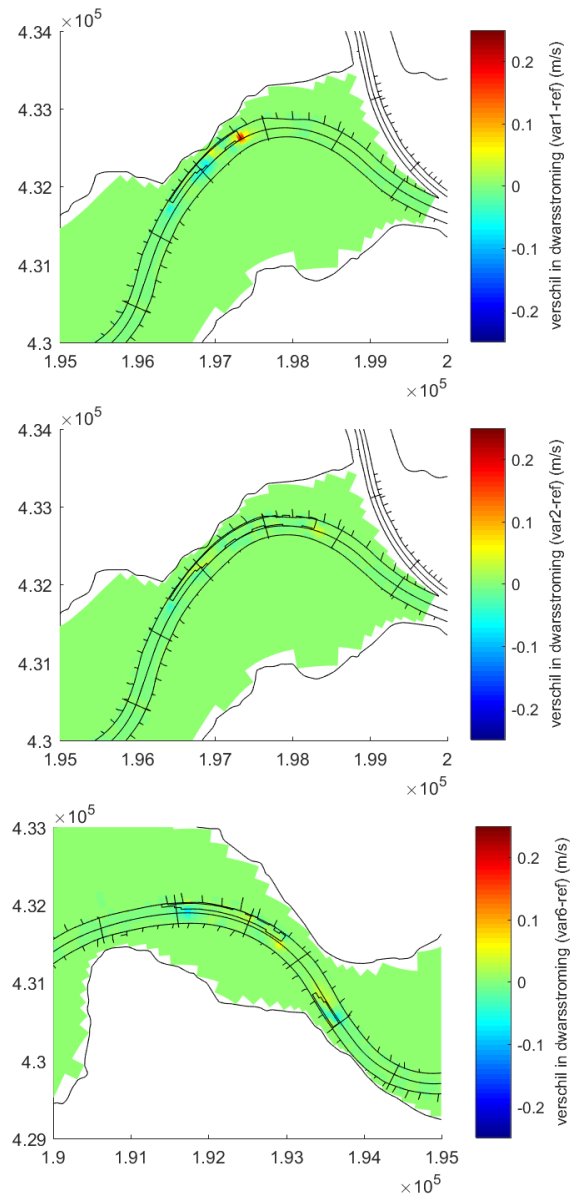
G.4 Verschil in stroomsnelheid in dwarsrichting direct na aanleg

G.4.1 $Q_{\text{Lobith}} = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$



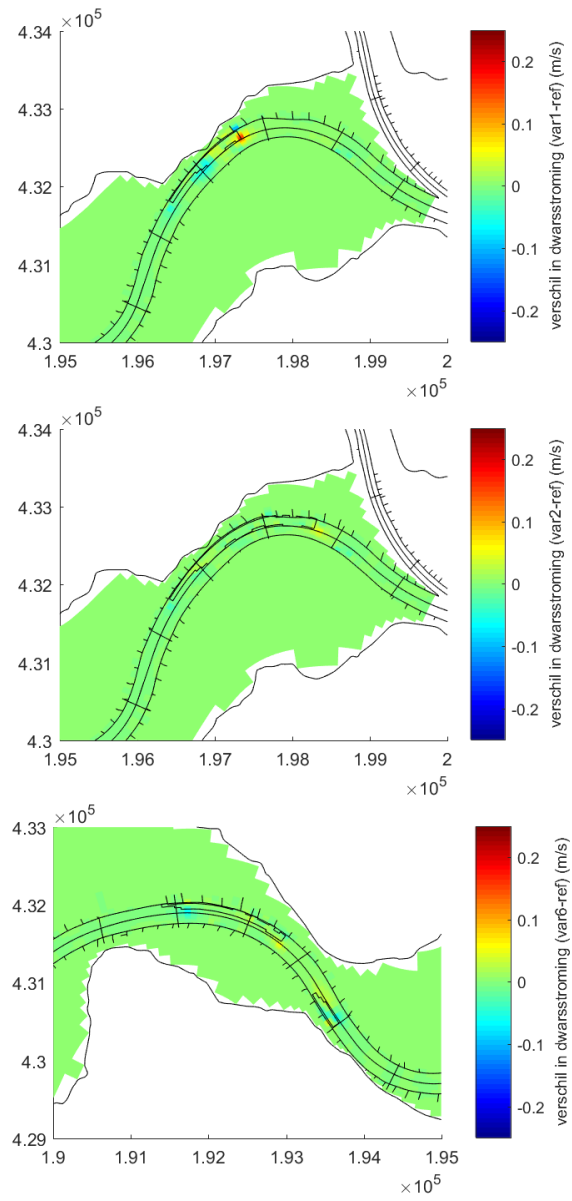
G.4.2

$Q_{Lobith} = 1.203 \text{ m}^3/\text{s}$



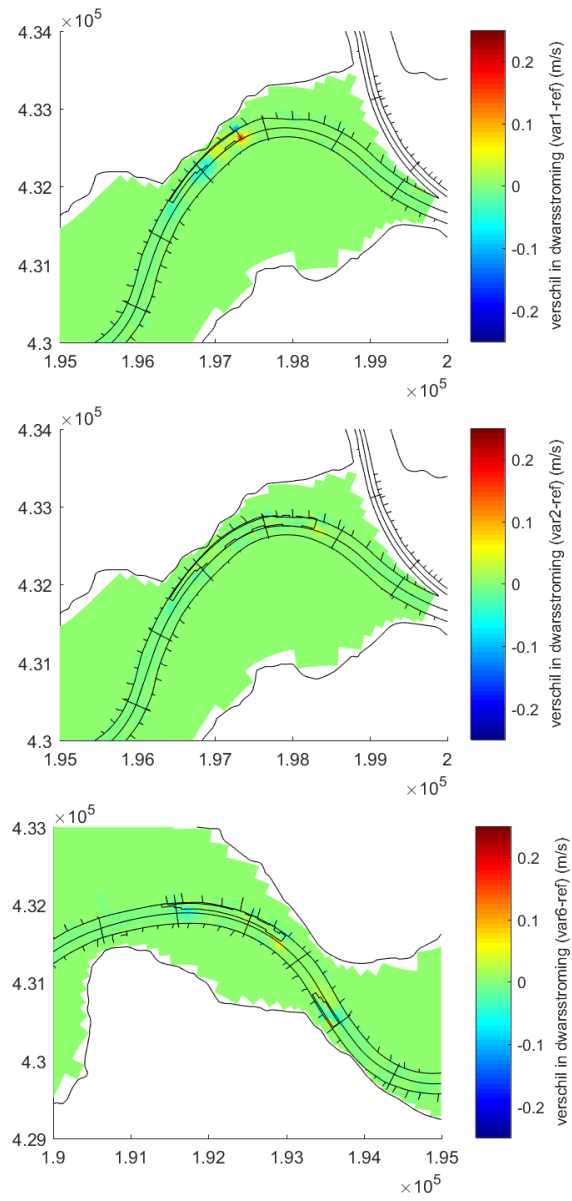
G.4.3

$Q_{Lobith} = 1.635 \text{ m}^3/\text{s}$



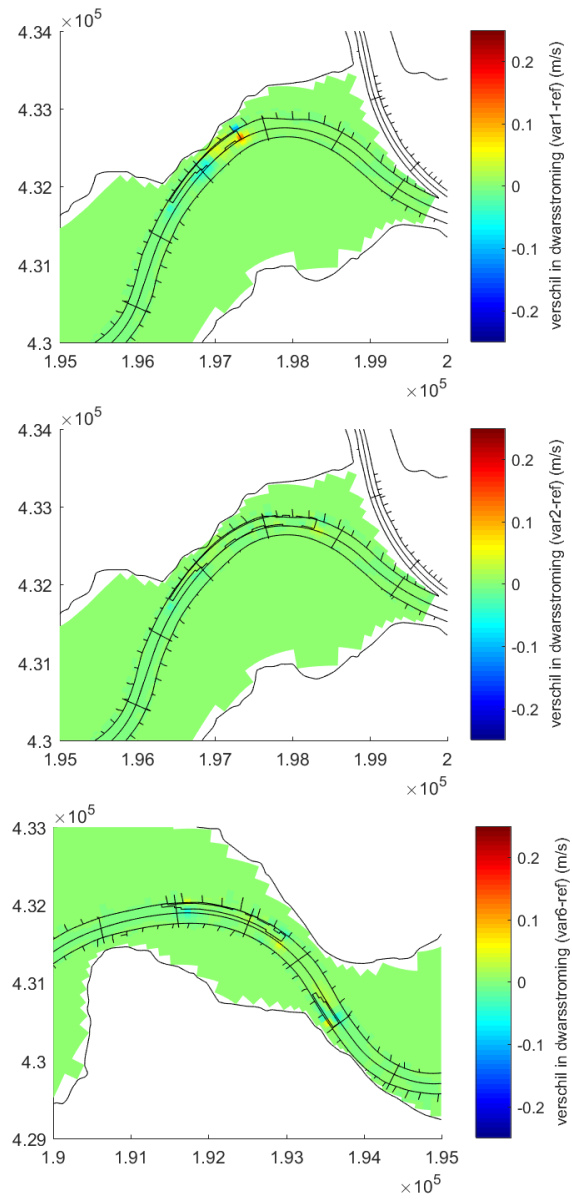
G.4.4

$Q_{Lobith} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$



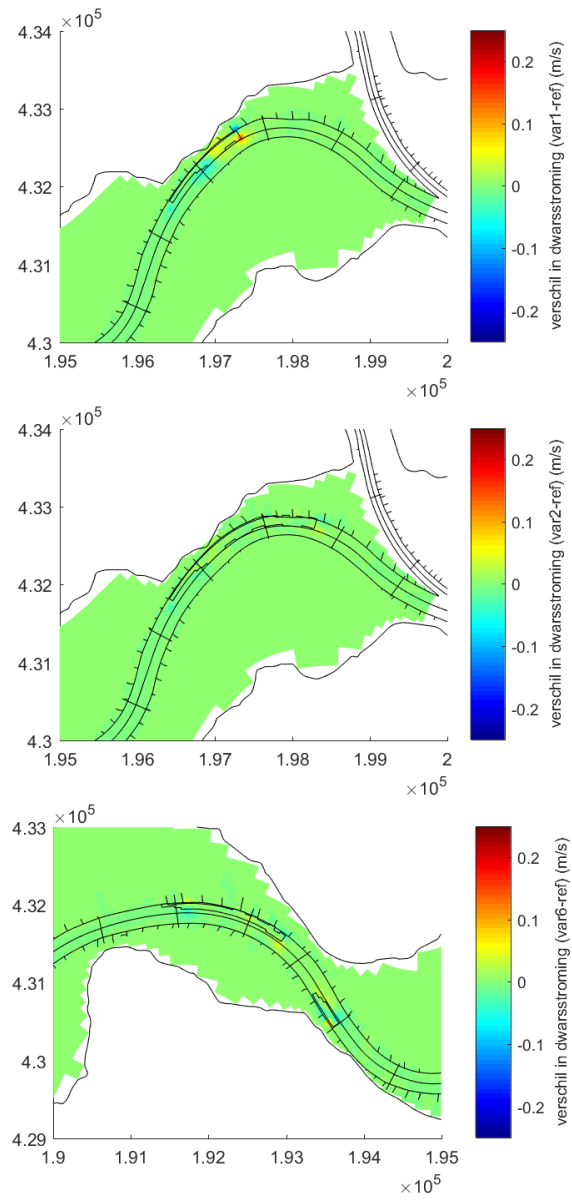
G.4.5

$Q_{Lobith} = 3.053 \text{ m}^3/\text{s}$



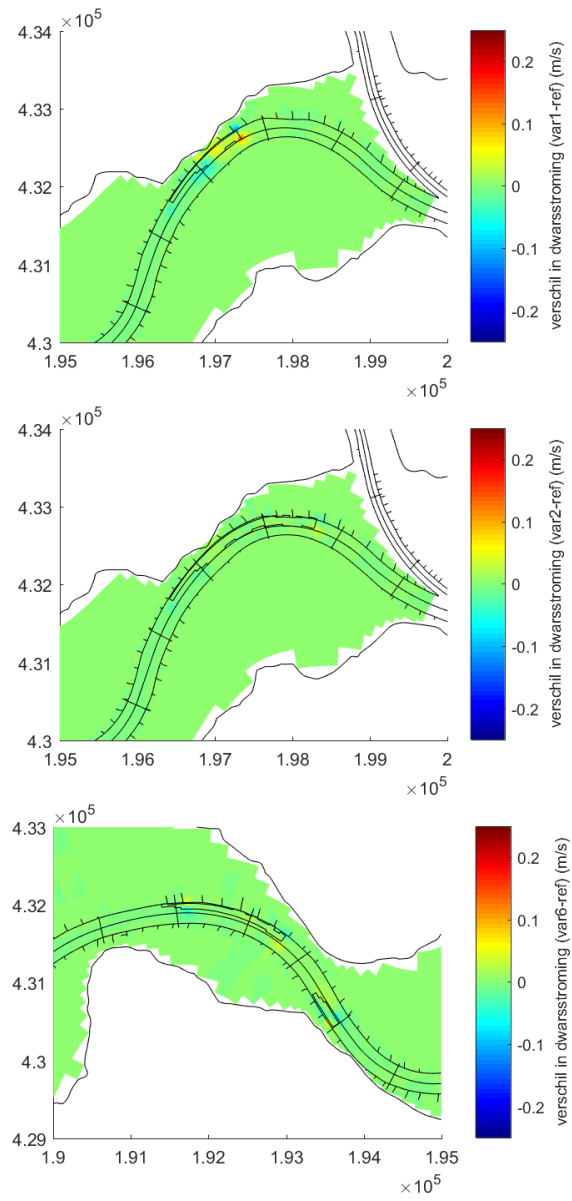
G.4.6

$Q_{Lobith} = 3.824 \text{ m}^3/\text{s}$



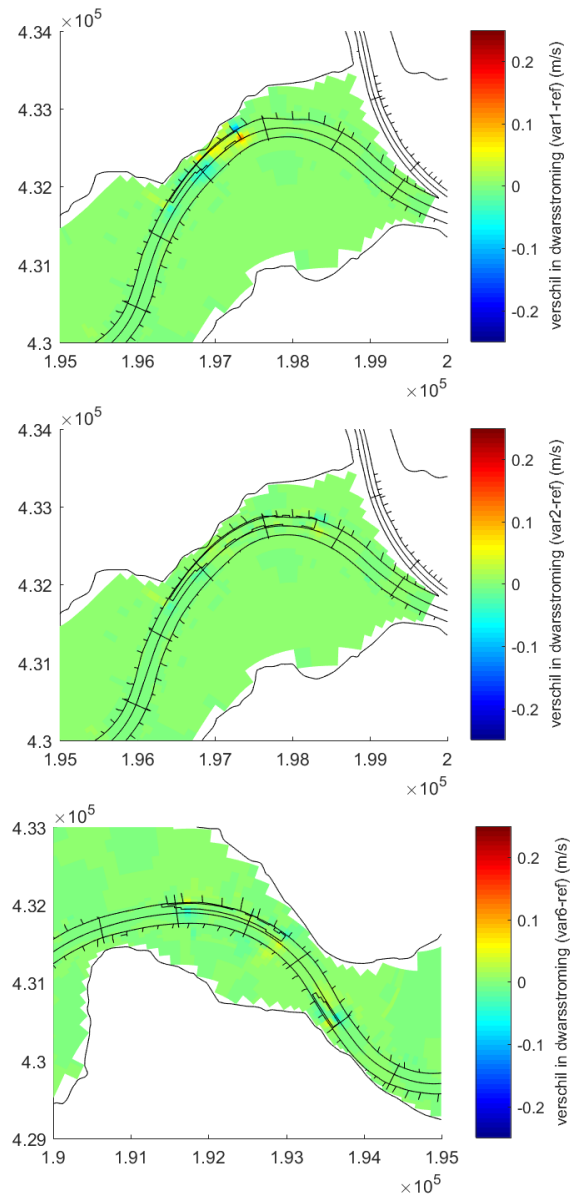
G.4.7

$Q_{Lobith} = 4.717 \text{ m}^3/\text{s}$



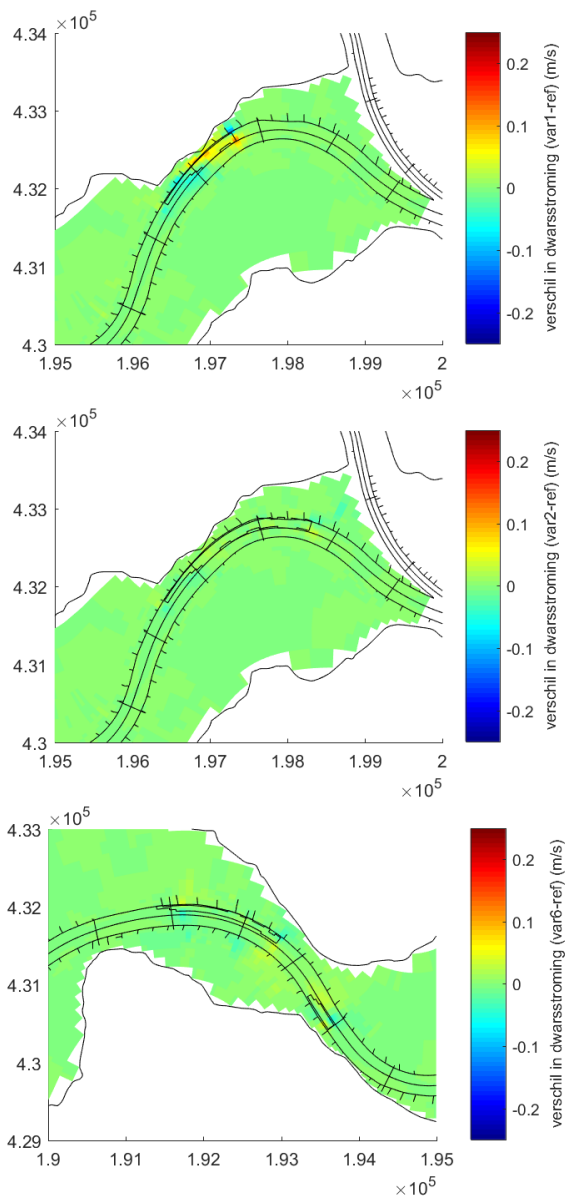
G.4.8

$Q_{Lobith} = 6.151 \text{ m}^3/\text{s}$



G.4.9

$Q_{Lobith} = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$



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

Deltares

www.deltares.nl