



# Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Optimalisatie

Deltares

25 februari 2021

Project	Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal		
Opdrachtgever	Deltares		
Document	Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal: Optimalisatie		
Status	gereviewd conceptrapport		
Datum	25 februari 2021		
Referentie	117743/20-006.749		
Projectcode	117743		
Projectleider	drs. Michel Zijderwijk		
Projectdirecteur	ir. Ruud Bouw		
Auteur(s)	Michel Zijderwijk (Witteveen+Bos), Jurjen de Jong (Deltares)		
Gecontroleerd door	Anke Becker (Deltares)		
Goedgekeurd door	Johan Boon (Deltares)		
Projectnummer	11204644		
Paraaf	Jurjen de Jong	Anke Becker	Johan Boon
Adres	Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.   Deventer Blaak 16 Postbus 2397 3000 CJ Rotterdam +31 (0)10 244 28 00 www.witteveenbos.com KvK 38020751		
Voorkant	Langsdam bij Dreumel (foto door Frank Collas)		

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

## INHOUDSOPGAVE

1	<b>INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1	Achtergrond	5
1.2	Doel	6
1.3	Leeswijzer	6
2	<b>AANPAK EN UITGANGSPUNTEN</b>	<b>7</b>
3	<b>LANGSDAM ONTWERP (2016) EN HYDRAULISCHE PRINCIEWERKING</b>	<b>9</b>
3.1	Omschrijving ontwerp	9
3.2	Principewerking langsdam	12
3.3	Indicatoren rivierkundige functies	17
4	<b>UITGEVOERDE OPTIMALISATIEVARIANTEN</b>	<b>18</b>
4.1	Beschouwde optimalisatievarianten	18
4.2	Resultaten	19
4.2.1	Langsdamlichaam - kruinhoogte	19
4.2.2	Langsdamlichaam - talud	22
4.2.3	Langsdamlichaam - materiaal	24
4.2.4	Instroomopeningen - dimensies	25
4.2.5	Instroomopeningen - ruimtelijk ontwerp (plattegrond)	26
4.2.6	Tussenopeningen	26
4.2.7	Oevergeul	29
5	<b>CONCLUSIES</b>	<b>35</b>
6	<b>REFERENTIES</b>	<b>37</b>
	Laatste pagina	37
	<b>Bijlage(n)</b>	<b>Aantal pagina's</b>
I	Verhanglijnen	

- II Waterstandsverschillen op de rivieras
- III Oevergeul afvoeren
- IV Stroomsnelheidsverschillen



# 1

## INLEIDING

### 1.1 Achtergrond

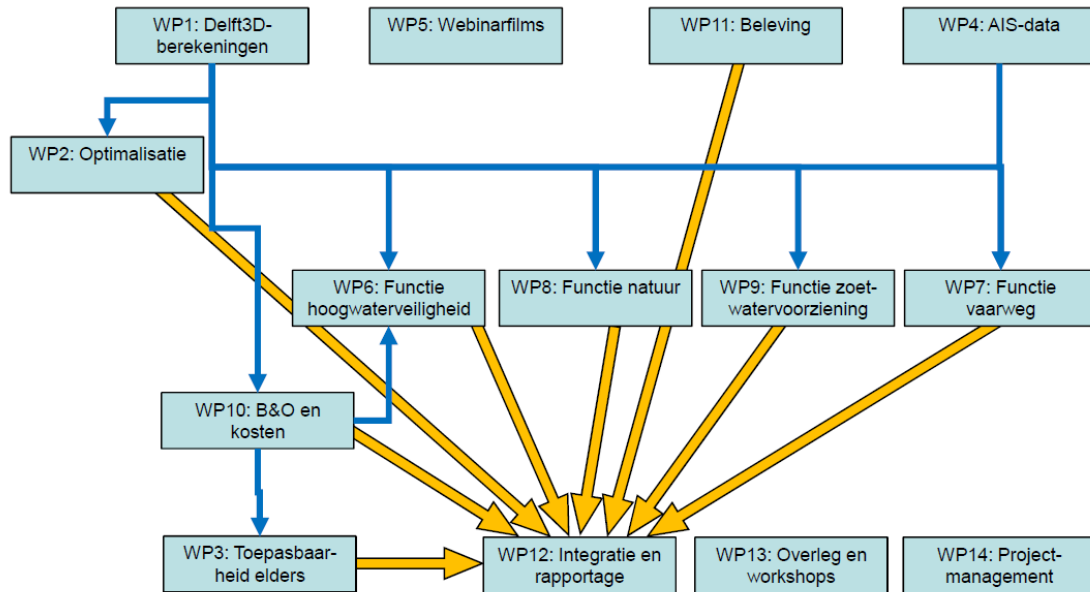
Het riviersysteem van de Rijn, met daarin alle Nederlandse Rijntakken, kent problemen met onder meer hoogwaterveiligheid, insnijding van de zomerbedbodem, daling van laagwaterstanden en grondwaterstanden, de kwaliteit van het rivierecosysteem, en het gebruik van de rivier als vaarweg. De laatste decennia wordt onderkend dat de sectorale aanpak niet efficiënt is. De beleidsdirecties van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat hebben de wens uitgesproken voor een meer innovatieve systeem- en gebiedsgerichte aanpak, met integrale aandacht voor alle probleemvelden tegelijk. Deze integrale aanpak beoogt de som van alle problemen te reduceren in plaats van slechts de problemen van een beperkt aantal sectoren.

Voor deze integrale aanpak heeft Rijkswaterstaat Oost-Nederland een idee gelanceerd onder de werknaam WaalSamen. Dit is een plan voor herinrichting van het zomerbed in de gehele Waal. De herinrichting wijzigt het principe van het bestaande normalisatiesysteem door het zomerbed te verdelen in twee parallelle stroomgeulen, gescheiden door een langsdam. Om de eigenschappen van deze systeemwijziging in de praktijk te beproeven is over een lengte van tien kilometer de pilot Langsdammen uitgevoerd. Het doel daarvan is een proof of concept, om meer zekerheid te verkrijgen over de integrale werking en de potenties van een dergelijke systeemwijziging.

Voor de pilot werd het Waaltraject Wamel-Ophemert (km 911.5-921.5) bij Tiel gekozen. Om redenen van efficiëntie werd de pilot tegelijk uitgevoerd met Fase III van het project Kribverlaging Waal van het programma Ruimte voor de Rivier. Hiervoor leverde Rijkswaterstaat Oost-Nederland op 30 juni 2011 de producten van een SNIP-3-besluit op aan de Programmadirectie Ruimte voor de Rivier van Rijkswaterstaat, inclusief een omwisselbesluit om geplande kribverlaging te vervangen door langsdammen. De Staatssecretaris van Verkeer en Waterstaat bekrachtigde dit eind 2011. De langsdammen tussen Wamel en Ophemert werden vervolgens in de periode van augustus 2014 tot maart 2016 gerealiseerd.

Voor, tijdens en na de aanleg van de langsdammen is een uitgebreid monitorings- en onderzoeksprogramma uitgevoerd door de partners van de samenwerkingsovereenkomst 'WaalSamen'. Dit programma is afgesloten met een integrale eindevaluatie, onderverdeeld in 12 inhoudelijke deelprojecten die worden aangeduid met "WP" (werkpakket). Voor u ligt het deelrapport van WP2 over het onderdeel van de evaluatie van het tweegeulensysteem met langsdammen dat gericht is op optimalisatie van het langsdamontwerp. De deelrapporten vormen de ondergrond van het hoofdrapport, maar de inzichten en conclusies zijn bij het opstellen van dat hoofdrapport integraler beschouwd, verder geëvolueerd en verduidelijkt. Dat geldt in het bijzonder voor dit deelrapport. De verkenning in dit rapport is grotendeels uitgevoerd toen de meeste inzichten uit de monitoring nog niet beschikbaar waren. Omdat die de kern vormen van de pilot is deze verkenning zonder die context niet volledig van toepassing voor directe evaluatie van de pilot. Het rapport heeft om die reden het afrondende onderlinge reviewproces van Deltares en Rijkswaterstaat niet meer doorlopen en de bevindingen zijn uiteindelijk niet uitgebreid samengevat in het hoofdrapport. Waar dat mogelijk tot verschillen heeft geleid, zijn de conclusies van het hoofdrapport leidend.

Afbeelding 1.1 Relatie tussen de verschillende werkpakketten binnen het project Evaluatie pilot langsdammen



## 1.2 Doel

Het doel van het project is het inzichtelijk maken wat de *trade-offs* voor hoogwaterveiligheid, vaarweg en natuur zijn bij verschillende afmetingen van oevergeul en langsdammen en verschillende instellingen van de instroom- en tussenopeningen. Hieruit volgt een advies voor optimalisatie van bestaande en toekomstige langsdammen. Dit advies bestaat onder meer uit criteria en vuistregels voor het instellen van instroomopeningen.

De werkzaamheden beogen tevens antwoord te geven op de volgende vragen:

- Wat is het nut en de noodzaak van de tussenopeningen?
- Zijn de huidige langsdammen overgedimensioneerd? Kunnen ze lager?
- Is een ander ontwerp van de langsdammen mogelijk?

Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek naar optimalisatie van het langsdamontwerp.

## 1.3 Leeswijzer

Het rapport bestaat uit de volgende hoofdstukken:

- hoofdstuk 2: aanpak en uitgangspunten;
- hoofdstuk 3: langsdamontwerp en principewerking;
- hoofdstuk 4: optimalisaties en synthese;
- hoofdstuk 5: conclusies en aanbevelingen;
- hoofdstuk 6: referenties.

# 2

## AANPAK EN UITGANGSPUNTEN

De uitvoering van een optimalisatie betekent dat van ieder aspect van het ontwerp van een langsdam wordt bepaald hoe deze effect heeft op de rivierkundige functies. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de Delft3D-simulaties die binnen WP1 ("Delft3D-berekeningen") zijn uitgevoerd. In nauw overleg met WP1 zijn de optimalisaties van de langsdam vertaald naar een Delft3D-schematisatie waarna hydrodynamische simulaties zijn uitgevoerd met een constante Waalafvoer in het bereik 800-18.000 m<sup>3</sup>/s (Boven-Rijn afvoer). Er zijn in het kader van de optimalisaties geen morfologische sommen met Delft3D uitgevoerd. Voor de achtergrond en de opzet van de Delft3D-berekeningen wordt verwezen naar het rapport van WP1 (Paarlberg & Omer, 2020).

Door middel van post-processing van Delft3D-uitvoerbestanden zijn waterstanden, stroomsnelheden en afvoeren in 2D-velden en op uitvoerlocaties bepaald van de referentie (met langsdam) en optimalisaties. Uit deze resultaten zijn vervolgens de verschillen bepaald tussen de optimalisaties en de referentie. Deze informatie dient gereduceerd te worden tot één of enkele indicatoren per rivierfunctie om een afweging tussen de functies te kunnen maken. Voor de keuze van deze indicatoren wordt gewerkt van grof naar fijn, waarbij eerst de 2D kaarten en langsdorsneden van de rivier beoordeeld worden, en vervolgens de informatie wordt samengevat tot deze indicator die representatief is voor de functie.

Door het combineren van het effect van de verschillende ontwerpvarianten op de indicatoren, kan gezocht worden naar een optimaal ontwerp waarbij de winst voor alle functies zo maximaal is. Voor het bepalen van een optimum is het nodig om een weegfactor aan iedere functie te hangen (overeenkomstig de geschetste methode van Arjan Sieben in Bijlage A van Buijse et al., 2019). Deze weging heeft in deze fase van het onderzoek niet plaatsgevonden maar zou in een vervolg kunnen plaatsvinden.

Als referentie voor de optimalisaties geldt de situatie direct na aanleg van de langsdammen in 2018 (baseline j18\_5-v1). Deze referentie is nader beschreven in hoofdstuk 3. De varianten die onderzocht zijn ten behoeve van de optimalisatie worden behandeld in Hoofdstuk 4.

De gebruikte modellen bevinden zich internationaal in de voorhoede en worden algemeen gebruikt bij het bepalen van effecten van ingrepen in de Nederlandse rivieren. Toch ontbreken belangrijke processen, waardoor rekenresultaten zorgvuldige interpretatie vergen voordat er conclusies aan verbonden kunnen worden. Vaak betekent dit dat absolute getallen geen voorspellende waarde hebben, maar wel de getallen van verschillen tussen de situatie met en zonder ingreep.

### **Afbakening in geografische zin, processen, functies en indicatoren.**

In de optimalisatie worden de volgende zaken niet meegenomen:

- morfologie, voor nu alleen hydrodynamisch. Wel op basis van stroomsnelheidsverschillen kwalitatieve schatting van effect op de rivierbodem.
- scheepsgeïnduceerde stroming en golven;
- effecten op de uiterwaarden en primaire waterkering. Voor nu focus op alleen hoofdgeul en de oeverageul
- recreatievaart in de oeverageul.
- beheer en onderhoud is onderdeel van WP10 en wordt hier verder niet beschouwd.

- het effect van langsdammen op de functie Waterbeschikbaarheid is gerapporteerd in WP9. Hierin is geconcludeerd dat het effect op de zoetwatervoorziening van de langsdammen bij Wamel, Dreumel en Ophemert zoals deze nu aangelegd zijn zeer beperkt is. Gekozen is om daarom om de effecten van de optimalisaties voor deze functie niet te beschouwen.
- alleen de kort termijn (initiële) effecten zijn gepresenteerd. In Bijlage A van het plan van aanpak van het onderhavige langsdammen onderzoek (Buijse et al, 2019) is door Arjan Sieben een conceptueel model gepresenteerd waarmee lange termijn effecten op het bodemverhang, waterdiepte bij laagwater en waterstand bij extreem hoogwater kunnen worden bepaald. Echter dit conceptuele model is niet bruikbaar omdat het niet lukt om de weegfactoren van vergelijking 13 in bijlage A te kwantificeren.

# 3

## LANGSDAM ONTWERP (2016) EN HYDRAULISCHE PRINCIPEWERKING

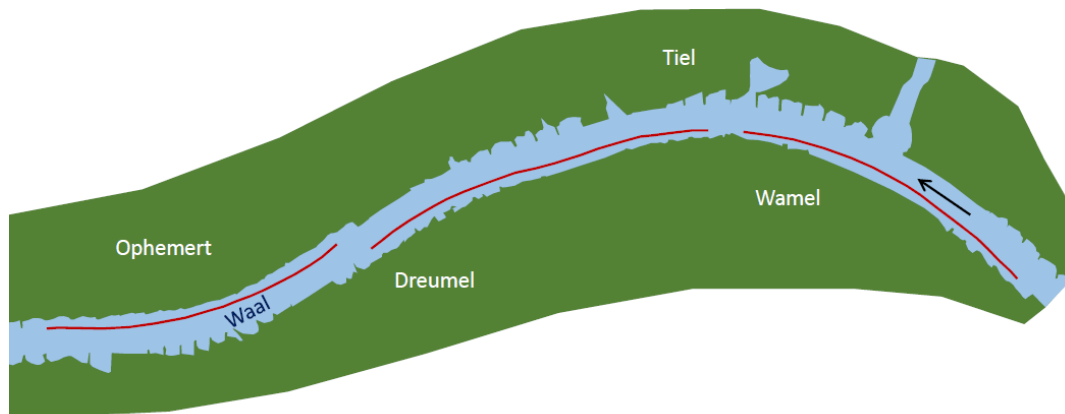
### 3.1 Omschrijving ontwerp

Uit het Monitoringsplan Pilot Langsdammen (2011) is onverkort de volgende beschrijving van de langsdammen overgenomen. De pilot langsdammen Waal is onderdeel van het zomerbed met de kribvakken in de rivier de Waal tussen rkm 911 en rkm 922. Er zijn twee Langsdammen aangelegd in de binnenbochten op dit traject (Afbeelding 3.1), te weten:

- 1 Langsdam Wamel - Dreumel: ligt aan de Linker Oever (LO) tussen ca. rkm 911.50 en rkm 918.75;
- 2 Langsdam Ophemert: ligt aan de Rechter Oever (RO) tussen ca. rkm 918.25 en rkm 922.00.

De dammen liggen 30 meter binnen de huidige normaallijn aan de vaargeulzijde. Globaal is dat de lijn die de uiteinden van de vroegere kribuiteinden met elkaar verbindt. De kribben tussen de dam en de oeverlijn zijn verwijderd, waardoor er een meestromende oevergeul is ontstaan tussen de langsdam en de oever. (Tussen) Openingen in de langsdammen zorgen voor een gecontroleerde stroom van water en sediment door de hoofdgeul en de oevergeul (Afbeelding 3.2).

Afbeelding 3.1 Ligging van de langsdammen in de Waal



Afbeelding 3.2 Langsdam bij Wamel, met vaarweg, oevergeul, (de in 2018 verhoogde) inlaatdrempel en tussenopening

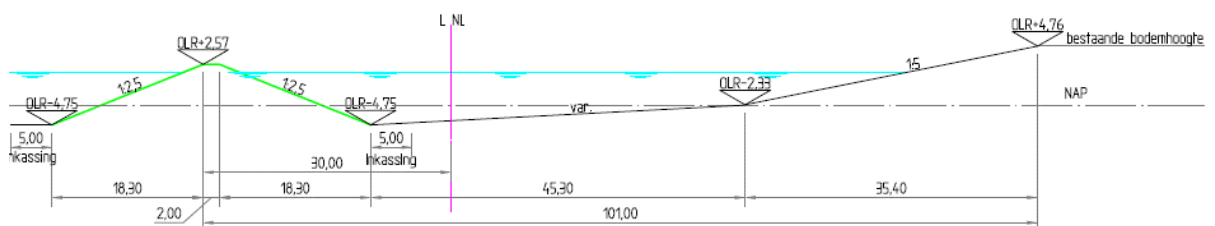


Afbeelding 3.3 geeft een typische dwarsdoorsnede weer van de langsdam en oevergeul. Afbeelding 3.4 toont een typische dwarsdoorsneden van een tussenopening. De hoogtes en dimensies van de verschillende onderdelen van de langsdammen zijn samengevat in Tabel 3.1.

Afbeelding 3.5 toont de kruinhoogte van de langsdammen en de waterstandslijnen bij enkele kenmerkende Boven-Rijn afvoeren (Paarlbeg & Omer, 2020). De verschillende langsdam onderdelen stromen over bij een Boven-Rijn afvoer van:

- langsdamlichaam: ca. 3.000 m<sup>3</sup>/s;
- Instroomopening. ca. 400 m<sup>3</sup>/s;
- Tussenopeningen: ca. 1.800 m<sup>3</sup>/s;
- Oevergeul: ca. 400 m<sup>3</sup>/s.

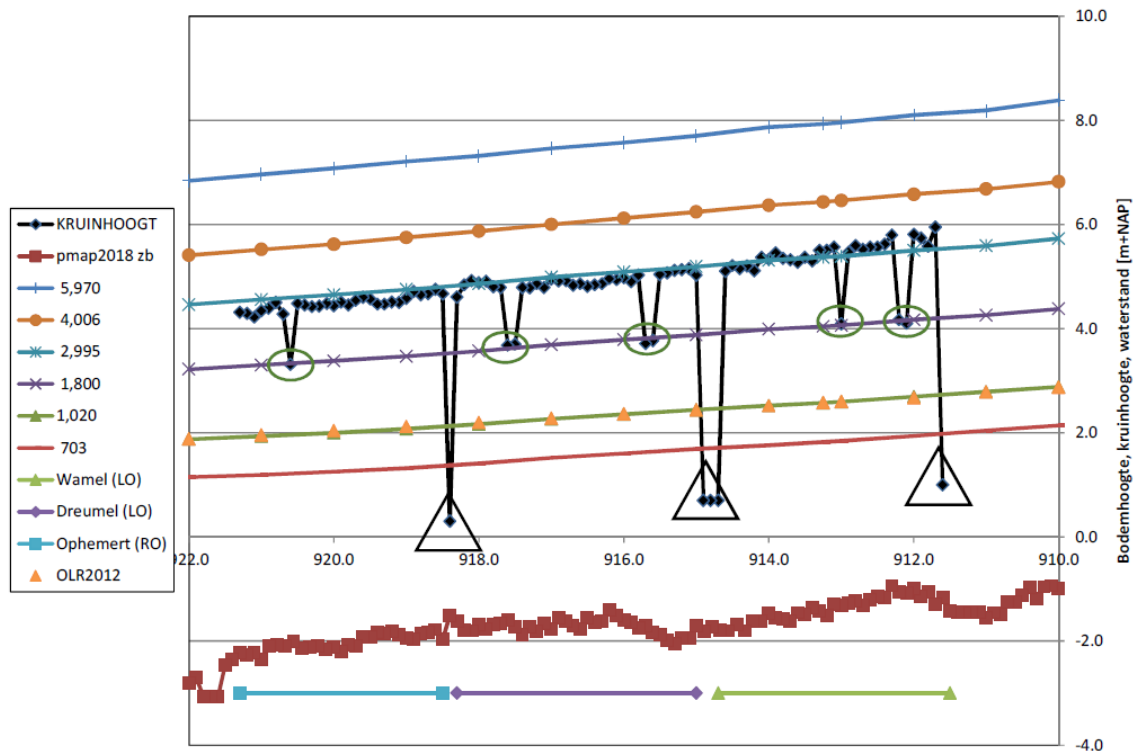
Afbeelding 3.3 Dwarsprofiel langsdam en oevergeul



Dwarsprofiel F-F



Afbeelding 3.5 Waterstanden bij kenmerkende Boven-Rijn afvoeren en kruinhoogte van de langsdammen (Paarlberg, A.J. & A.Y.A. Omer (2020). De groene cirkels markeren de tussenopeningen en de zwarte driehoeken de instroomopeningen.



Na aanleg van de langsdammen zijn de openingen twee keer aangepast, resulterende in drie fasen van de openingen. In deze rapportage wordt telkens vergeleken met Fase I direct na aanleg.

- Fase I: instroomopening helemaal open (OLR -1,75 m), en tussenopeningen dicht (OLR +1,20 m);
- Fase II: maart/april 2018 zijn de openingen aangepast. Wamel helemaal dichtgezet (instroom) en Dreumel dichtgezet voor 50% (recreatievaart wel open). Ophemert nog open;
- Fase III: vanaf april 2019 Dreumel is iets groter gemaakt (stroomsnelheid neemt af van 1,7 m/s naar 1,5 m/s). Ingang Ophemert opening over 100 m open houden bodemligging (OLR -1,75 m).

De overige fasen zijn voor nu nog niet beschouwd in deze rapportage.

### 3.2 Principewerking langsdam

De langsdammen op de Waal beïnvloeden de hydrodynamica en morfologie van het zomerbed. Dit is uitvoerig beschreven in Huthoff et al. (2011). Samengevat worden de volgende rivierfuncties beïnvloedt:

- Hoogwaterveiligheid: de langsdammen verlagen de waterstanden bij extreme afvoeren. In Afbeelding 3.6 is het waterstandseffect op de rivieras getoond voor de situatie met en zonder langsdammen en Boven-Rijn afvoeren van 800-18.000 m<sup>3</sup>/s. De waterstand bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s neemt met maximaal 10 cm af (rkm 912). Dit is uitgebreid behandeld in WP6 (Asselman en De Grave, 2020).
- Scheepvaart: door opstuwing van de laagwaterwaterstand neemt de waterdiepte beperkt toe en verbetert de bevaarbaarheid over de lengte van de langsdam en tot circa 20 km bovenstrooms daarvan. De opstuwing van de waterstand vindt plaats bij afvoeren t/m 1.020 m<sup>3</sup>/s en bedraagt maximaal 35 mm bij 800 m<sup>3</sup>/s en 22 mm bij 1.020 m<sup>3</sup>/s. Bij afvoeren van 1.500 m<sup>3</sup>/s en hoger neemt de waterstand in de hoofdgeul af. Ergens tussen 1.020 m<sup>3</sup>/s - 1.500 m<sup>3</sup>/s ligt het omslagpunt waarbij het opstuwde effect van de versmalling van het zomerbed teniet gedaan wordt door de groter wordende onttrekking van afvoer door de oevergeul. Bij langsdam Ophemert trekt de oevergeul altijd (te) veel afvoer en is er daardoor altijd een waterstandsverlaging (zie ook Sieben, 2020). Dit is uitgebreid behandeld in WP7 (Van der Wijk

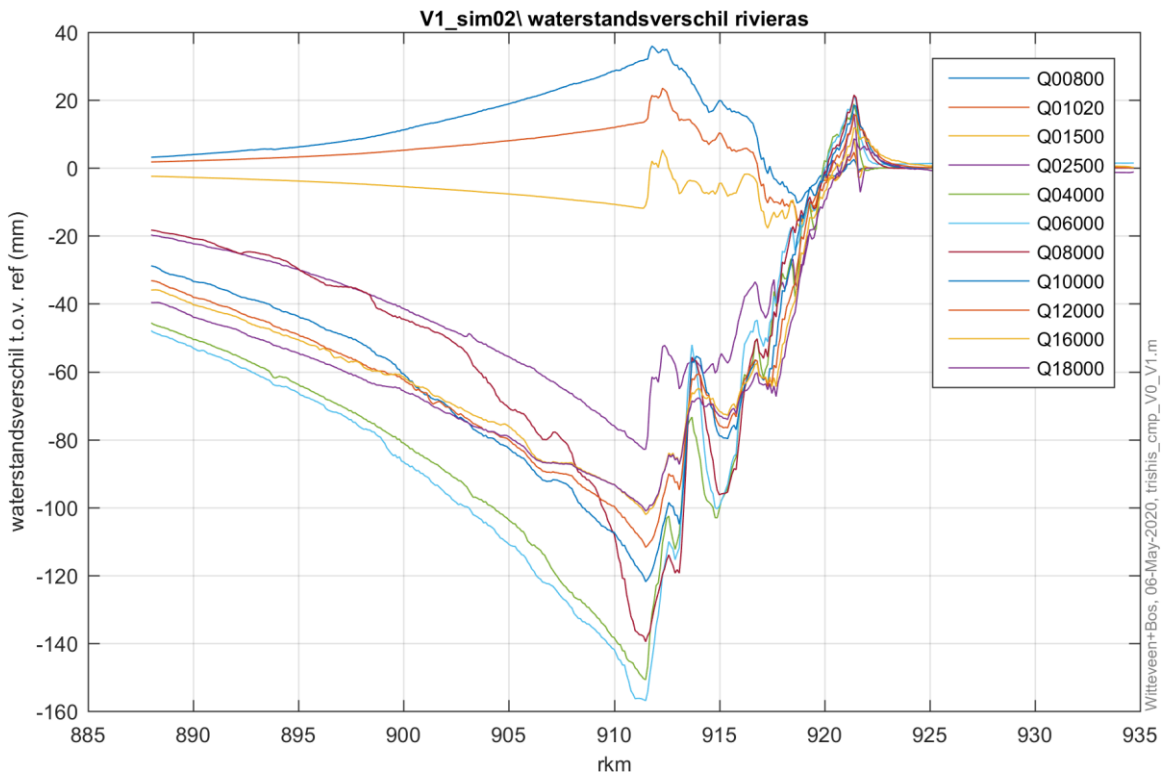


& Van der Mark, 2020). Uit waterstandsmetingen bij lage afvoeren blijkt dat het opstuwende effect van langsdammen ook klein is en mogelijk zelfs nog kleiner gebleken dan de gesimuleerde waterstandseffecten. Dit is nader beschreven in WP 0 (Jong et al, 2021).

- Natuur: de langsdam zorgt voor een afname van scheepsgeïnduceerde golven en stroming achter de langsdam waardoor de groeigrens van oevervegetatie naar beneden lijkt op te schuiven naar het water toe. Dit is uitgebreid behandeld in WP8 (Collas et al., 2020).
- Waterbeschikbaarheid: Bij lage afvoer (vanaf circa 1.100 m<sup>3</sup>/s) worden de Prins Bernhardsluizen geopend en is er vrije verbinding met de Nederrijn via het Amsterdam-Rijnkanaal. Vanwege het opstuwend effect van de langsdammen bij lage rivierafvoer (ook tot circa 1.100 m<sup>3</sup>/s) neemt de waterstand ook in stuwpond Hagestein toe. Er kan bij gelijke waterstand meer water worden aangevoerd voor zoetwatervoorzieningen in Noord- en Zuid-Holland. Uit Afbeelding 3.6 is af te lezen dat ter plaatse van ARK (rkm 913,4) de opstuwung bij 800 m<sup>3</sup>/s 35 mm bedraagt. In WP9 (Van der Vat, 2020) is geconcludeerd dat het effect op de zoetwatervoorziening van de langsdammen bij Wamel, Dreumel en Ophemert zoals deze nu aangelegd zijn zeer beperkt is. Daarom wordt deze functie verder niet beschouwd.

In het vervolg van deze paragraaf wordt in meer detail ingegaan op de waterstandseffecten en stromingspatronen die ontstaan door de langsdammen.

Afbeelding 3.6 Waterstandsverandering op de rivieras tussen situatie zonder en met langsdammen op de Waal (Fase I)



Omdat de instroom- en tussenopeningen onderdeel uitmaken van deze optimalisatie en invloed hebben op de effectiviteit van de langsdam, wordt in onderstaande tekst nader ingegaan op het stroombeeld voor lage afvoeren tot en met afvoeren waarbij de langsdamkruin nog net niet gaat overstromen.

Door de langsdam ontstaat een twee-geulen systeem; een oevergeul en een hoofdgeul. Hierdoor ontstaan bij waterstanden tot onder de kruin van de langsdam verschillen in het waterstandsverhang in de oevergeul en hoofdgeul. Dit verschil (verval) is bepalend voor de afvoer door de oevergeul.

Afbeelding 3.7 toont de verhanglijnen in de hoofdgeul en in de drie oevergeulen Wamel, Dreumel en Ophemert bij 1.020 m<sup>3</sup>/s (OLR). Bij deze afvoer is de waterstand hoger dan de instroomdrempels maar nog

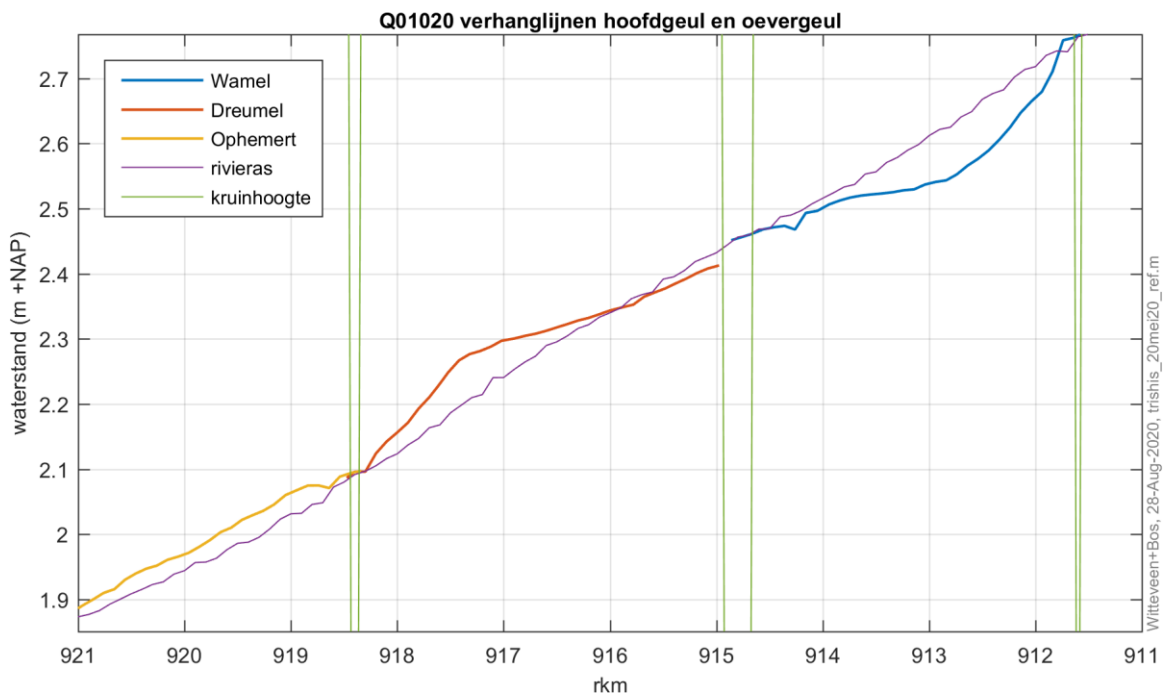
onder de drempel van de tussenopeningen. Bij Wamel is de waterstand over de hele lengte van de oevergeul lager dan op de rivieras. Het maximale verschil is bijna 10 cm. In de oevergeul van Dreumel en Ophemert is het omgekeerde het geval. Daar is de waterstand in de oevergeul enkele cm's hoger dan op de rivieras. Wat verder opvalt is dat op een aantal locaties in de oevergeulen van Dreumel en Ophemert de waterstand wordt opgestuwd als gevolg van kribrestanten (rkm 919,0) of ondieptes (rkm 917,4 - 918,0). Bij deze afvoer stroomt er door de oevergeulen Wamel, Dreumel en Ophemert een afvoer van respectievelijk 50, 60 en 110 m<sup>3</sup>/s (Afbeelding 3.10), uitgedrukt in relatieve oevergeulafvoer is dit 5, 6 en 13% zoals te zien in Afbeelding 3.11.

Het stroombeeld bij een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s is hier goed mee te vergelijken (Afbeelding 3.8), doordat er relatief meer afvoer door de oevergeul stroomt (Afbeelding 3.11) is het verhang in beide geulen meer in evenwicht.

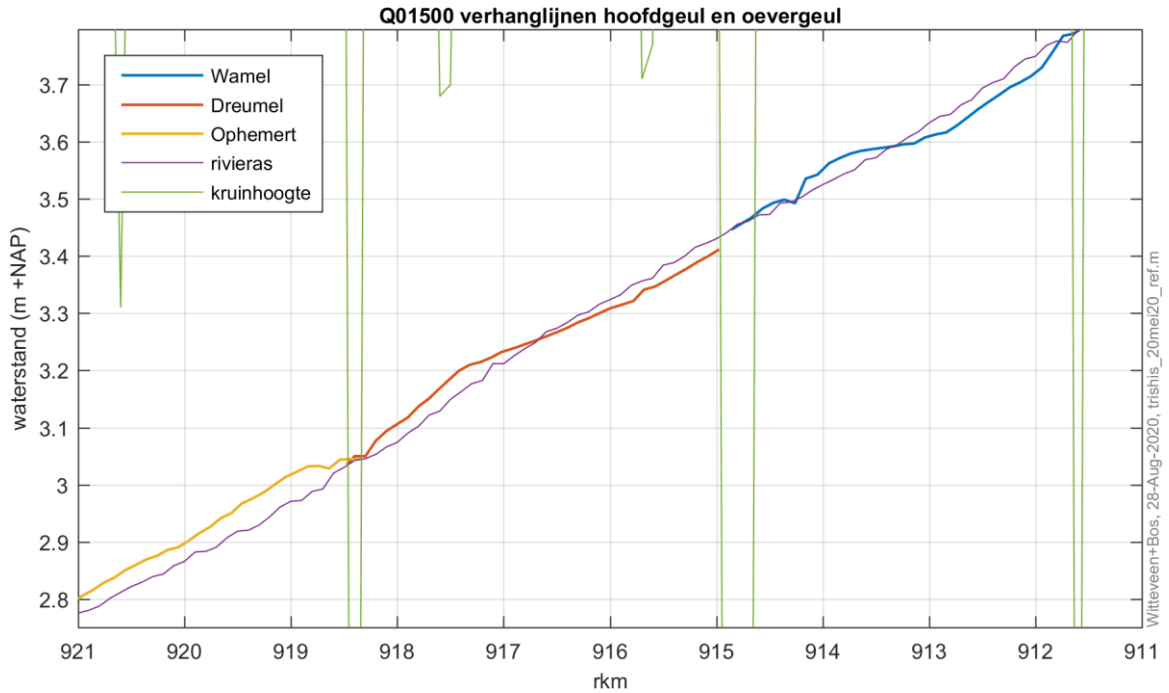
Zodra de waterstand hoger is dan OLR +1,25 m vindt er ook uitwisseling plaats van water door de tussenopeningen. Afbeelding 3.9 toont de verhanglijnen bij een afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s. Bij Wamel en Dreumel is de waterstand in de hoofdgeul bij de instroomopening en bovenstroomse tussenopening licht hoger en stroomt water vanuit de hoofdgeul naar de oevergeul. Bij de benedenstroomse tussenopening stroomt het weer de hoofdgeul in omdat het verhang hier richting de hoofdgeul is (Afbeelding 3.10). Dit is ook het geval voor de tussenopening van Ophemert. Wat verder opvalt is dat de tussenopeningen ervoor zorgen dat het verhang tussen de hoofd- en oevergeul gedeeltelijk vereffend wordt (vergelijk verhanglijnen van 1.500 m<sup>3</sup>/s en 2.500 m<sup>3</sup>/s).

Zodra de langsdam overstroomt (vanaf circa 3.000 m<sup>3</sup>/s) is het verhang tussen beide geulen min of meer gelijk en is er geen sprake meer van een twee-geulensysteem. De oevergeul afvoer neemt in verhouding toe bij een hogere Waalafvoer (Afbeelding 3.11).

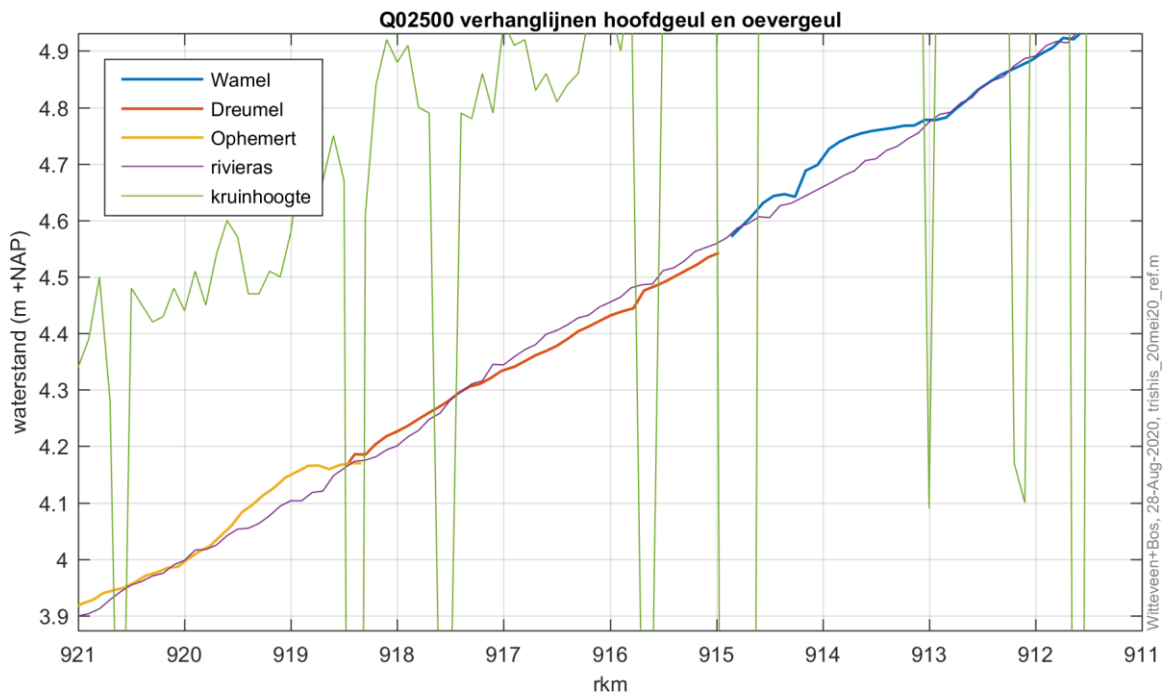
Afbeelding 3.7 Verhanglijnen hoofdgeul en oevergeulen bij 1.020 m<sup>3</sup>/s



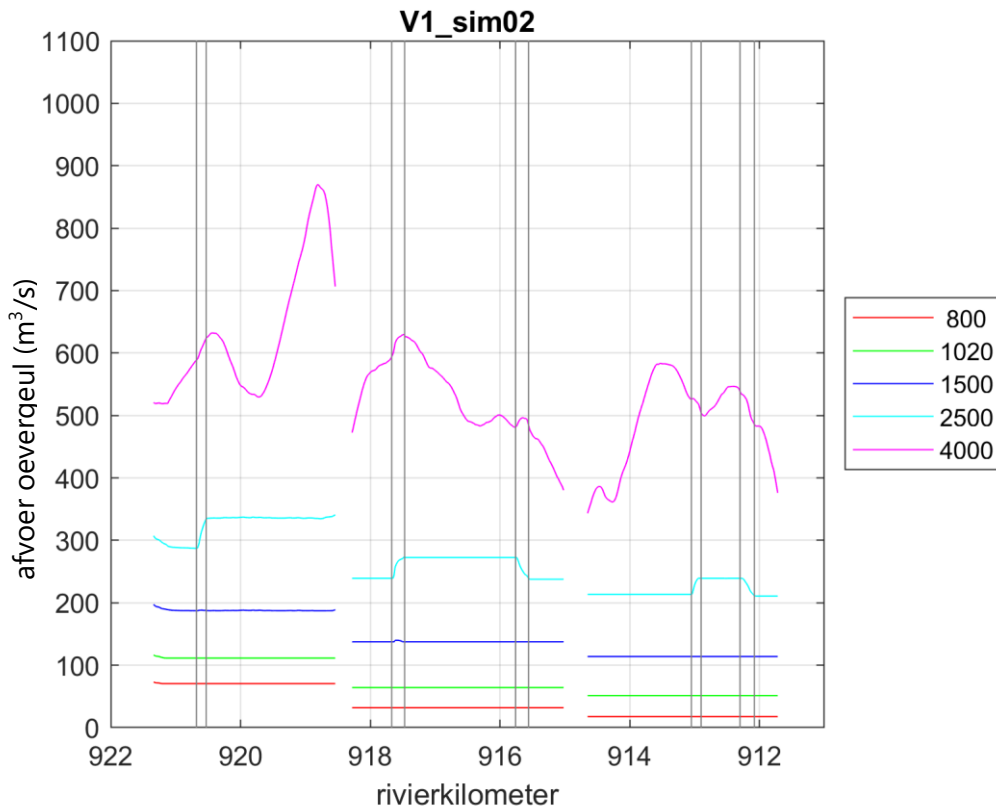
Afbeelding 3.8 Verhanglijnen hoofdgeul en oevergeulen bij 1.500 m<sup>3</sup>/s



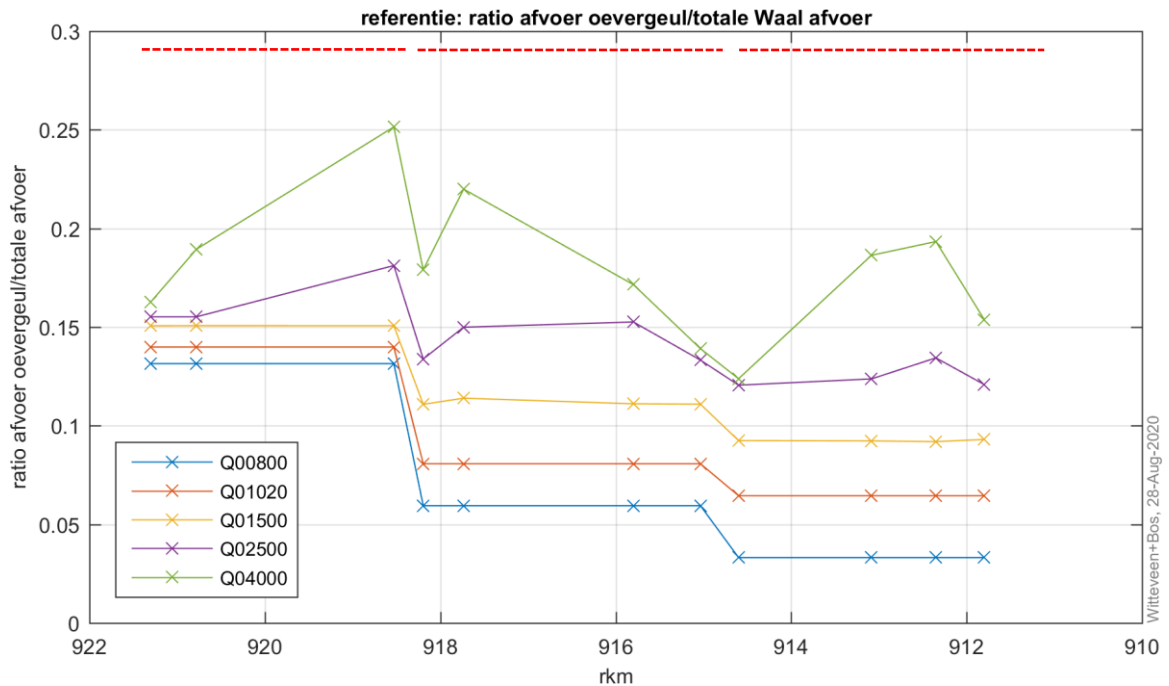
Afbeelding 3.9 Verhanglijnen hoofdgeul en oevergeulen bij 2.500 m<sup>3</sup>/s



Afbeelding 3.10 Afvoer door de oeversgeulen ( $m^3/s$ ) bij Boven-Rijn afvoeren 800 - 4.000  $m^3/s$



Afbeelding 3.11 Relatieve oeversgeulafvoer voor Boven-Rijnafvoeren 800 - 4.000  $m^3/s$ . In rood-gestreept is de ligging van de drie langsdammen aangegeven



### 3.3 Indicatoren rivierkundige functies

Tabel 3.2 toont per rivierfunctie de indicatoren, het afvoerbereik waarop effecten optreden en uitvoerlocatie.

Voor beoordeling van de effecten op de rivierfuncties geldt:

- Hoogwaterveiligheid: hoe lager de extreme waterstand hoe beter;
- Scheepvaart: waterdiepte in de vaarweg; hoe groter hoe beter;
- Stroomsnelheidsverschillen: in hoofdgeul als indicator voor initiële erosie en sedimentatie. Hier wordt momenteel nog geen waardeoordeel aan gegeven.

Tabel 3.2 Indicator voor het beoordelen van de functies

functie	indicator	afvoerbereik (m <sup>3</sup> /s)	uitvoerlocatie
hoogwaterveiligheid	waterstand rivieras (rkm)	13.000-18.000	rivieras
scheepvaart	waterdiepte vaargeul	800 - 2.200	rivieras
	stroomsnelheidsverschillen vaargeul (als indicator voor morfologie)	3.000 - 6.000	rivieras
	zichtbaarheid	-	-
natuur	waterdiepte oevergeul	ca. 600 - 4.000	oevergeul-as
	afvoer door de oevergeul	ca. 600 - 4.000	oevergeul-as stroombeelden
waterbeschikbaarheid	opstuwning direct bovenstrooms langsdam	600 - 1020	rivieras
	afvoer hoofdgeul/oevergeul	600 - 1020	afvoerradien boven- benedenstrooms openingen

# 4

## UITGEVOERDE OPTIMALISATIEVARIANTEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten gegeven van de Delft3D-simulaties die zijn uitgevoerd voor de verschillende variaties in het ontwerp van de langsdam. In paragraaf 4.1 is een beschrijving gegeven van de verschillende ontwerpaspecten die zijn beschouwd en de variaties hierop die zijn gemodelleerd. In paragraaf 4.2 volgen de resultaten van deze simulaties.

### 4.1 Beschouwde optimalisatievarianten

Zoals benoemd in paragraaf 3.1 kan het ontwerp van een langsdam opgesplitst worden in een aantal onderdelen. Ieder van deze onderdelen is individueel gevarieerd in de Delft3D-simulaties. In Tabel 4.1 is een overzicht opgenomen van de ontwerpparameter, de waarde van de pilot (na aanleg in 2018) en de ontwerpvarianten die zijn doorgerekend (inclusief hun afkorting). In de tabel is ook aangegeven met welke modelsimulatie elke variatie wordt vergeleken, meestal is dit de referentiesituatie (v1), maar soms kan er beter vergeleken worden met een andere variant, om de effecten van dit individuele ontwerpaspect beter te kunnen beoordelen.

Tabel 4.1 Ontwerpaspecten die beschouwd zijn in de ontwerpoptimalisatie

onderdeel	parameter	Pilot-situatie in 2018 (v1)	Simulaties voor ontwerpvarianten	Vergelijken met:
langsdamlichaam	hoogte	OLR +2,75 m	Vopt_01: OLR +2,25 m (0,5 m verlaagd) Vopt_02: OLR +1,75 m (1,0 m verlaagd)	V1 V1
	talud	1:2,5	Vopt_07: Verticale damwand	V1
	materiaal	breuksteen	Vopt_08: Poreuze verticale damwand	Vopt_07
instroomopening	breedte	niet gevarieerd	-	-
	hoogte	OLR -1,75 m	V2: Volledig gesloten (OLR +2,75 m)	V1
	ruimtelijk		expert judgement	
tussenopeningen	breedte	niet gevarieerd	-	-
	hoogte	OLR +1,25 m	Vopt_03: OLR +2,00 m (50% gesloten) Vopt_04: OLR +2,75 m (100% gesloten)	V1 V1
oevergeul	breedte	varieert (ca. 50 tot 120 m)	Vopt_06a: Breedte constant op ong. 110/120 m, en bodemhoogte constant op OLR -2,75 m. Vopt_06b: 50% breedte van Vopt_06a Vopt_06c: 25% breedte van Vopt_06a	V1 Vopt_06a Vopt_06a
	diepte	Varieert (tussen OLR - 4,75 m en OLR +0 m)	Vopt_05a: Minimaal bodemhoogte OLR - 0.00 m Vopt_05b: Minimaal bodemhoogte OLR - 2.75 m	V1 Vopt_05a

## 4.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de Delft3D-simulaties beschouwd en wordt bepaald wat het effect op de rivierkundige functies is. Eerst wordt ingegaan op de ontwerpaspecten van het langsdamlichaam (kruinhoogte, talud en materiaal/poreusheid), daarna de instroomopeningen, tussenopeningen en ten slotte de dimensies van de oevergeul (diepte en breedte).

### 4.2.1 Langsdamlichaam - kruinhoogte

Het effect van het verlagen van de kruinhoogte van de langsdam op de indicatoren is onderzocht in twee alternatieven:

- Vopt\_01: OLR +2,25 m (0,5 m verlaagd);
- Vopt\_02: OLR +1,75 m (1,0 m verlaagd).

De drempelhoogte van de (tussen)openingen is niet aangepast in deze alternatieven. De effecten zijn bepaald voor twee kenmerkende Boven-Rijn afvoeren: 2.500 en 4.000 m<sup>3</sup>/s.

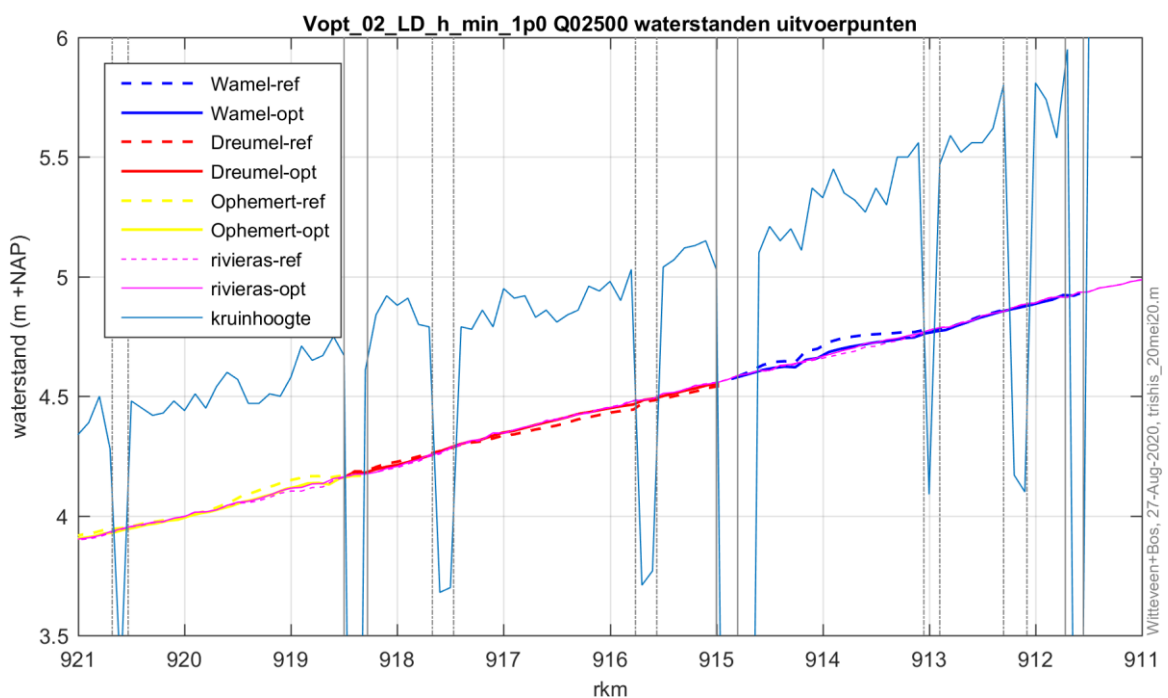
Het verlagen van de kruin zorgt ervoor dat de overstromingsfrequentie van de langsdam toeneemt; een twee-geulen systeem komt dan minder vaak voor. De langsdam zal minder vaak zichtbaar zijn, de nautische veiligheid neemt hierdoor af.

Aangaande de ijsbelasting geldt hoe lager de langsdam hoe kleiner de ijsbelasting is. Als de langsdam laag is kan het ijs makkelijker over de langsdam heen schuiven. Bij hogere constructies zal het ijs er tegenop stuwen wat grote belastingen met zich mee brengt.

### Waterstanden

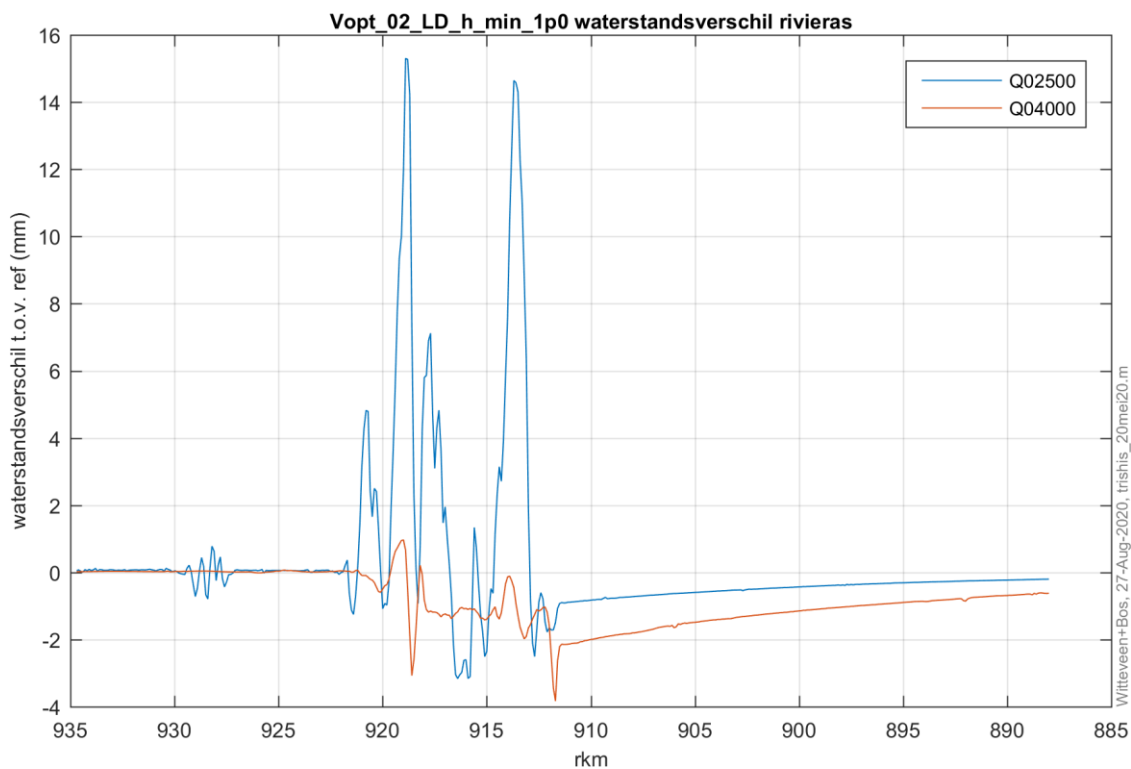
De grootste veranderingen zijn merkbaar in het afvoerbereik waarbij door de kruinhoogteverlaging van 0,5 m en 1 m de langsdam juist begint te overstromen (circa 2.500-3.000 m<sup>3</sup>/s). In dit afvoerbereik zien we dat het waterstandsverhang in de oevergeul en hoofdgeul veranderen. In Afbeelding 4.1 is te zien dat bij 1 m verlaging bij 2.500 m<sup>3</sup>/s het verhang tussen de hoofdgeul en oevergeul grotendeels vereffend wordt. Het verhang in de oevergeulen wordt steiler en volgt meer het verhang van de hoofdgeul. Hierdoor neemt het verhang tussen beide geulen af. Vanzelfsprekend veranderen de waterstanden niet of nauwelijks bij lagere of hogere afvoeren dan 2.500 m<sup>3</sup>/s - 3.000 m<sup>3</sup>/s.

Afbeelding 4.1 Waterstanden op de rivieras en de oevergeul voor variant met 1 m kruinverlaging bij 2.500 m<sup>3</sup>/s



Afbeelding 4.2 toont de waterstandsverschillen op de rivieras tussen de referentie en variant met kruinverlaging van 1 m voor de beschouwde afvoeren. De waterstandsverschillen op de rivieras zijn lokaal tot maximaal circa +16 mm bij 2.500 m<sup>3</sup>/s. Als de kruin bij hogere afvoeren al significant verdrongen is, dan zorgt een verlaging van de kruin voor iets minder weerstand en dus waterstandsverlaging (bij 4.000 m<sup>3</sup>/s enkele millimeters).

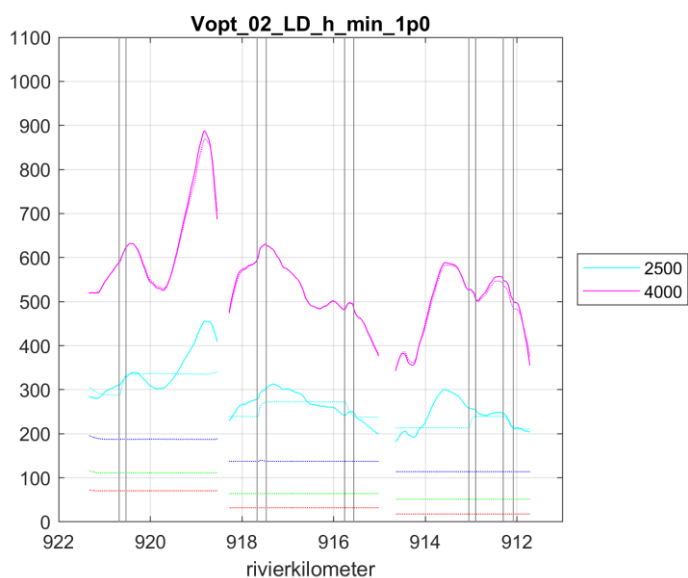
Afbeelding 4.2 Waterstandsverschillen op de rivieras tussen referentie en variant met 1 m kruinverlaging



### Afvoeren

In Afbeelding 4.3 is de oevergeulafvoer weergegeven in de referentie en variant met 1 m verlaging. Verlaging van de kruin leidt over het algemeen tot een toename van de oevergeulafvoer. In een aantal secties van de langsdammen is ook een afname van de oevergeulafvoer te zien.

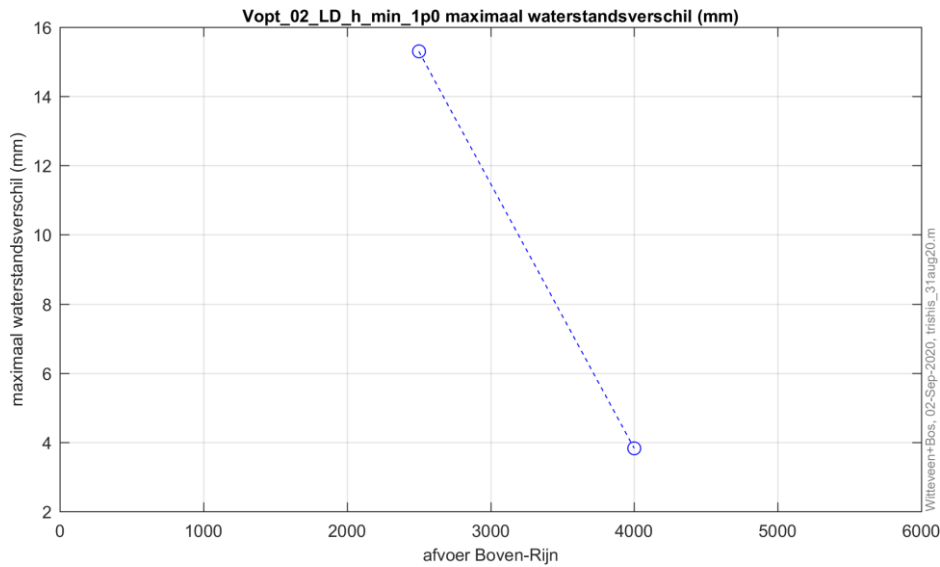
Afbeelding 4.3 Oevergeulafvoer in de referentie en variant met 1 m kruinverlaging (referentie is stippellijn)





Afbeelding 4.4 toont het waterstandsverschil als functie van de Boven-Rijn afvoer voor de variant met 1 m kruinverlaging. Het effect neemt af bij een toenemende afvoer.

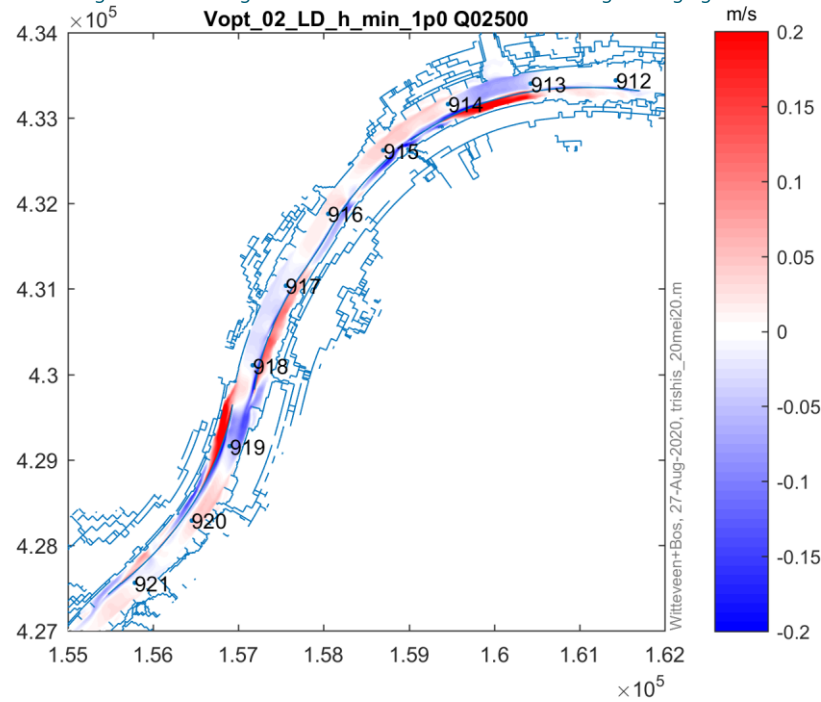
Afbeelding 4.4 Maximum waterstandsverschil (mm) op de rivieras als functie van de Boven-Rijn afvoer



### Stroomsnelheden

Het effect op het stroombeeld van een 1 m lagere kruin bij een afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s is weergegeven in Afbeelding 4.5. Als gevolg van de veranderende afvoerverdeling tussen hoofdgeul en oevergeul verandert ook het stroombeeld. In de oevergeul zijn de effecten op de stroomsnelheid (zowel toename als afname) groter dan in de hoofdgeul. Met name in de oevergeulen van Dreumel tussen rkm 913-914 en Wamel tussen 918,5 - 919,5 neemt de stroomsnelheid toe als gevolg van de hogere afvoer door de oevergeul, dit resulteert in het steilere verhang.

Afbeelding 4.5 Verandering in stroomsnelheden door een kruinhoogteverlaging van 1 m van het langsdamlichaam



## Conclusies met betrekking tot de rivierfuncties

De conclusies met betrekking tot de rivierfuncties zijn als volgt:

- Hoogwaterveiligheid: verlaging van de kruinhoogte heeft een zeer klein effect op de extreme hoogwaterstanden;
- Natuur: het stroombeeld in de oevergeul veranderd doordat de uitwisseling tussen oevergeul en hoofdgeul over langere afstand plaats vindt. Gemiddeld is er een toename in de stroomsnelheid door de afvoergeul bij deze afvoeren. Uit overleg met WP8 Natuur moet blijken in hoeverre de effecten gunstig of minder gunstig zijn. Dit overleg heeft nog niet plaatsgevonden. De luwtewerking van de langsdam neemt af waardoor de oevergeul meer blootgesteld wordt aan scheepsgolven en scheepsgeïnduceerde stroming.
- Scheepvaart: het initiële effect op de waterdiepte is zeer lokaal en klein (niet significant). De langsdam zal minder vaak zichtbaar zijn, de nautische veiligheid neemt hierdoor af.

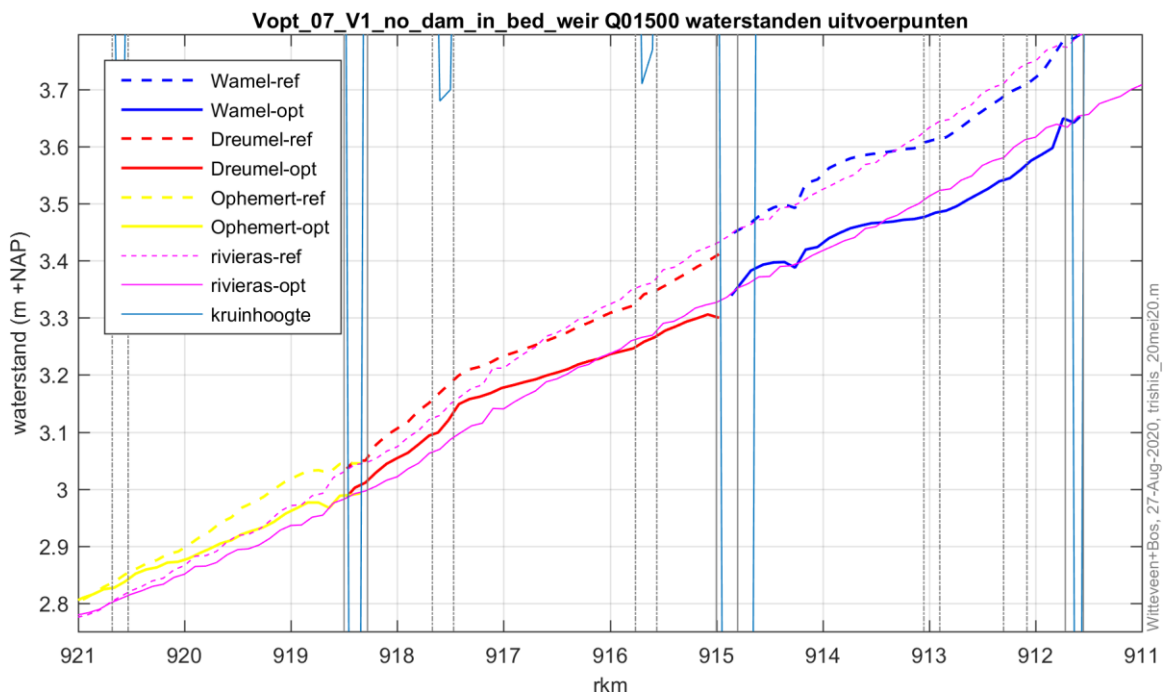
## 4.2.2 Langsdamlichaam - talud

In deze variant (Vopt\_07) zijn de taluds van de langsdammen verwijderd en is er sprake van een verticale damwand. De hydrodynamische effecten zijn bepaald voor twee kenmerkende Boven-Rijn afvoeren: 1.500 m<sup>3</sup>/s en 16.000 m<sup>3</sup>/s.

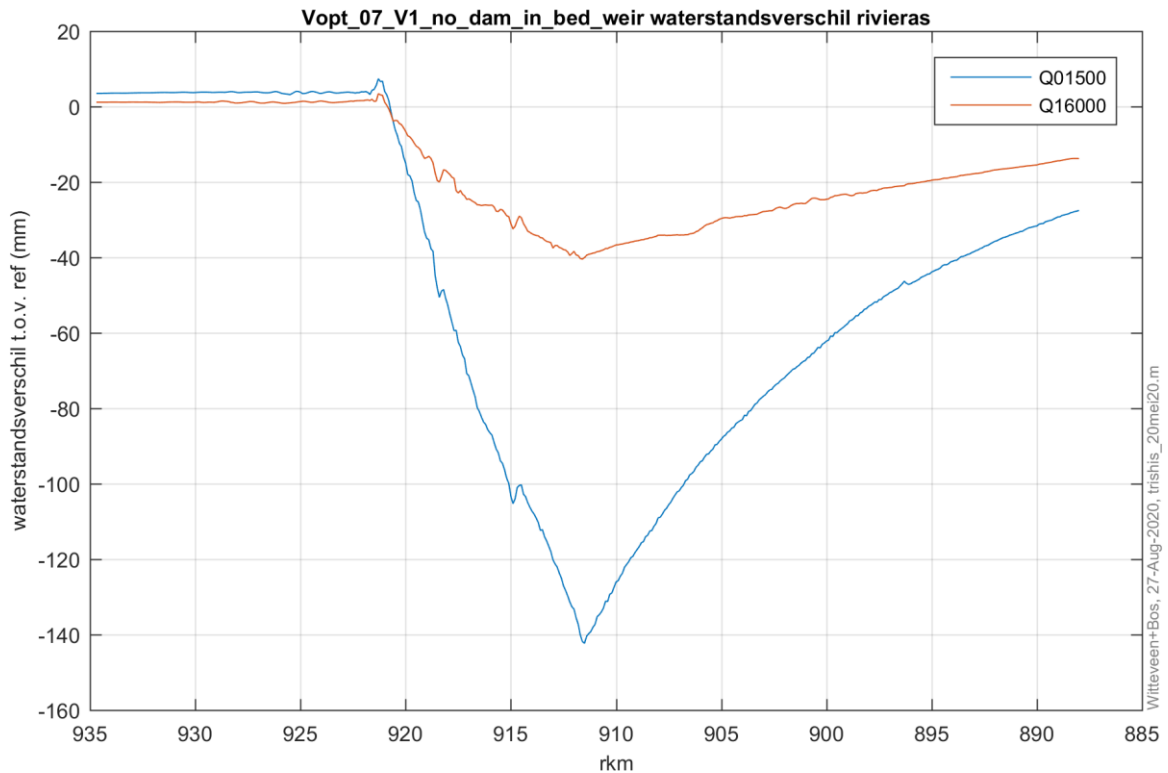
### Waterstanden

Het verwijderen van de taluds van de langsdammen is een rivierverruimende maatregel en geeft daarom een waterstandsverlagend effect in de hoofdgeul en oevergeul. In Afbeelding 4.6 zijn de waterstanden in de hoofdgeul en oevergeul weergegeven bij een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s. Het verhang tussen beide geulen lijkt niet veel te veranderen. Afbeelding 4.7 toont de waterstandsverschillen op de rivieras voor de beschouwde afvoeren. De waterstandsvaling bij 1.500 m<sup>3</sup>/s en 16.000 m<sup>3</sup>/s zijn maximaal 14 cm en 4 cm.

Afbeelding 4.6 Waterstanden op de rivieras en de oevergeul voor variant met verticale wand bij 1.500 m<sup>3</sup>/s



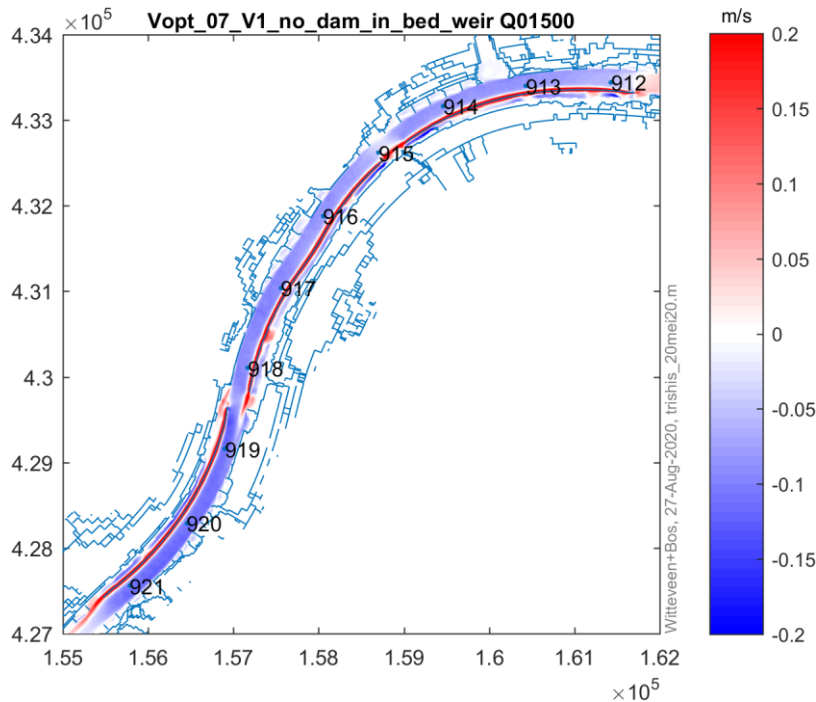
Afbeelding 4.7 Waterstandsverschillen op de rivieras tussen referentie en variant met verticale wand bij 1.500 en 16.000 m<sup>3</sup>/s



### Stroomsnelheden

De stroomsnelheden in de hoofd- en oevergeul nemen buiten het deel waar zich taluds bevonden af, zoals voor een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s te zien is in Afbeelding 4.8. In de hoofdgeul nemen de stroomsnelheden af met circa 0,1 m/s. Ter plekke van de verwijderde taluds neemt de stroomsnelheid toe met circa 0,5 m/s. De sedimentatie van zowel de hoofdgeul als oevergeul als gevolg van de aangelegde langsdammen zal verder toenemen. Dit kan worden tegengegaan door de hoofdgeul of oevergeul te versmallen of door de langsdam te verbreden (aan zowel oevergeul als hoofdgeul zijde een verticale wand te plaatsen en de ruimte hier tussenin op te vullen). Voordeel van een damwand is dat het een dichte constructie is waardoor er geen wateruitwisseling mogelijk is bij waterstanden tot onder de kruin van de dam. Hierdoor wordt het opstuwend effect bij een lage afvoer groter (geldt alleen als het materiaal minder poreus is bij gelijkblijvende dimensies van het langsdamlichaam). Het effect van deze wateruitwisseling wordt onderzocht in simulaties met een poreuze wand (paragraaf 4.2.3).

Afbeelding 4.8 Verandering in stroomsnelheden door het verwijderen van de taluds (c.q. plaatsen verticale wand)



Opgemerkt wordt dat door een verticale wand meer golfreflectie zal optreden wat mogelijk hinderlijk is voor de scheepvaart.

#### Conclusies met betrekking tot de rivierfuncties

- Hoogwaterveiligheid: gunstig effect op de extreem hoogwaterstand (waterstandsval van maximaal 4 cm);
- Natuur: de stroomsnelheid in de oevergeul neemt af. Dit is waarschijnlijk negatief voor de ecologische waarde. Scheepvaart: de waterdiepte neemt sterk af door de rivierruiming (initieel effect). Door de lagere stroomsnelheden ontstaat sedimentatie in het zomerbed bovenop de sedimentatie van enkele cm's in de hoofdgeul als gevolg van de langsdammen zoals beschreven is in WP10. De golfreflectie neemt toe wat mogelijk hinderlijk is voor de scheepvaart.

#### 4.2.3 Langsdamlichaam - materiaal

In deze variant is gevarieerd met de doorlatendheid van het langsdamlichaam om zo het effect van een ander materiaal op de hydraulica te bepalen. Hiervoor is in Delft3D gebruik gemaakt van de poreuze plaat optie. Er zijn in totaal zes simulaties uitgevoerd met een variërende porositeit bij een afvoer van  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Uit de eerste resultaten van simulaties waarbij de langsdam gemodelleerd is als een poreuze plaat blijkt dat naarmate de porositeit toeneemt er meer water vanuit de hoofdgeul de oevergeul instroomt waardoor het waterstandseffect afneemt. Het is niet bekend welke mate van porositeit overeenkomt met het huidige ontwerp van de langsdammen. De gevarieerde parameter (quadratic friction coefficient) kan alleen gevonden worden door kalibratie aan de hand van afvoermetingen.

#### Conclusies met betrekking tot de rivierfuncties

- Hoogwaterveiligheid: geen effect op de extreem hoogwaterstand;
- Natuur: indien de langsdam een lagere porositeit heeft zal er minder water door het lichaam stromen waardoor stroomsnelheden in de oevergeul zullen afnemen. Er zal dan meer water via de openingen stromen. Omdat het om een zeer klein effect gaat zal dit geen effect op natuur hebben.
- Scheepvaart: zeer beperkte vergroting van de waterdiepte.

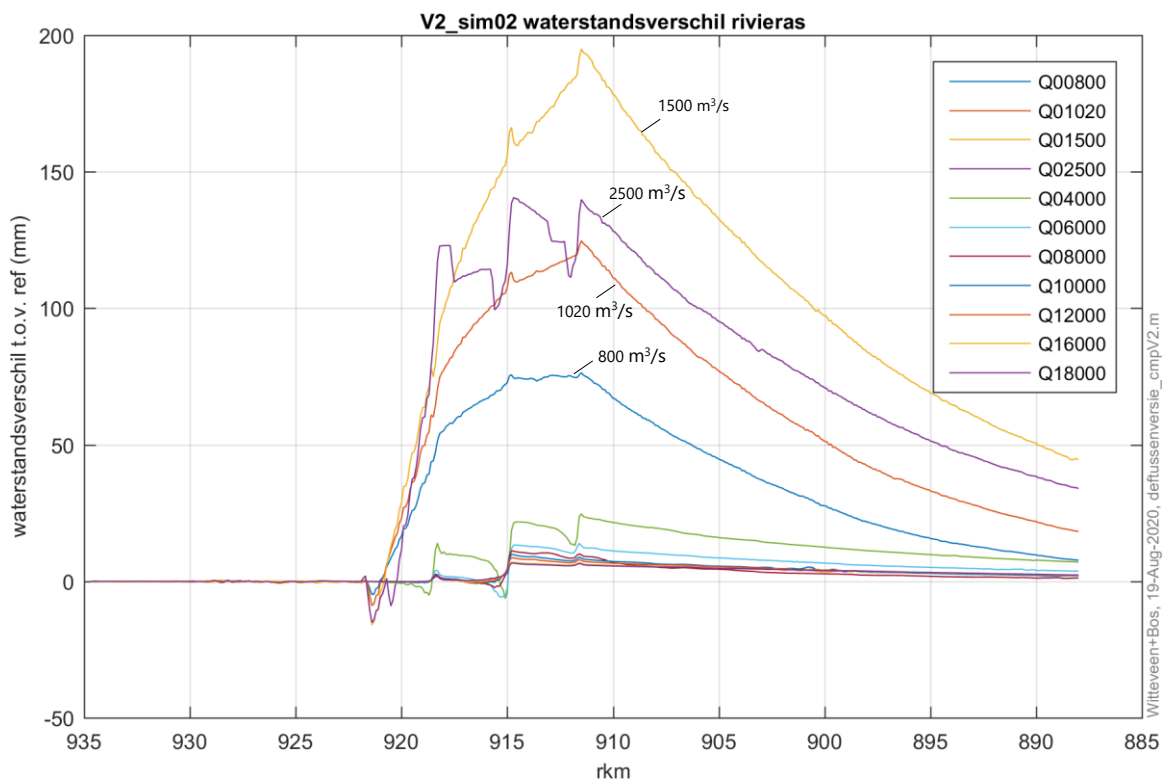
#### 4.2.4 Instroomopeningen - dimensies

In deze variant (V2\_sim02) is onderzocht wat het effect is van het sluiten van de instroomopeningen van de langsdammen. De kruinhoogte van de instroomopeningen ligt dan op OLR +2,75 m (overeenkomstig met een afvoer op de Boven-Rijn van circa 3.000 m<sup>3</sup>/s) in plaats van OLR - 1,75 m. Deze hoogte komt overeen met de kruinhoogte van het langsdamlichaam. Berekeningen zijn uitgevoerd in het hele afvoerbereik van 800 - 18.000 m<sup>3</sup>/s.

##### Waterstanden

Bij waterstanden tot aan de drempel van de tussenopeningen (OLR +1,25 m) overeenkomstig met een afvoer van circa 1.800 m<sup>3</sup>/s (Afbeelding 3.5), stroomt er geen water meer vanuit de hoofdgeul de oevergeul in. Het netto effect van de zomerbedversmalling is dan het grootst en leidt tot forse opstuwung van 20 cm in de hoofdgeul zoals te zien is in Afbeelding 4.9. De opstuwung is het grootst bij een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s en bedraagt 20 cm. Vanuit het oogpunt van bevaarbaarheid zouden de instroomopeningen dichtgezet moeten worden want met instroomopeningen hebben de langsdammen beperkt effect op de waterstand in de rivier (Afbeelding 3.6). Zodra de waterstand hoger is dan de drempel van de tussenopeningen begint de oevergeul afvoer uit de hoofdgeul te omtrekken en neemt het opstuwende effect af tot 14 cm bij een afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s. Naarmate de langsdammen verder overstromd raken neemt de opstuwung verder af. Bij extreme afvoeren bedraagt het effect nog circa 1 cm.

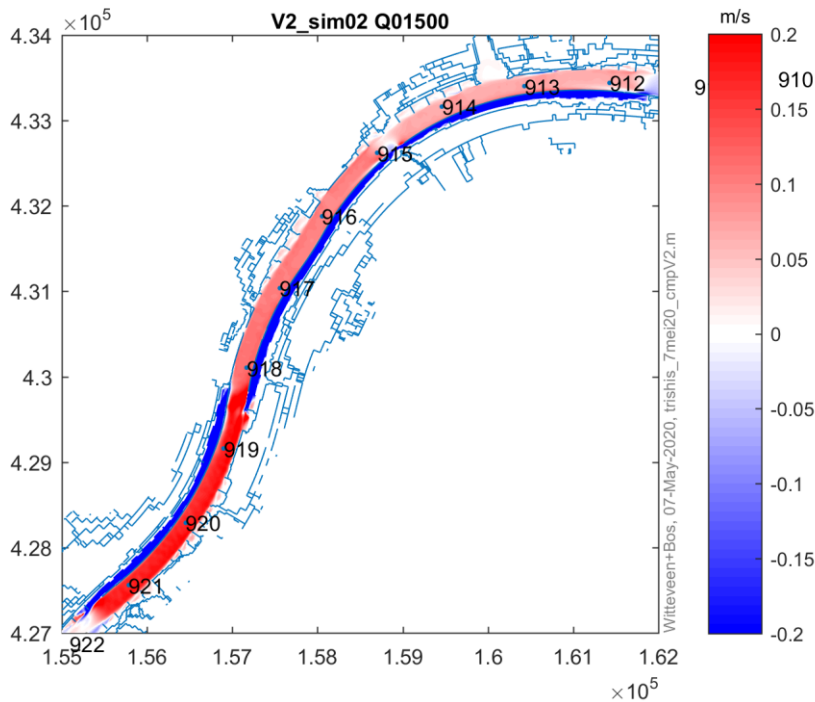
Afbeelding 4.9 Waterstandsverschillen op de rivieras als gevolg van het sluiten van de instroomopeningen



##### Stroomsnelheden

Het effect op de stroomsnelheid bij een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s is in beeld gebracht in Afbeelding 4.10. De stroomsnelheid in de hoofdgeul ter hoogte van Wamel neemt toe met 0,05 m/s en neemt toe in de benedenstroomse richting tot ruim 0,2 m/s bij Ophemert. Hier geldt hoe groter de oevergeul afvoer in de referentie des te groter is het effect op de stroomsnelheid. Zodra de tussenopeningen meestromen en na het overstroomen van de langsdam neemt het effect af.

Afbeelding 4.10 Verandering in stroomsnelheden door het dichtzetten van de instroomopeningen bij 1.500 m<sup>3</sup>/s



#### Conclusies met betrekking tot rivierfuncties

- Hoogwaterveiligheid: de instroomopening heeft een beperkt effect op de extreme hoogwaterstand (maximaal 1 cm);
- Natuur: de afvoer door de oevergeulen neemt bij afvoeren tot 3.000 m<sup>3</sup>/s sterk af. Dit is nadelig voor de natuur in de oevergeul;
- Scheepvaart: het initiële effect op de waterdiepte is een grote toename, wat gunstig is voor de scheepvaart. Op de lange termijn zal de lichte sedimentatie in de hoofdgeul als gevolg van de langsdammen afnemen. In WP7 is geconcludeerd dat het dichtzetten van de instroomopeningen resulteert in dat er in het bovenstroomse traject netto nauwelijks verandering optreedt ten opzichte van de situatie zonder langsdammen. De instelling van de inlaten kan daarmee een behoorlijk morfologisch effect hebben.

#### 4.2.5 Instroomopeningen - ruimtelijk ontwerp (plattegrond)

In de huidige situatie bestaan de instroomopeningen van de langsdammen uit een zijdelingse overlaat (Wamel en Ophemert) en een recht aanstromende overlaat (Dreumel). Bovenstrooms van de zijdelingse overlaten is een gestrekte oever aanwezig. Bij Dreumel is dit niet het geval.

In plaats van een zijdelingse instroomopening kan in het geval van kribben ook gekozen worden voor een instroomopening die haaks op de stroming staat in plaats van een zijdelingse opening bijvoorbeeld door het (gedeeltelijk) verlagen van een bestaand krib. Naar verwachting is dan een kleinere opening nodig t.o.v. een zijdelingse variant. Hiervan zijn geen Delft3D berekeningen uitgevoerd.

#### 4.2.6 Tussenopeningen

Het effect van het dichtzetten van de tussenopeningen op de indicatoren is onderzocht in twee alternatieven, door middel van aanpassing van de hoogte van de drempel:

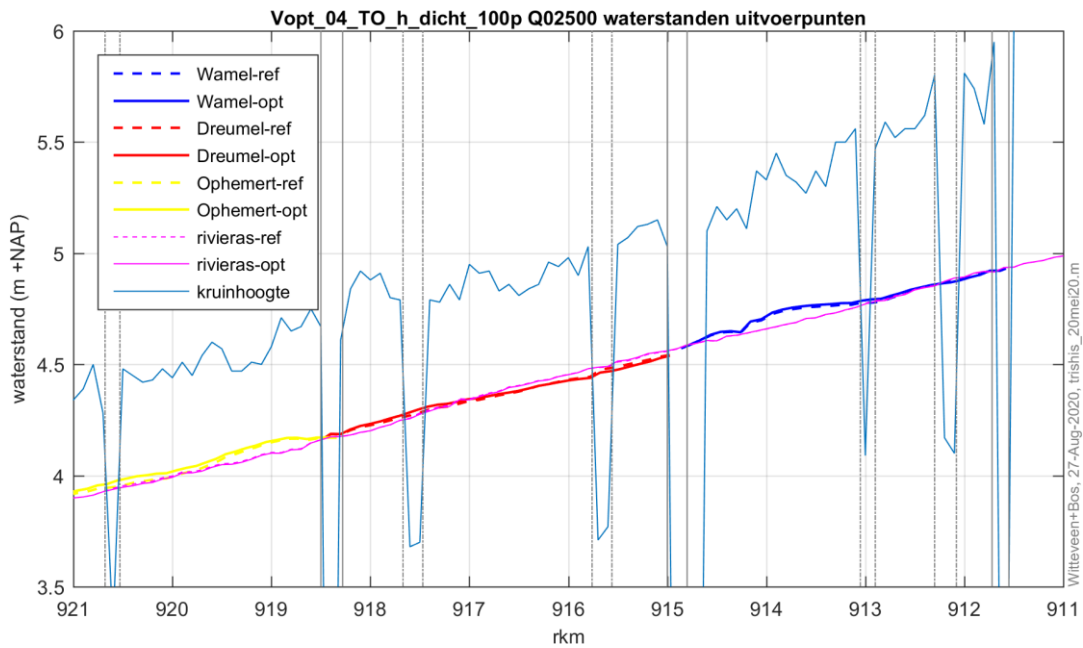
- Vopt\_03: OLR +2,00 m (50% gesloten);
- Vopt\_04: OLR +2,75 m (100% gesloten).

In de referentiesituatie is de drempelhoogte van de tussenopening OLR +1,25 m. De drempelhoogte van de instroomopeningen is niet aangepast in deze alternatieven. De effecten zijn bepaald voor twee kenmerkende Boven-Rijn afvoeren 2.500 en 4.000 m<sup>3</sup>/s.

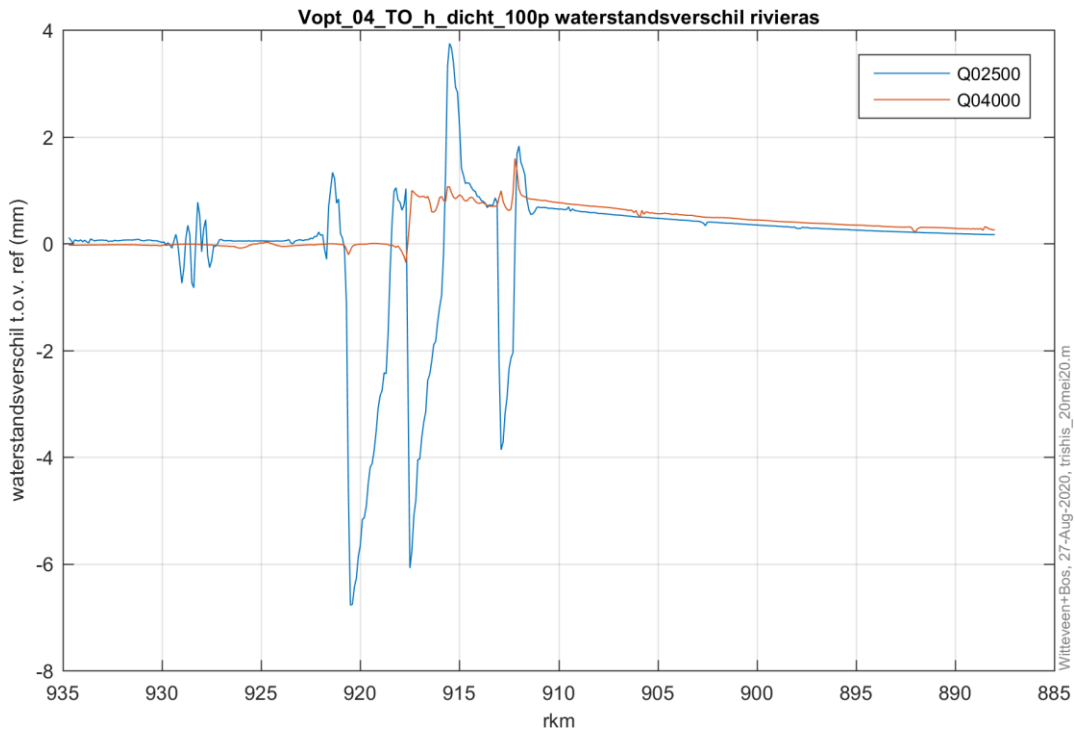
### Waterstanden

Bij een Boven-Rijn afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s stroomt in de referentiesituatie afvoer door de instroomopeningen en de tussenopeningen (Afbeelding 3.5). Afbeelding 4.11 toont het effect van het dichtzetten van de tussenopeningen op de waterstanden in de hoofdgeul en oevergeul bij 2.500 m<sup>3</sup>/s. Over het algemeen is het effect op de waterstanden en het verhang klein. Het verhang in de oevergeulen neemt iets toe omdat het verschil in verhang tussen de oevergeul en hoofdgeul minder vereffend wordt. Het resultaat is netto een klein (orde millimeters) opstuwend effect op de rivieras (Afbeelding 4.12).

Afbeelding 4.11 Waterstanden op de rivieras en de oevergeul voor variant met gesloten tussenopeningen bij 2.500 m<sup>3</sup>/s



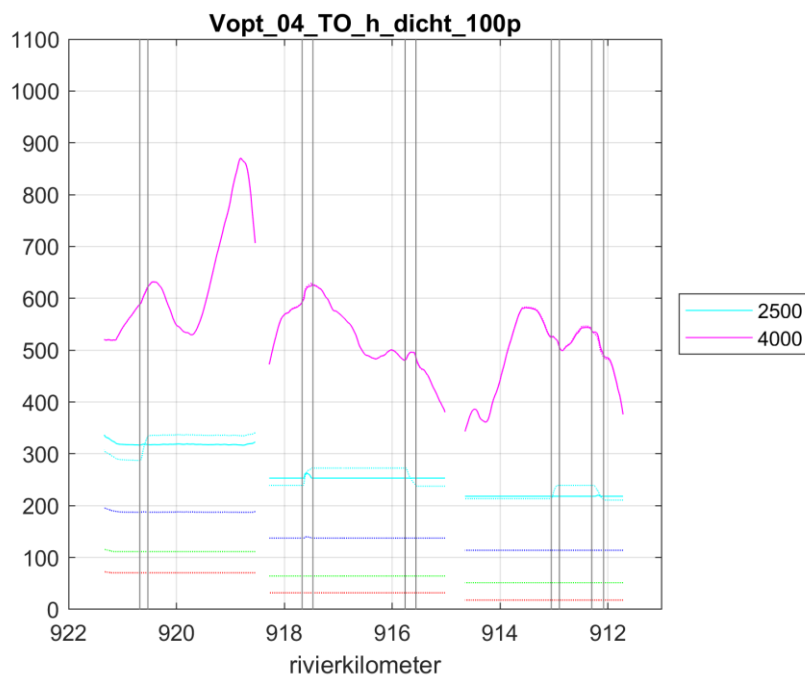
Afbeelding 4.12 Waterstandsverschillen op de rivieras als gevolg van het volledig sluiten van de tussenopeningen



### Afvoeren

In Afbeelding 4.13 is de oevergeulafvoer weergegeven tussen de referentie en variant met gesloten tussenopeningen. Bij 2.500 m<sup>3</sup>/s zijn zowel de tussenopeningen als instroomopeningen watervoerend. Door het sluiten van de tussenopeningen blijft de oevergeulafvoer constant terwijl in de referentie bij de tussenopeningen uitwisseling van afvoer plaatsvindt met de hoofdgeul. Bij 4.000 m<sup>3</sup>/s zijn de langsdammen overstromend en is het effect niet meer zichtbaar

Afbeelding 4.13 Oevergeulafvoer in de referentie en variant met gesloten tussenopeningen (referentie is stippellijn)

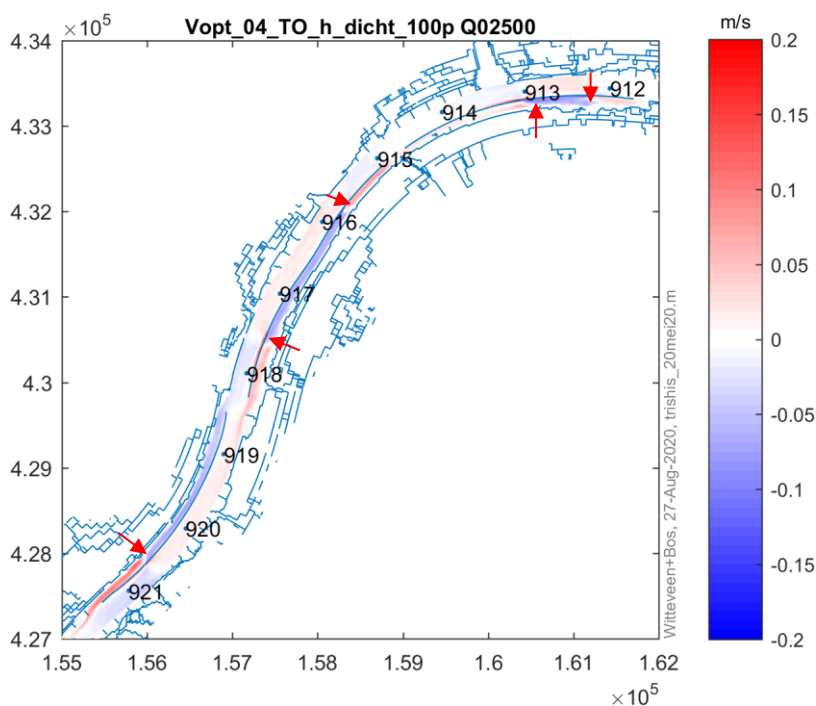




## Stroomsnelheden

Een tussenopening zorgt ervoor dat een waterstandsverschil tussen oevergeul en hoofdgeul vereffend. Is de waterstand in de oevergeul hoger dan in de hoofdgeul, dan zien we een stroming van de oevergeul naar de hoofdgeul en vice versa. In de referentiesituatie zien we bij Wamel en Dreumel in de meest bovenstroomse tussenopening afvoer richting de oevergeul, en in de tweede tussenopening afvoer richting de hoofdgeul. Hierdoor levert verhoging van de drempel in de tussenopening een afwisselend effect op het stroombeeld op (Afbeelding 4.11) waarbij er soms meer afvoer door de hoofdgeul gaat en soms minder.

Afbeelding 4.14 Verandering in stroomsnelheden door de sluiting van de tussenopeningen. Rode pijlen geven aan in welke richting de afvoer door de geopende tussenopeningen stroomt



## Conclusies met betrekking tot rivierfuncties

- Hoogwaterveiligheid: de tussenopeningen hebben geen effect op de extreem hoogwaterstand;
- Natuur: het stroombeeld in de oevergeul verandert, met minder uitwisseling tussen hoofdgeul en oevergeul. Uit overleg met WP8 Natuur moet blijken in hoeverre de effecten gunstig of minder gunstig zijn;
- Scheepvaart: het effect op de waterdiepte is beperkt tot millimeters. Erosie en sedimentatiepatroon in het zomerbed zal maar weinig veranderen ten opzichte van het effect van de langsdammen op de morfologie.

### 4.2.7 Oevergeul

Het effect van het wijzigen van de oevergeuldimensies is onderzocht in vijf alternatieven:

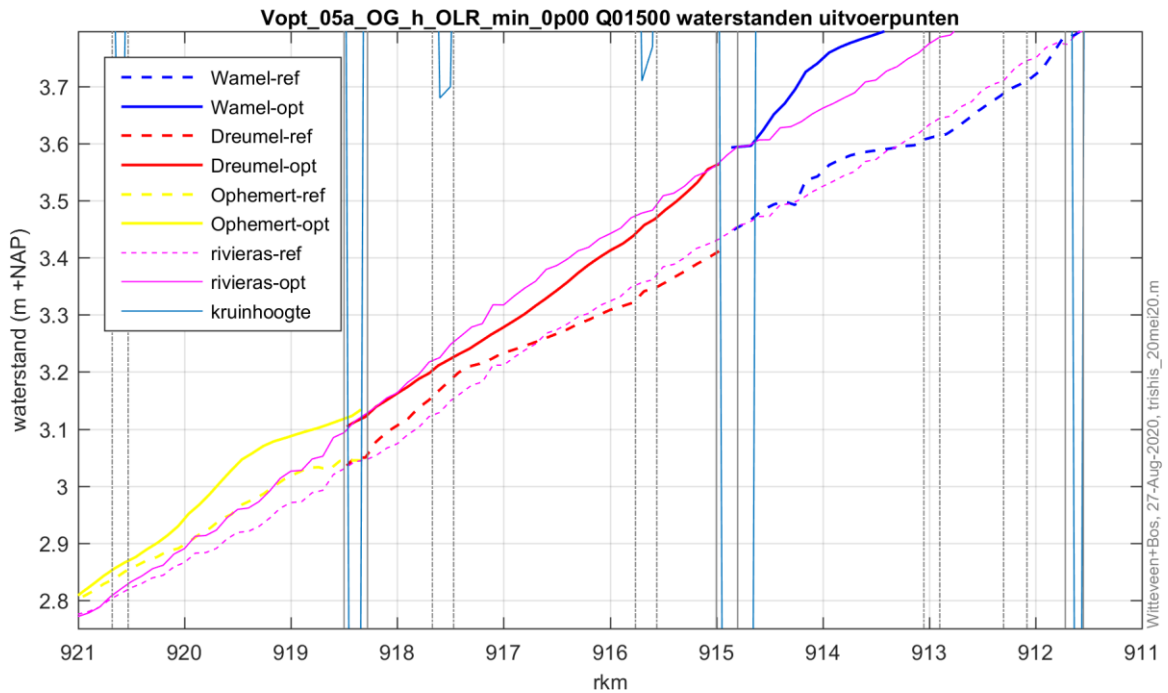
- Vopt\_5a: Minimaal bodemhoogte OLR 0,00 m;
- Vopt\_5b: Minimaal bodemhoogte OLR -2,75 m;
- Vopt\_06a: Breedte constant op ong. 110/120 m, en bodemhoogte constant op OLR -2,75 m;
- Vopt\_06b: 50% breedte van Vopt\_06a;
- Vopt\_06c: 25% breedte van Vopt\_06a.

In de referentie variëren de oevergeuldimensies tussen 50-80 m breedte en OLR +0,00 m tot -4,75 m diepte. De effecten zijn bepaald voor vier kenmerkende Boven-Rijn afvoeren: 1.020, 1.500, 4.000 en 16.000 m<sup>3</sup>/s.

## Waterstanden

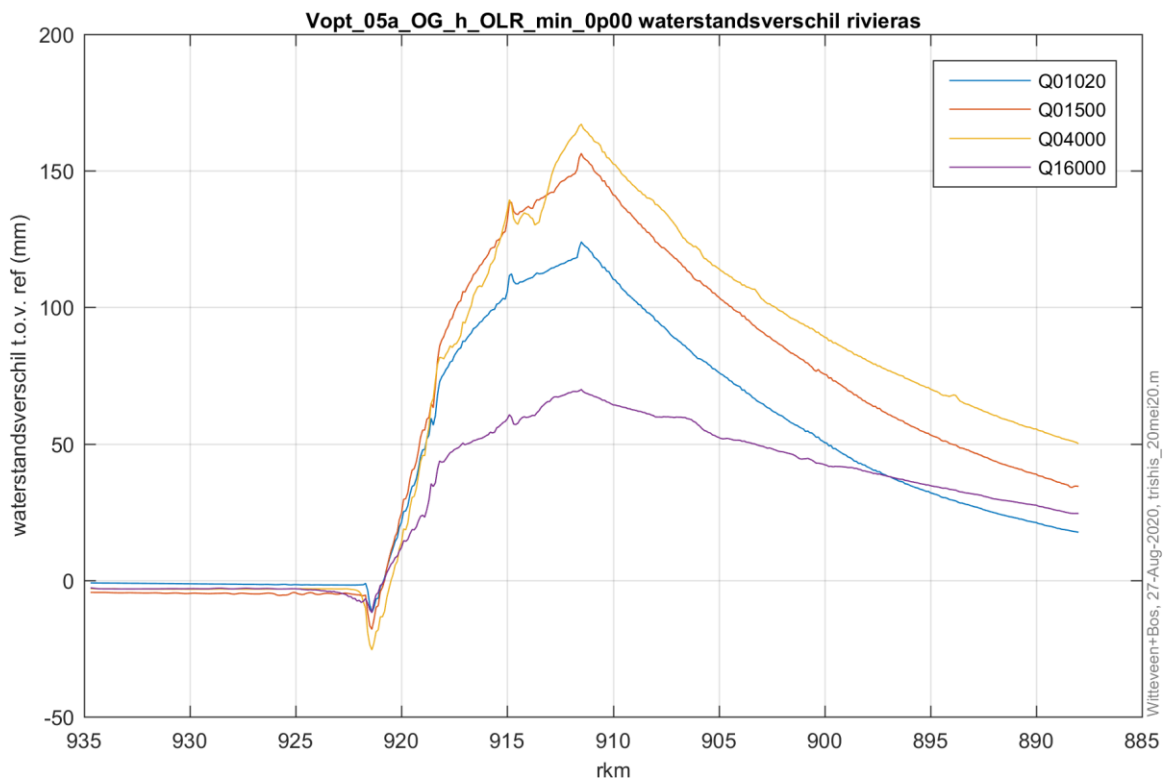
Voor de variant waarbij de oevergeul verondiept is tot OLR 0 m (Vopt\_5a) geldt dat bij een afvoer van 1.020 m<sup>3</sup>/s de oevergeul niet meestroomt. Er ontstaan dan ook geen effecten omdat de referentie gelijk is aan de variant. Bij een afvoer van 1.500 m<sup>3</sup>/s is dit wel het geval en leidt het verondiepen tot grote opstuwung van de waterstand en toename van het verhang in zowel de oevergeul als de hoofdgeul zoals te zien is in Afbeelding 4.15.

Afbeelding 4.15 Waterstanden op de rivieras en de oevergeul voor variant met oevergeulbodern op OLR 0 m bij 1.500 m<sup>3</sup>/s

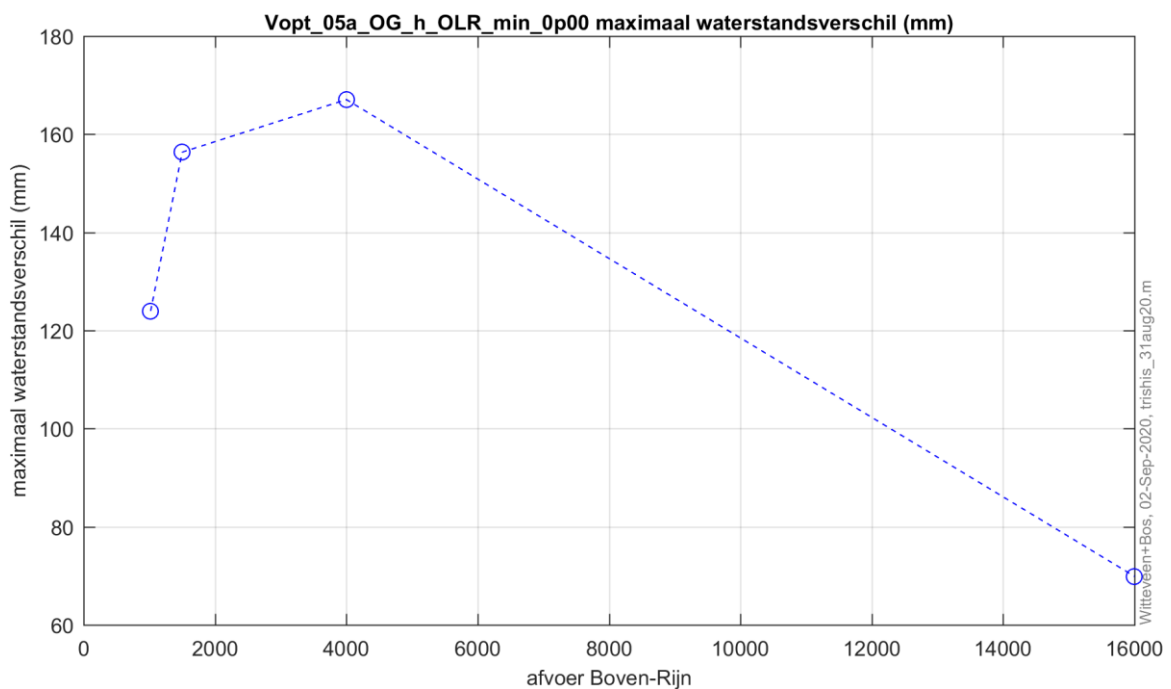


Afbeelding 4.16 toont de waterstandsverschillen tussen referentie en verondiepte oevergeul voor de beschouwde afvoeren. Afbeelding 4.17 toont het maximale waterstandsverschil op de rivieras per rivierafvoer. Het effect is maximaal bij een afvoer van 4.000 m<sup>3</sup>/s en neemt af naarmate de afvoer toeneemt. Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s is de opstuwung nog maximaal 7 cm.

Afbeelding 4.16 Waterstandsverschillen op de rivieras als gevolg van het verondiepen van de oeversgeul tot 0 m NAP (Vopt\_5a)



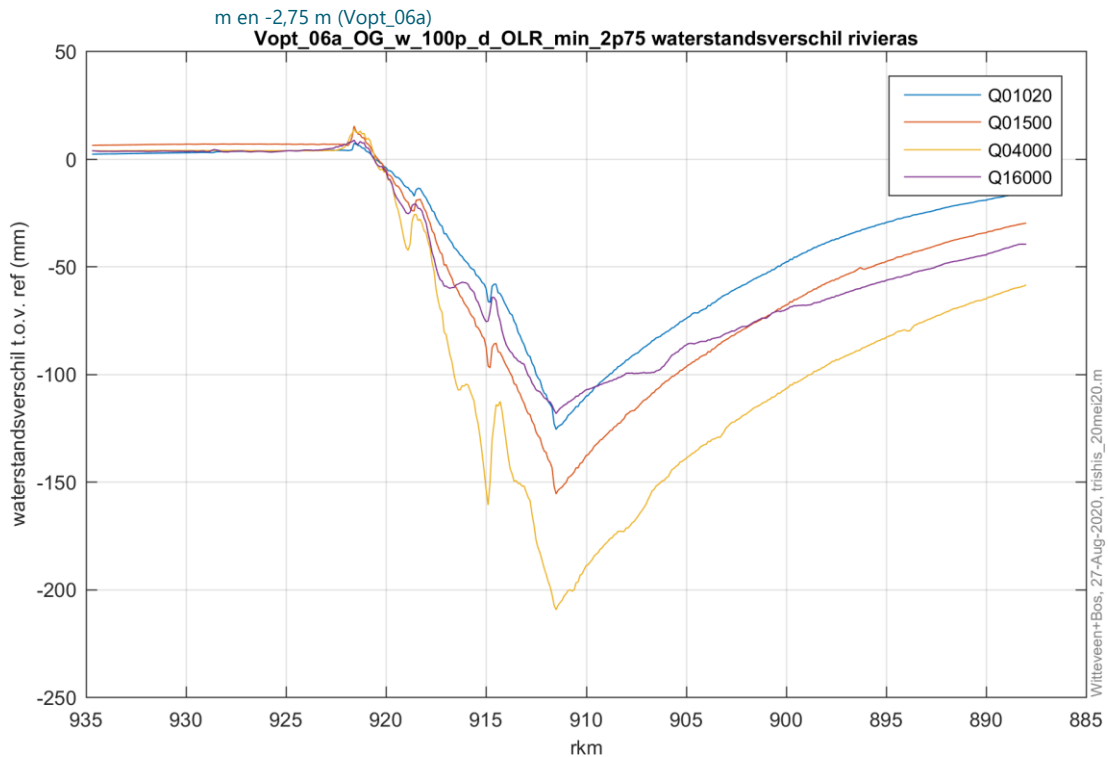
Afbeelding 4.17 Maximum waterstandsverschil (mm) op de rivieras als functie van de Boven-Rijn afvoer (Vopt\_5a)



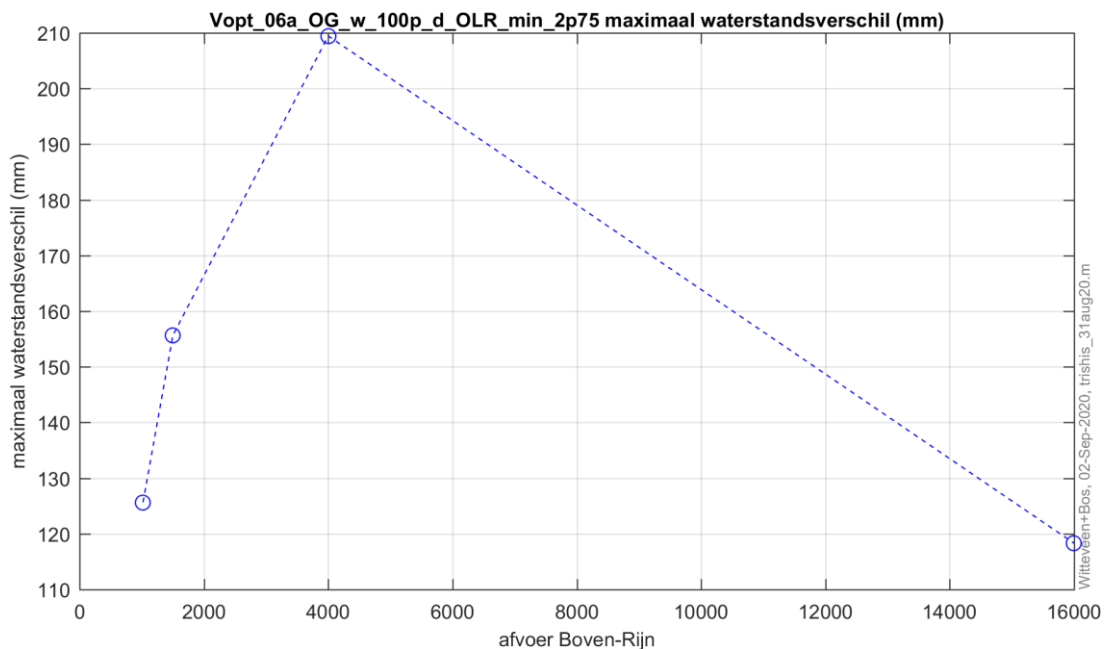
Uniforme verbreding en verdieping van de geul naar 120 m en -2,75 m (variant Vopt\_06a) leidt tot een forse afname van de waterstand variërend tussen de 12 - 21 cm, zie Afbeelding 4.18. Door het versmallen van de oeversgeul naar 50 m en 25 m (resp. 50 % en 25% versmalling) neemt de waterstandsvaling ten opzichte van de variant Vopt\_06a af met 33 - 40%.

Afbeelding 4.19 toont het maximale waterstandsverschil op de rivieras per rivierafvoer voor de variant Vopt\_06a. Het effect is maximaal bij een afvoer van 4.000 m<sup>3</sup>/s en neemt af naarmate de afvoer verder toeneemt.

Afbeelding 4.18 Waterstandsverschillen op de rivieras als gevolg van de uniforme verbreding en verdieping van de geul naar 120



Afbeelding 4.19 Maximum waterstandsverschil (mm) op de rivieras als functie van de Boven-Rijn afvoer (variant Vopt\_06a)



### Afvoeren

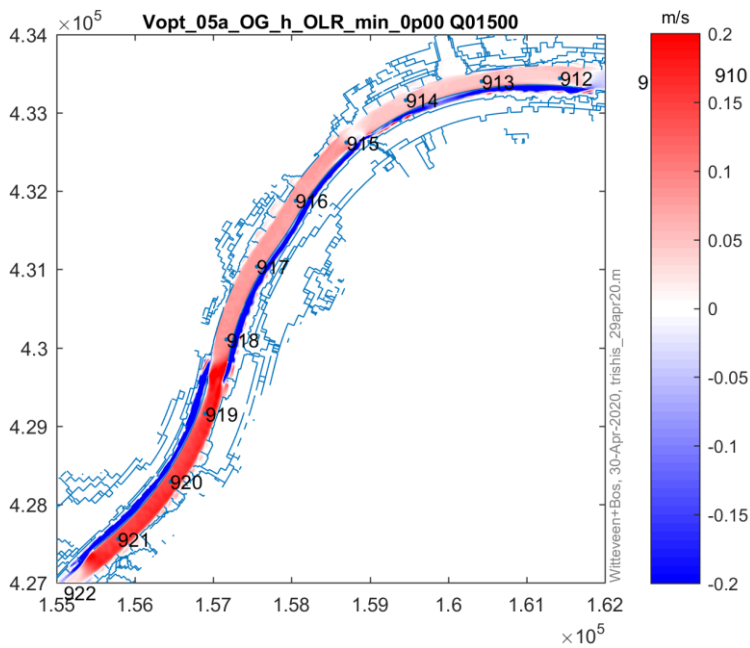
Een aanpassing in de dimensies van de oevergeul (breedte en diepte) heeft invloed op de afvoer die door de oevergeul wordt aangetrokken. In de doorgerekende varianten zorgt de verondieping van de oevergeul voor

een afname van de afvoer door de oevergeul en daardoor voor hogere waterstanden in de rivier. Een verbreding van de oevergeul zorgt voor een grotere afvoer door de oevergeul en daardoor voor waterstandsverlaging.

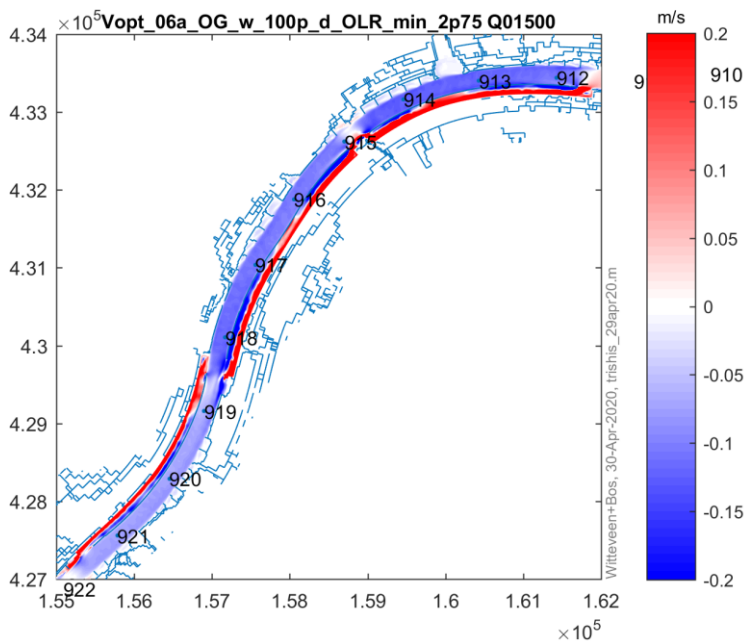
### Stroomsnelheden

Afbeelding 4.20 en Afbeelding 4.21 tonen de stroomsnelheidsverschillen bij 1.500 m<sup>3</sup>/s voor de verondiepte oevergeul naar OLR 0 m (Vopt\_5a) en verruimde geul (Vopt\_06a). Zoals verwacht leidt het verondiepen vanwege de herverdeling van afvoer tussen de oevergeul en hoofdgeul tot een afname van de stroomsnelheid in de oevergeul en toename in de hoofdgeul. Het omgekeerde effect is te zien in het geval van verruiming van de oevergeul (Afbeelding 4.21).

Afbeelding 4.20 Stroomsnelheidsverschillen tussen referentie en de verondiepte oevergeul naar OLR 0 m bij 1.500 m<sup>3</sup>/s (Vopt\_5a)



Afbeelding 4.21 Stroomsnelheidsverschillen tussen referentie en de verruimde oevergeul bij 1.500 m<sup>3</sup>/s (Vopt\_06a)



### Conclusies met betrekking tot de rivierfuncties

- Hoogwaterveiligheid: verruimen van de oeversgeul leidt tot een afname van de extreme waterstand terwijl verondiepen tot NAP +0 m leidt tot opstuwing tot maximaal 7 cm;
- Natuur: het stroombeeld in de oeversgeul verandert sterk (afhankelijk van de mate van de verandering van de geuldimensies). Uit overleg met WP8 Natuur moet blijken in hoeverre de effecten gunstig of minder gunstig zijn.
- Scheepvaart: in het geval verruiming van de oeversgeul zal de waterdiepte bij OLR afnemen hetgeen nadelig is voor de scheepvaart. Het omgekeerde is het geval voor een verkleining van de geuldimensies. Voor het vervullen van de functie recreatievaart in de oeversgeul is een minimale waterdiepte benodigd waardoor de oeversgeulbodem niet te ver mag aanzanden.

# 5

## CONCLUSIES

In deze studie staan drie onderzoeksvragen centraal:

- Wat is het nut en de noodzaak van de tussenopeningen?
- Zijn de huidige langsdammen overgedimensioneerd? Kunnen ze lager?
- Is een ander ontwerp van de langsdammen mogelijk?

De conclusies met betrekking tot deze onderzoeksvragen zijn als volgt.

*Wat zijn nut en noodzaak van de tussenopeningen?*

Een tussenopening zorgt ervoor dat een waterstandsverschil tussen oevergeul en hoofdgeul vereffent. Is de waterstand in de oevergeul hoger dan in de hoofdgeul, dan zien we een stroming van de oevergeul naar de hoofdgeul en vice versa. In de referentiesituatie zien we bij Wamel en Dreumel in de meest bovenstroomse tussenopening afvoer richting de oevergeul, en in de tweede tussenopening afvoer richting de hoofdgeul.

Het verhogen van de drempel tot aan de kruinhoogte van de langsdam (OLR +2,75 m) leidt bij een afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s tot een toename van de waterstand in het zomerbed van orde millimeters. Dit is voor scheepvaart niet significant. Het effect op het stroombeeld is afwisselend een toename dan wel een afname van de stroomsnelheid in orde van enkele cm's/s. Bij een extreem hoogwater is de verwachting dat er geen hydraulische effecten optreden.

De conclusie is dat de tussenopeningen vanuit hydraulisch en morfologisch oogpunt niet noodzakelijk zijn. Het effect van de tussenopeningen op de natuur is in deze rapportage niet beschouwd.

*Zijn de huidige langsdammen overgedimensioneerd? Kunnen ze lager?*

Tot een kruinhoogteverlaging van 1 m zijn de waterstandseffecten bij een afvoer van 2.500 m<sup>3</sup>/s beperkt tot lokaal maximaal circa 2 cm en zijn gemiddeld genomen nog kleiner. Gemiddeld neemt de afvoer door de oevergeul toe en door de hoofdgeul juist af. De sedimentatie van enkele cm's in de hoofdgeul als gevolg van aanleg van de langsdammen zal verder toenemen (dit is verder niet gekwantificeerd).

Door het verlagen van de kruin neemt de golfwerking achter de langsdam toe waardoor ook de dynamiek hier toeneemt. Voor de ecologie van de oevergeul is dat nadelig. Ook worden de oevers meer belast en treedt er mogelijk meer oevererosie op. De zichtbaarheid van de langsdammen neemt af wat de scheepvaartveiligheid nadelig beïnvloedt.

De conclusie is dat langsdammen lager kunnen maar er treden ook negatieve effecten op voor de scheepvaartveiligheid en ecologie in de oevergeul. Dit zou nader onderzocht moeten worden.

*Is een ander ontwerp van de langsdammen mogelijk?*

Uit de beschouwde optimalisaties blijkt dat een ander ontwerp mogelijk is. Gedacht moet worden aan:

- lagere kruinhoogte: de hydraulische en morfologische effecten van een kruinhoogteverlaging tot 1 m lijken beperkt. Wel treden er negatieve effecten op voor scheepvaartveiligheid (verhoogde kans op aanvaring vanwege verminderde zicht) en ecologie (afname luwte effect van de langsdam) in de

oevergeul. Door de toename van de overstromingsfrequentie neemt de kans op begroeiing op de langsdam af al lijkt dat in de huidige situatie mee te vallen (zie paragraaf 2.6).

- verticale wand: in plaats van taluds kunnen ook verticale wanden worden toegepast. Wel moet rekening gehouden worden met een toename van de golfreflectie aan de zijde van de vaargeul wat mogelijk hinderlijk is voor de scheepvaart. Mogelijk dat een verticale wand alleen aan de oevergeulzijde toegepast kan worden. Voordeel van een damwand is dat het een dichte constructie is waardoor er geen wateruitwisseling mogelijk is bij waterstanden tot onder de kruin van de dam. Hierdoor wordt het opstuwend effect bij een lage afvoer groter, wat positief is voor de scheepvaart. Een langsdam bestaande uit damwanden heeft minder onderhoud nodig dan een breukstenen dam.
- verlagen van de doorlatendheid: beperken van de doorlatendheid door toepassing van een scherm of door een lagere porositeit van het materiaal zorgt voor een grotere opstuwning van de waterstand, wat gunstig is voor de scheepvaart en in zeer beperkte mate ook voor de zoetwaterbeschikbaarheid.
- zonder tussenopeningen: tussenopeningen blijken niet noodzakelijk omdat het effect op de hydraulica en morfologie klein is.
- instroomdrempel: de hydraulische weerstand van de oevergeul bepaalt het verhang tussen beide geulen. Met de dimensies van de instroomdrempel kan de afvoerverdeling tussen beide geulen geregeld worden. Uit berekeningen blijkt dat er bij Ophemert relatief veel afvoer door de oevergeul stroomt. Verkleining van de instroomopening hier kan dit effect mitigeren. Uit onderzoek van Zagonjoli (2017) blijkt dat het verkleinen van de instroomopening het meest effectief is als de drempelhoogte uniform over de lengte van de instroomopening verhoogd wordt. Uit experimenteel onderzoek van Ruijsser (2019) naar het effect van verschillende vormen van de instroomopening blijkt dat een in benedenstroomse richting aflopende hoogte van de instroomdrempel leidt tot de meeste morfodynamiek. Of dit ook wenselijk is voor de ecologische en recreatie scheepvaart functie zal dan ook moeten worden beschouwd en is maatwerk.
- oevergeul: er geldt hoe groter de dimensies van de oevergeul des te meer afvoer onttrokken wordt aan de hoofdgeul. Bij waterstanden tot aan de kruin wordt de afvoer door de oevergeul bepaald door weerstand van de oevergeul en de grootte van de instroomopening. Daarom dienen deze in samenhang ontworpen te worden. Zodra de langsdam overstroomt neemt het belang van de instroomopening sterk af. De dimensies van de oevergeul worden verder bepaald door de eisen en wensen die gesteld worden aan de functies hoogwaterveiligheid, recreatievaart en ecologie.
- horizontale ontwerp van de instroomopening: in plaats van een zijdelingse instroomopening kan in het geval van kribben ook gekozen worden voor een instroomopening die haaks op de stroming staat bijvoorbeeld door het (gedeeltelijk) verlagen van een bestaand krib. Naar verwachting is dan een kleinere opening nodig ten opzichte van een zijdelingse variant. Hiervan zijn geen Delft3D berekeningen uitgevoerd.



# 6

## REFERENTIES

Asselman, N. & P. de Grave (2021), Effect van langsdammen op waterveiligheid. Rapport Deltares, 11204644-008-ZWS-0001, Delft, concept februari 2021.

Buijse, T., E. Mosselman, J.S. de Jong & M. Weeber (2019), Plan van aanpak voor analyse van de pilot langsdammen Waal. Rapport 1210432, Deltares, Delft, juni 2019, gereduceerde versie zonder financiële ramingen.

Collas, F.P.L., R. van Aalderen, F. Bosman, M.M. Schoor, L.N.H. Verbrugge, N. van Kessel, W. Romeijn, B. Achterkamp, W. Liefveld, A.D. Buijse & R.S.E.W. Leuven (2021), Rapportage natuurgegevens langsdammen Waal 2016 – 2019. Rapport Radboud Universiteit, Rijkswaterstaat, Sportvisserij Nederland, Hengelsport Federatie Midden Nederland, Deltares, Bureau Waardenburg en Universiteit Twente, Reeks Verslagen Dierecologie en Fysiologie Radboud Universiteit, Nijmegen.

De Ruijsscher, T.V., A.J.F. Hoitink, S. Naqshband & A.J. Paarlberg (2019), Bed morphodynamics at the intake of a side channel controlled by sill geometry. *Advances in Water Resources*, Vol.134, 103452, doi:10.1016/j.advwatres.2019.103452

De Ruijsscher, T.V., B. Vermeulen & A.J.F. Hoitink (2020), Diversion of flow and sediment towards a side channel separated from a river by a longitudinal training dam. Submitted to: *Advances in Water Resources*.

Huthoff, F., A. Paarlberg, H. Barneveld & M. van der Waal (2011). Rivierkundig onderzoek WaalSamen. Pilotstudie Langsdammen. HKV Lijn in Water, PR2096.10

Jong, J.S. de, V. Chavarrias, W. Ottevanger (2021). Longitudinal Training Walls. WP0: Data-analyses. Deltares report 11204644-018-ZWS-0001, concept februari 2021.

Paarlberg, A.J. & A.Y.A. Omer (2021), Final evaluation longitudinal training walls: Delft3D simulations (WP1). Report HKV Lijn in Water & Deltares, PR4153.10 (HKV), 11204644 (Deltares), Delft, concept februari 2021.

Sieben, A. (2020), Overzicht afvoermetingen 2016-2019 project monitoring langsdammen d.d. 07-02-2020

Van der Vat, M. (2021), Effect van langsdammen op zoetwatervoorziening. Rapport Deltares, 11204644-011-ZWS-0001, Delft, concept februari 2021.

Van der Wijk, R. & R. van der Mark (2021), Evaluatie pilot langsdammen – Functie Vaarweg (WP7). Rapport Deltares, 11204644, Delft, concept februari 2021.

Zagonjoli (2017), Lowering the flow behind the longitudinal dams. Hydraulic effect of measures. Rapport Deltares, 11200536-015-ZWS-0003 40, Delft, final december 2017.



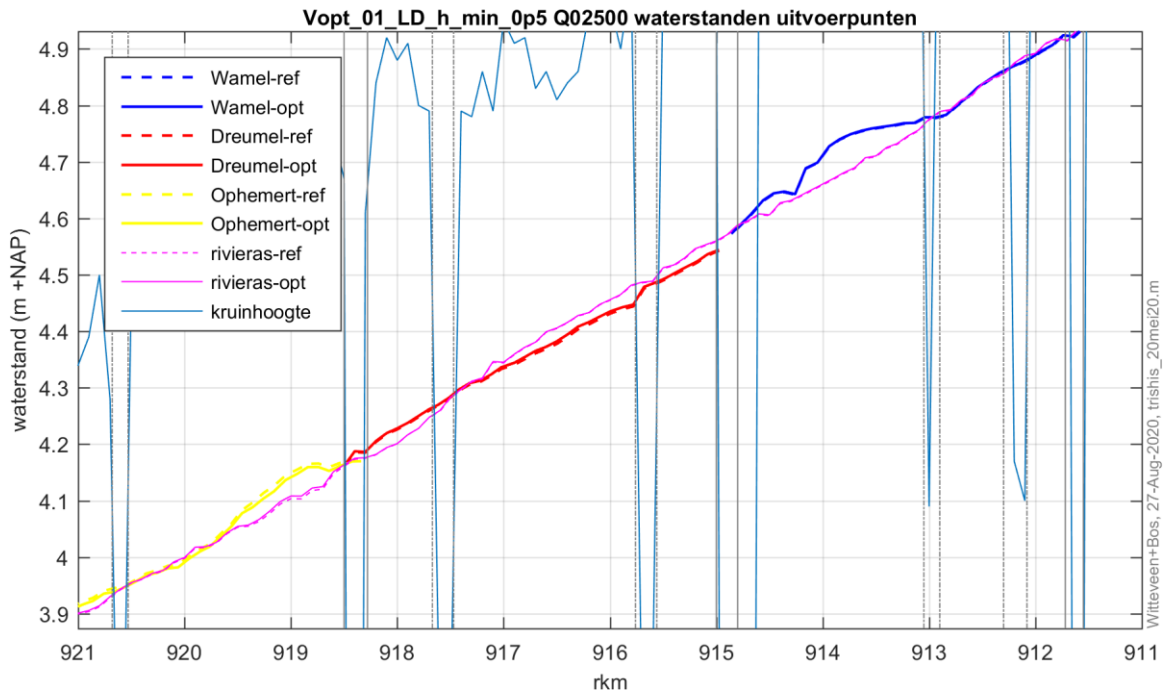
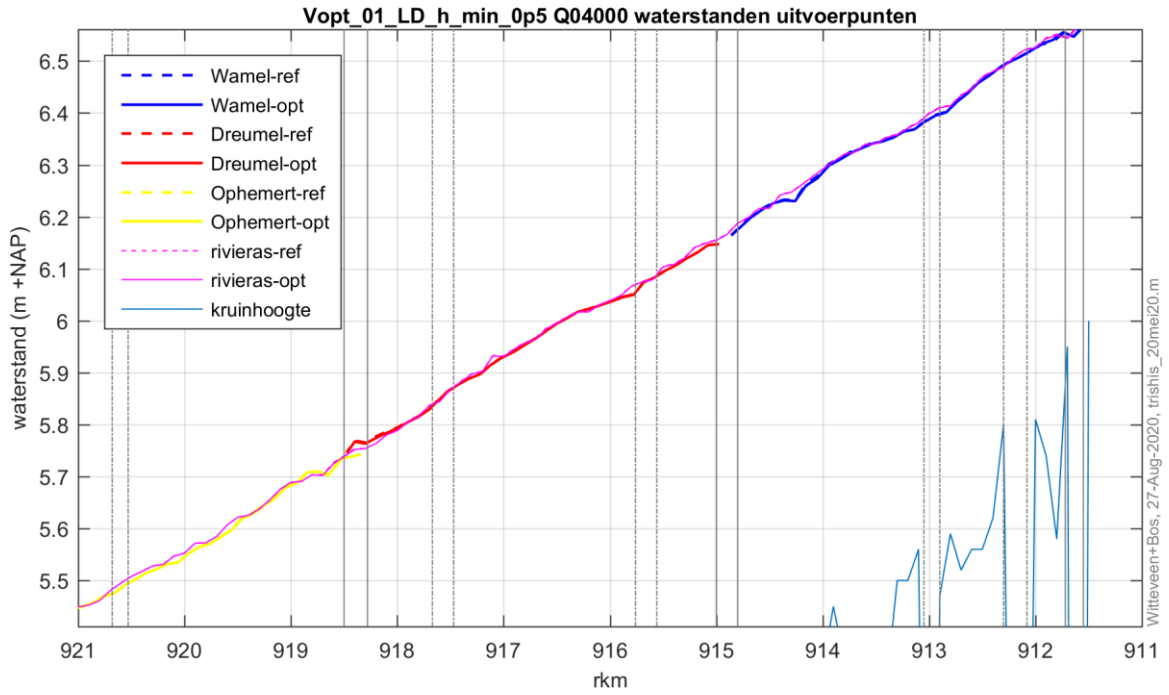
Bijlage(n)

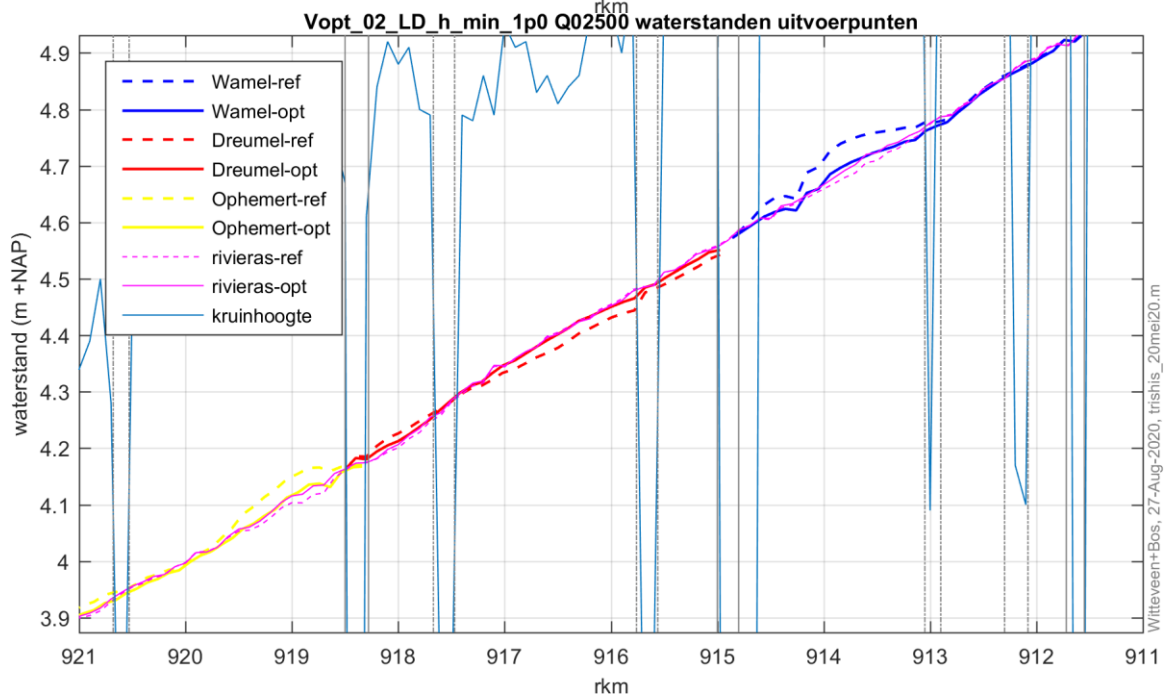
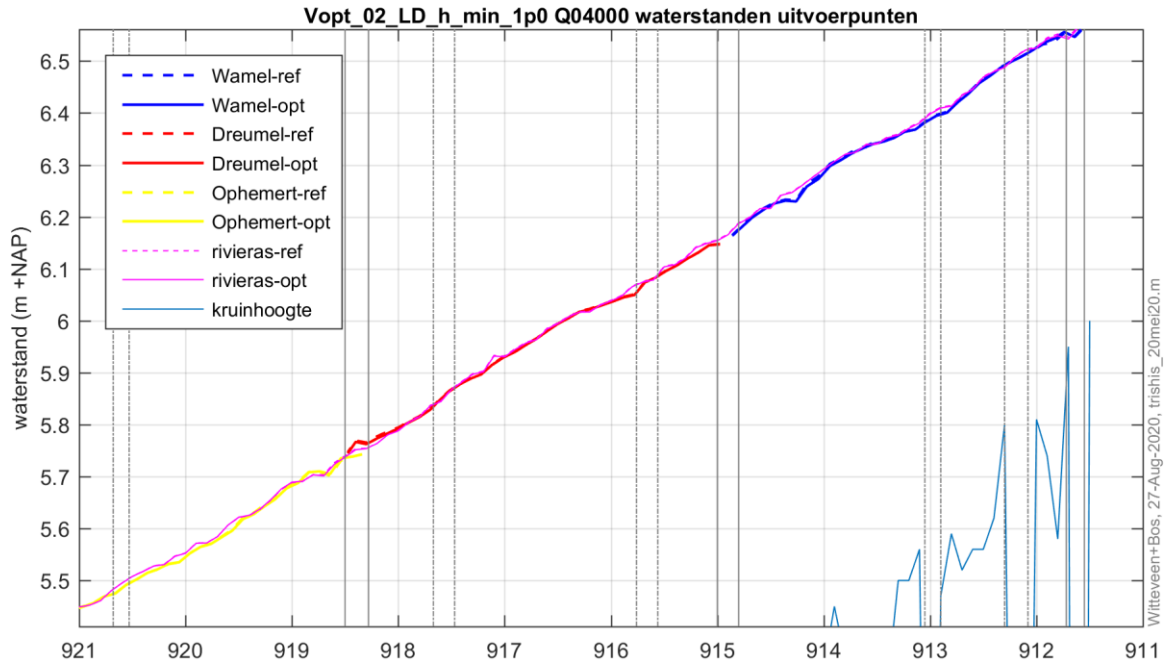


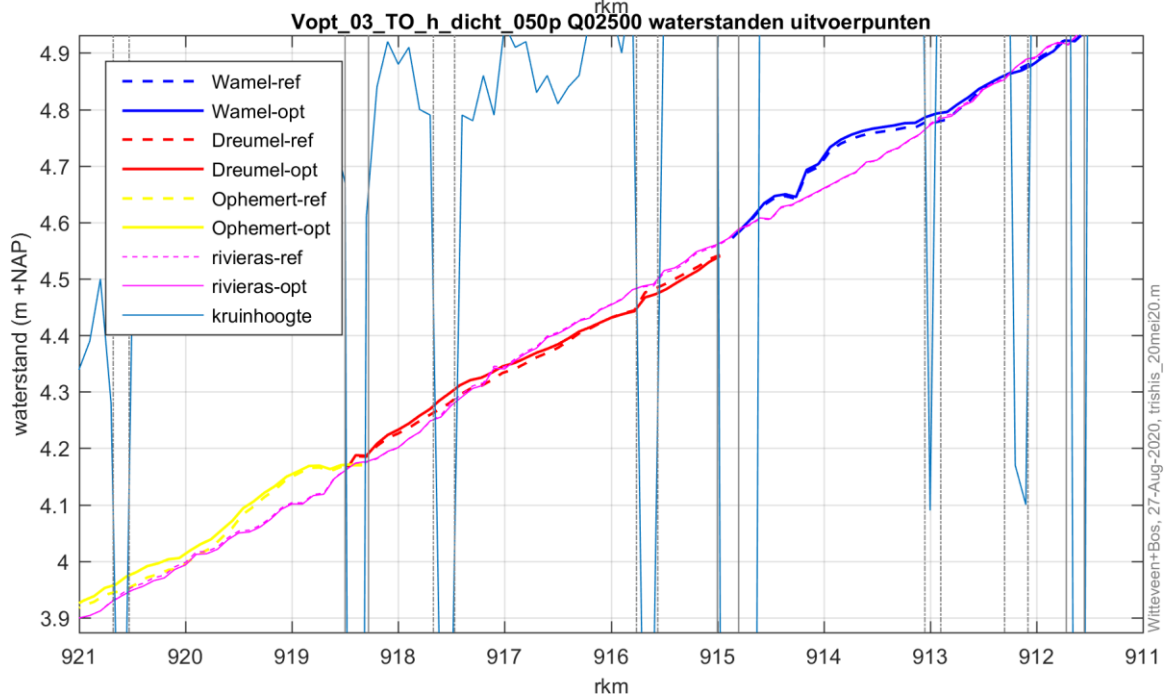
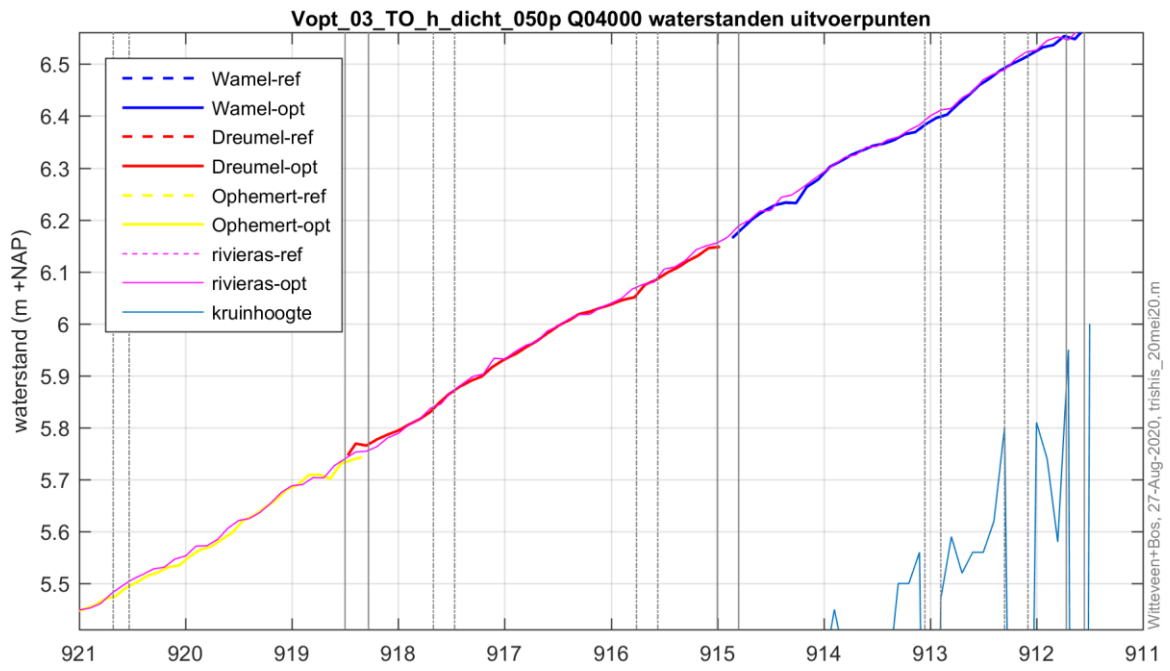


## BIJLAGE: VERHANGLIJNEN

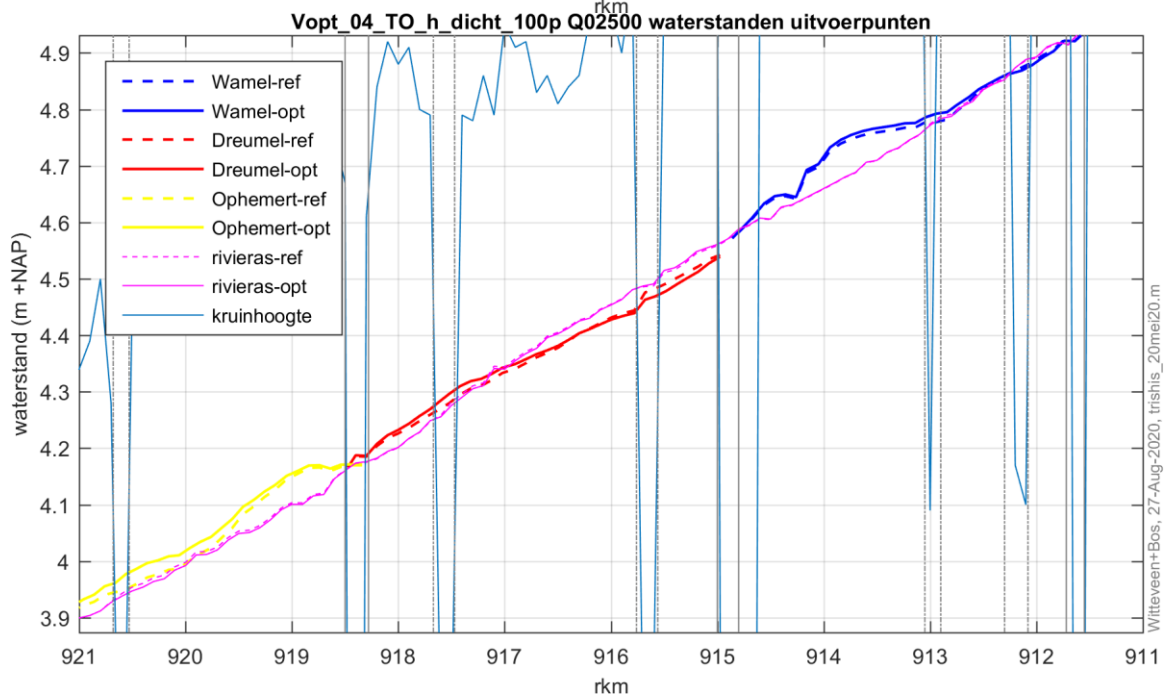
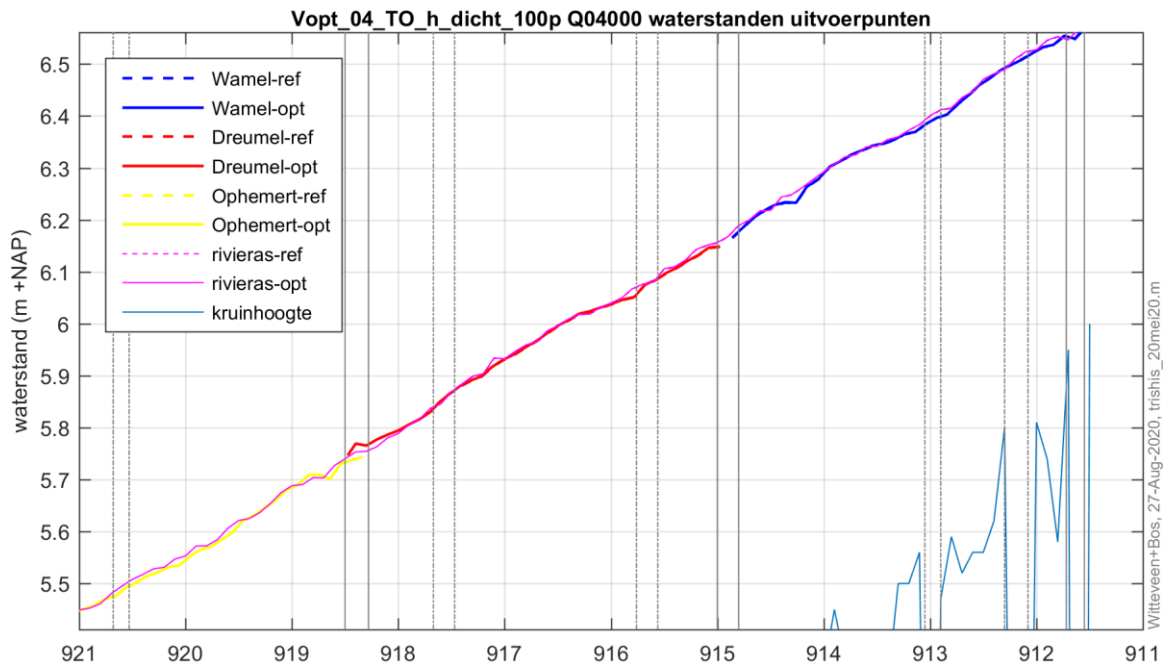
Verhanglijnen



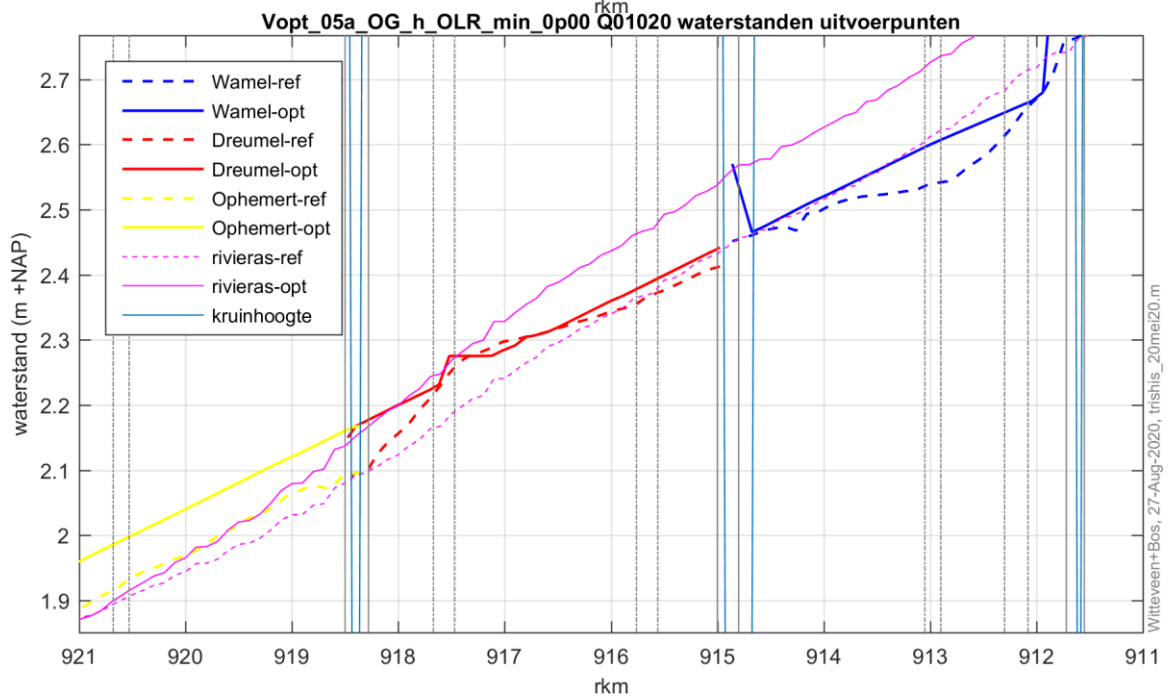
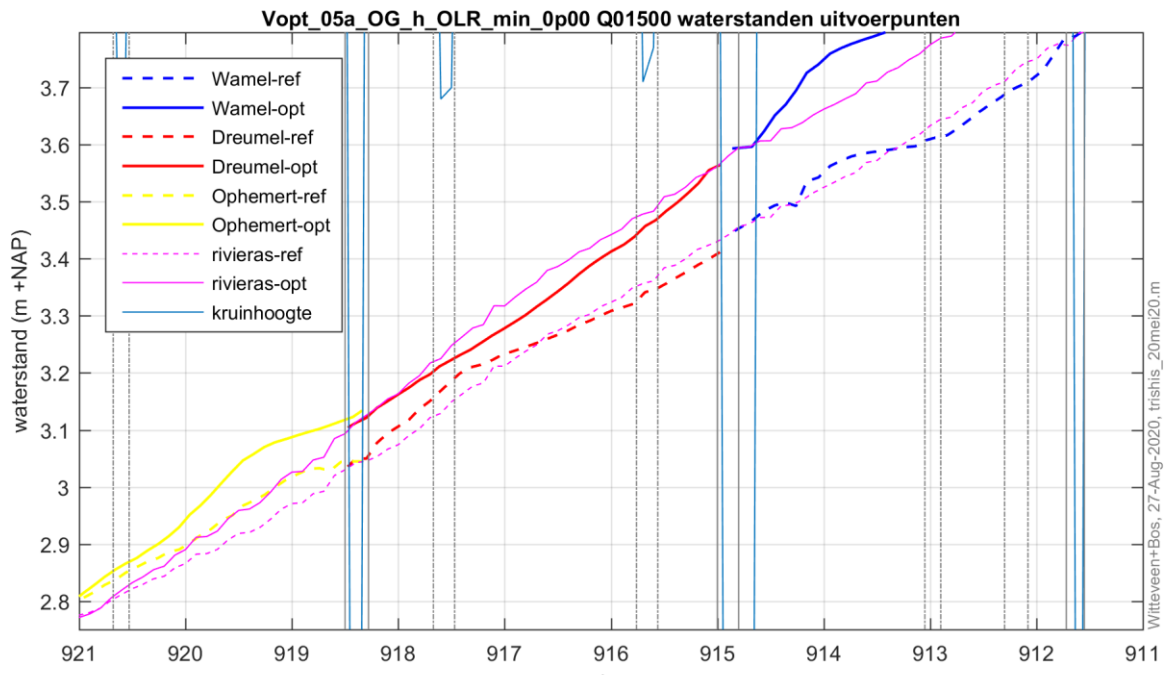


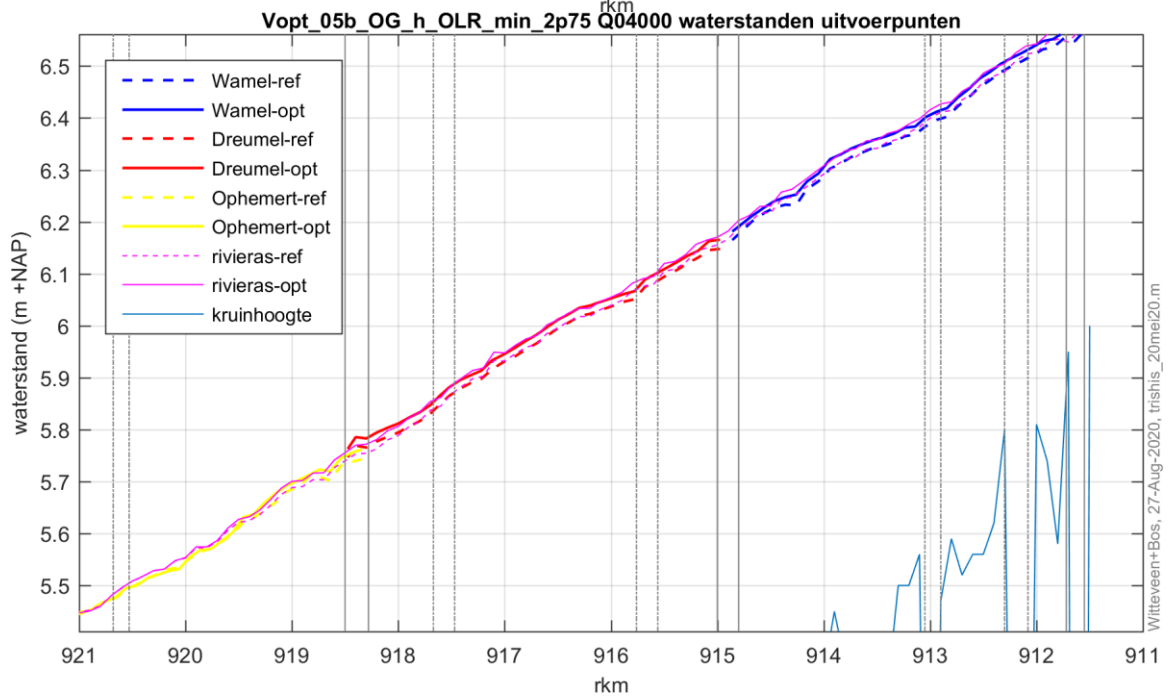
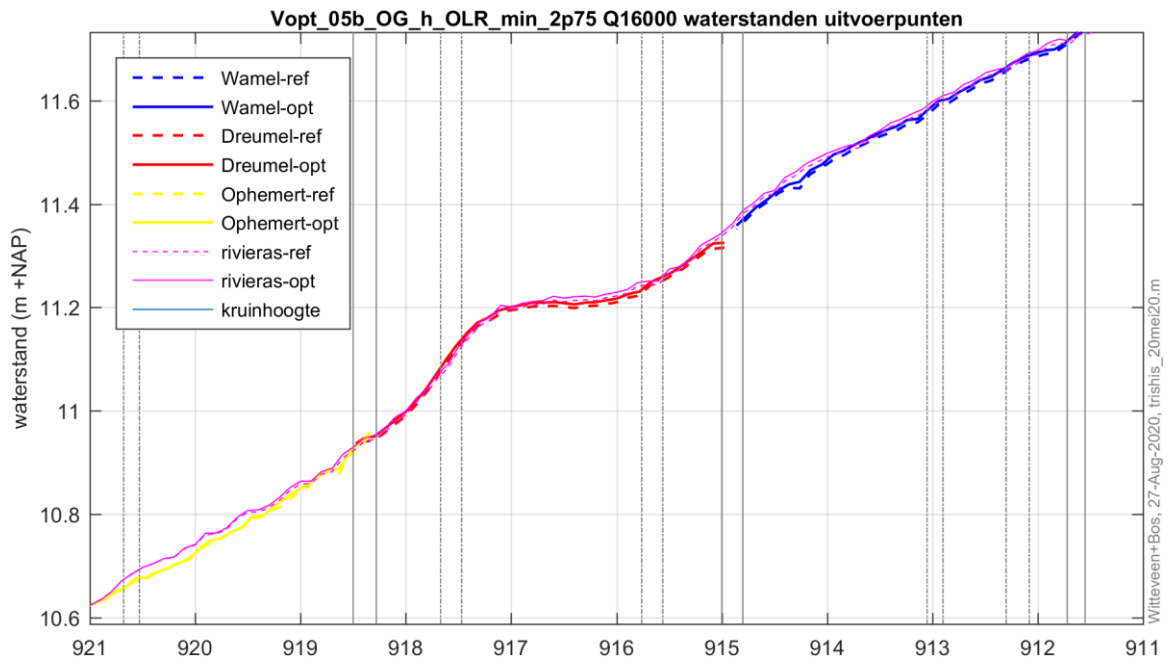




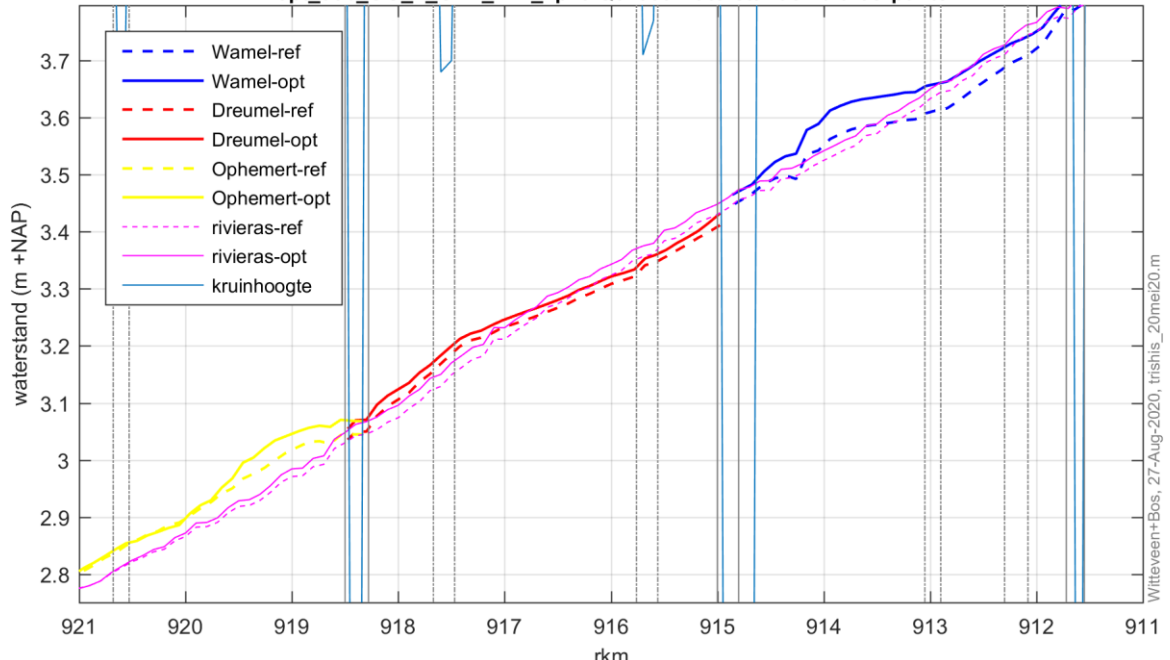




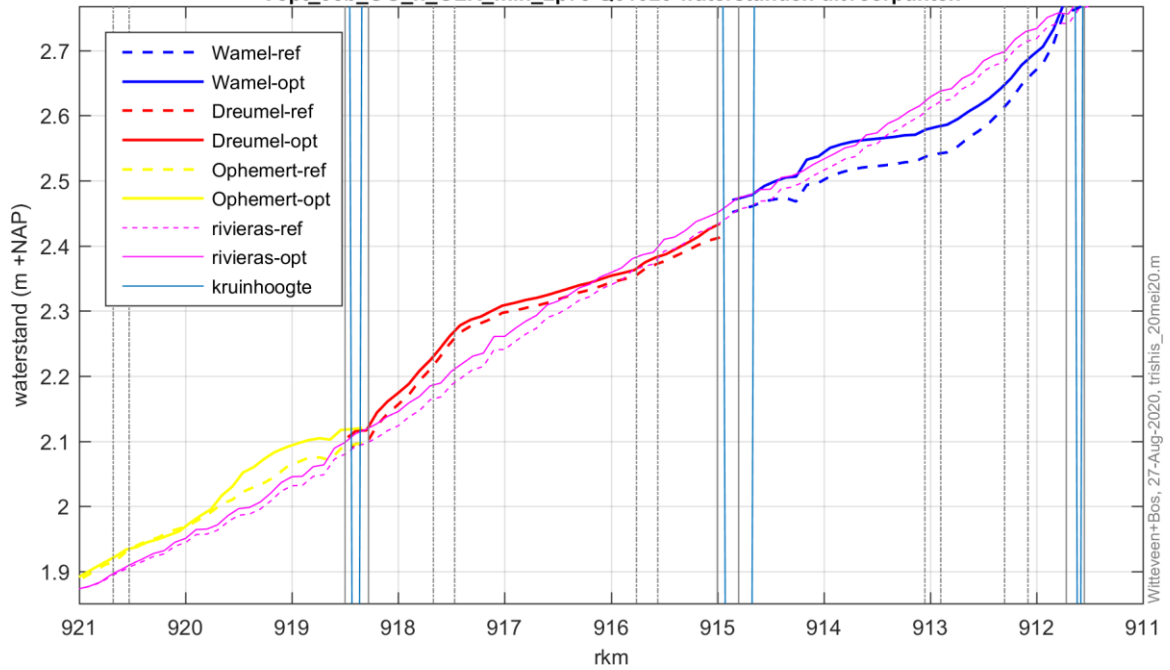


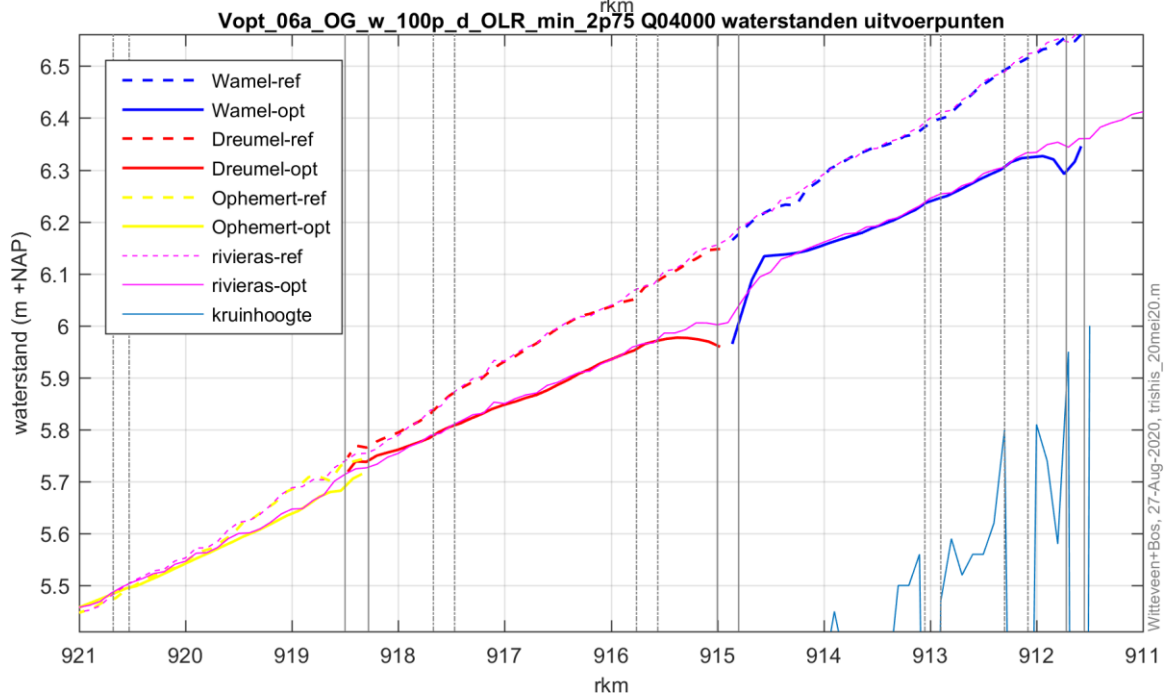
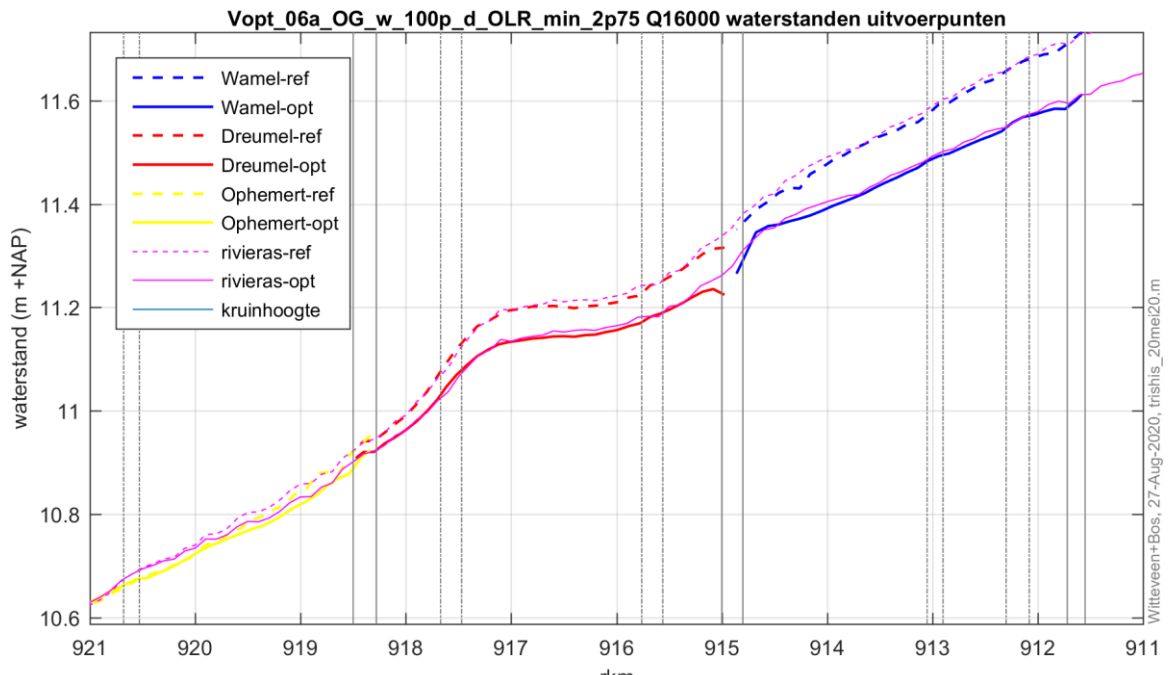


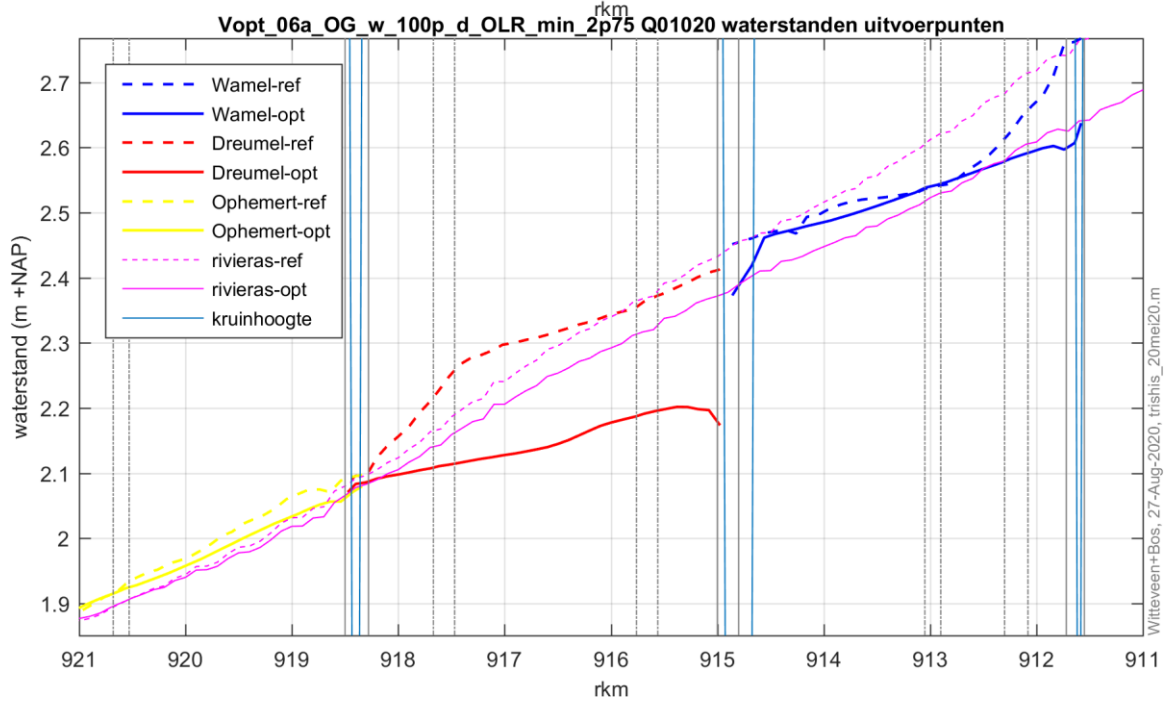
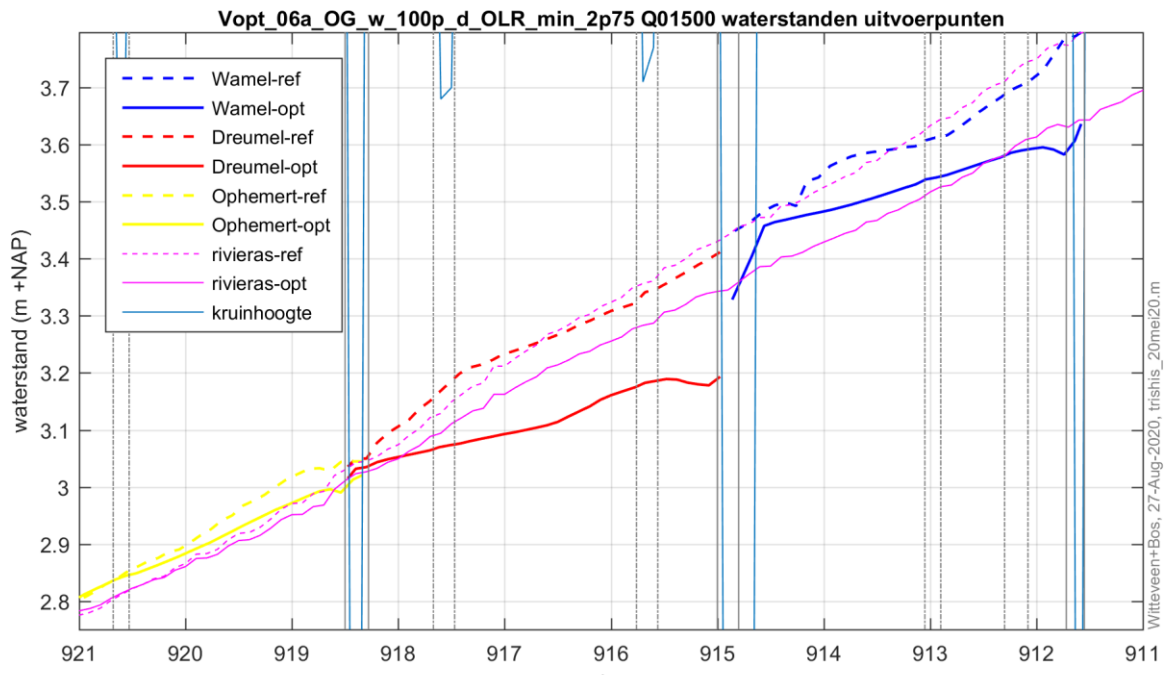
Vopt\_05b\_OG\_h\_OLR\_min\_2p75 Q01500 waterstanden uitvoerpunten

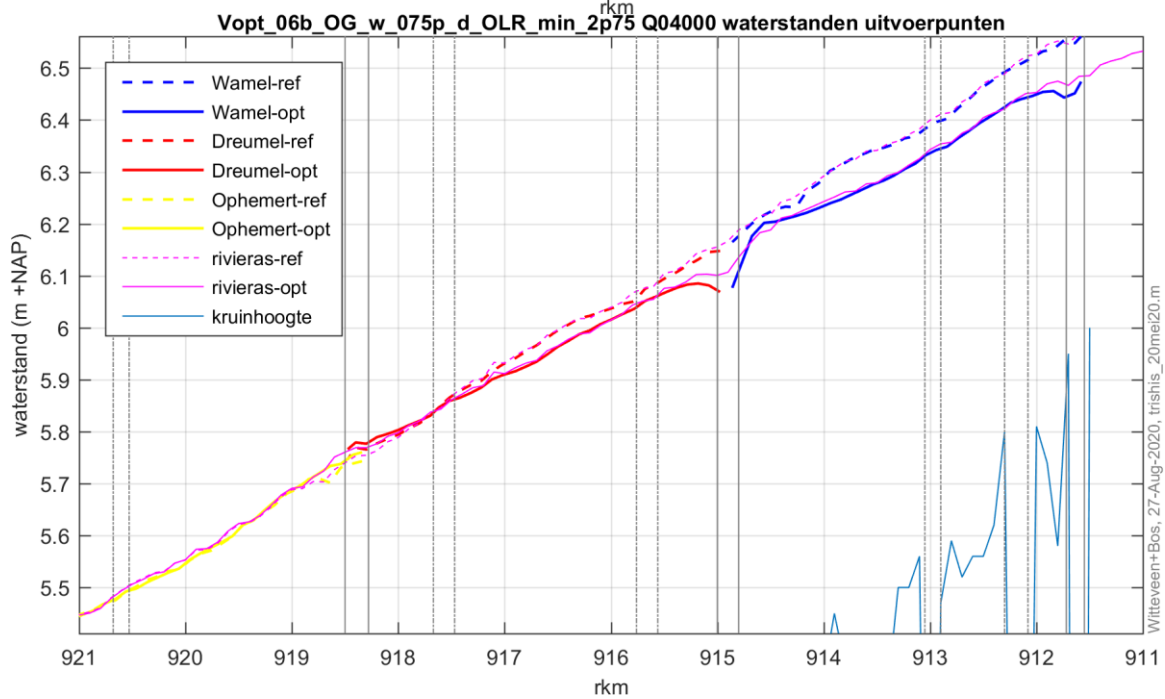
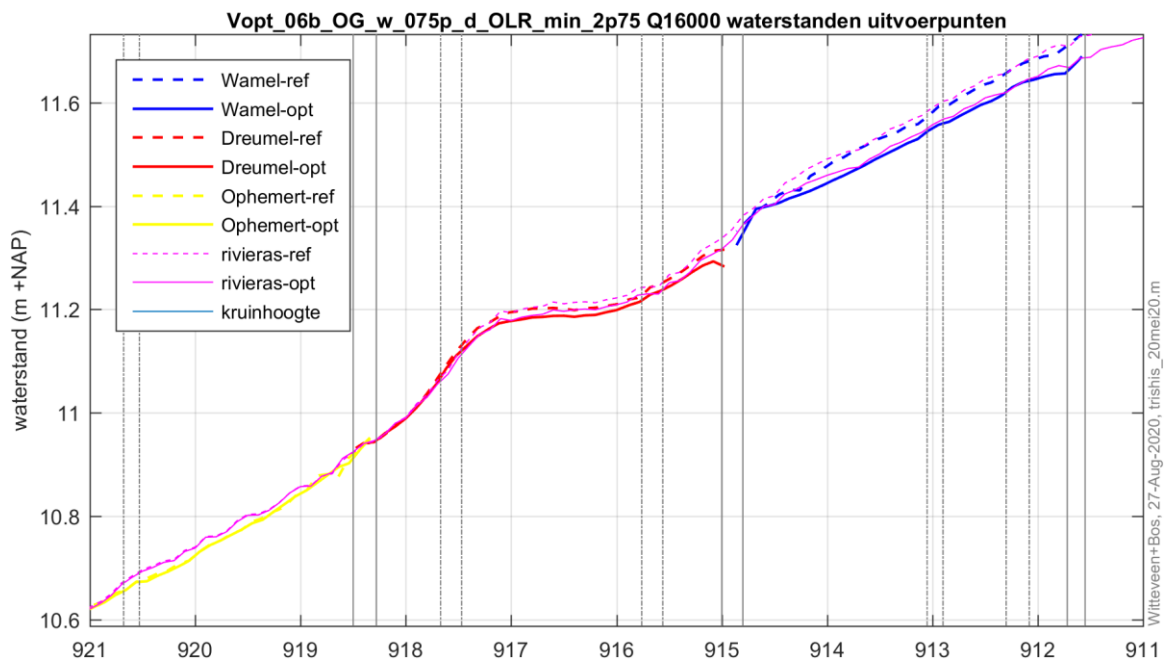


Vopt\_05b\_OG\_h\_OLR\_min\_2p75 Q01020 waterstanden uitvoerpunten

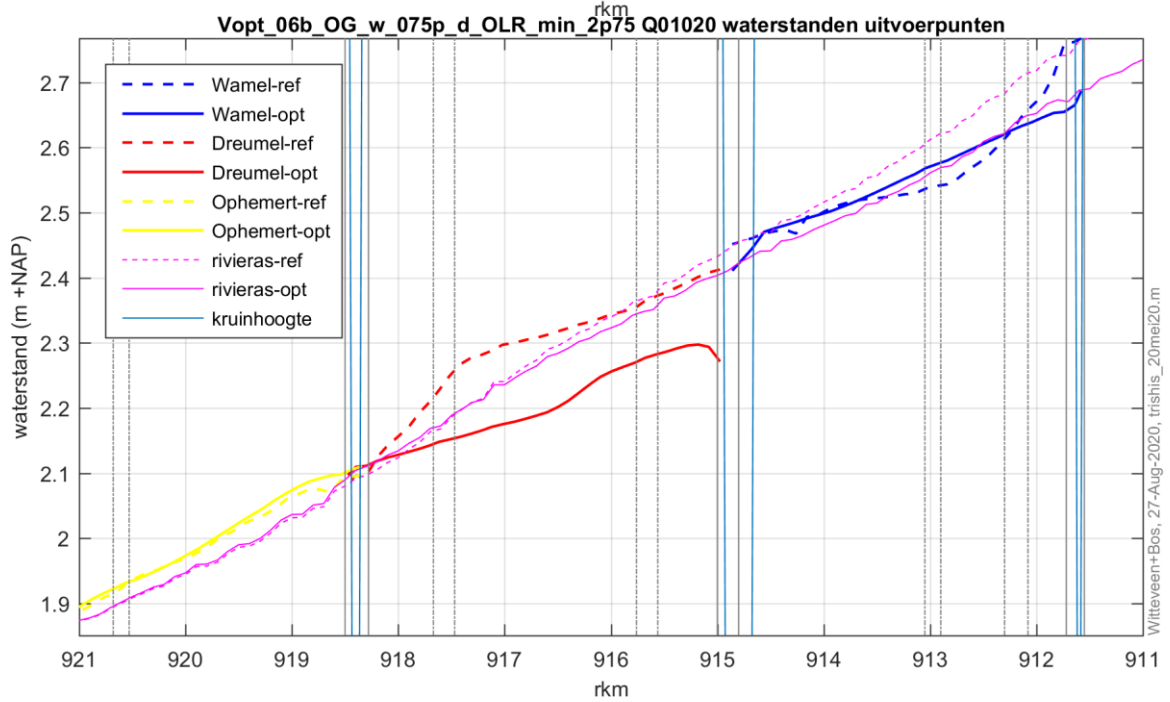
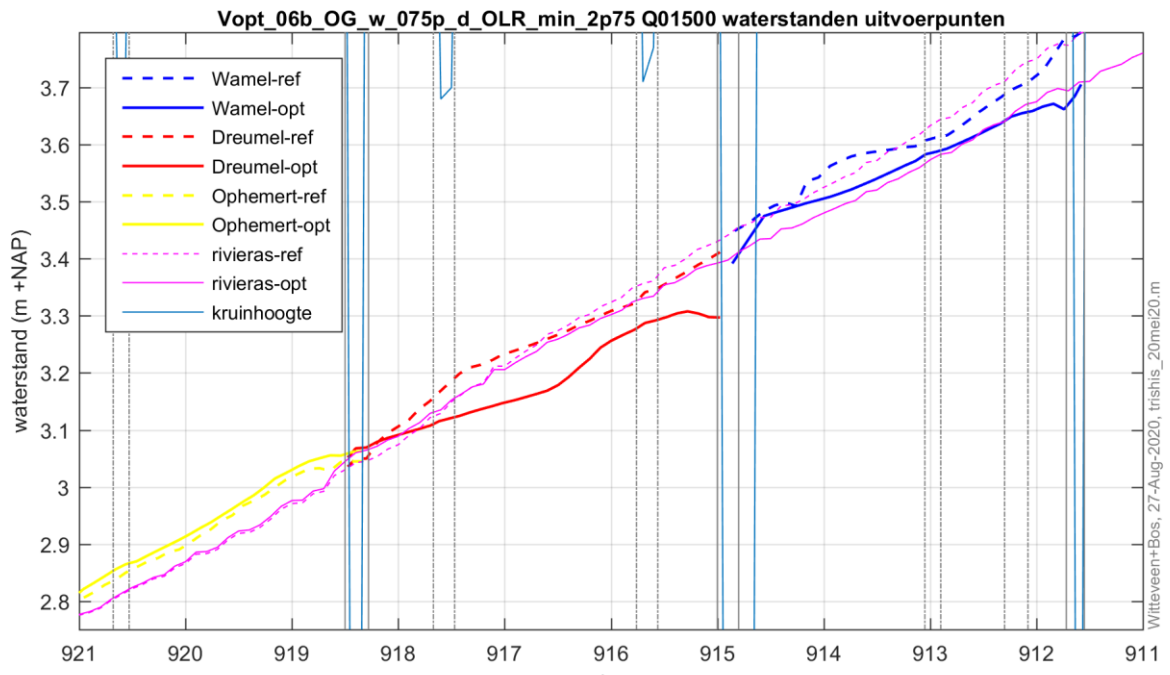


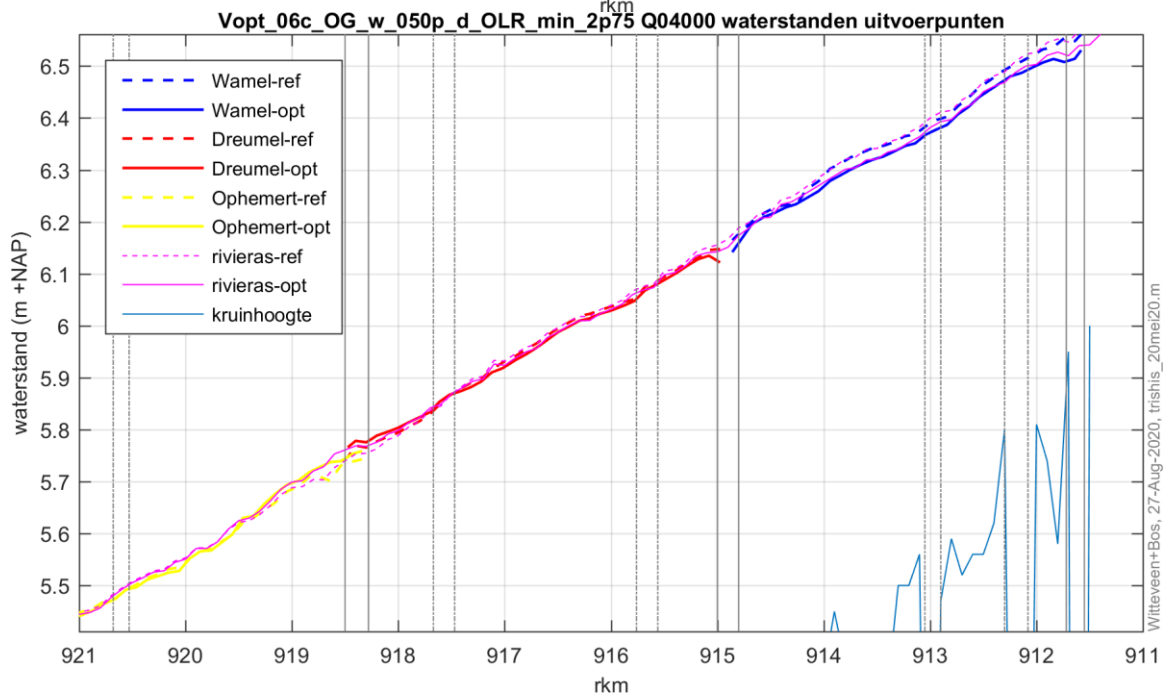
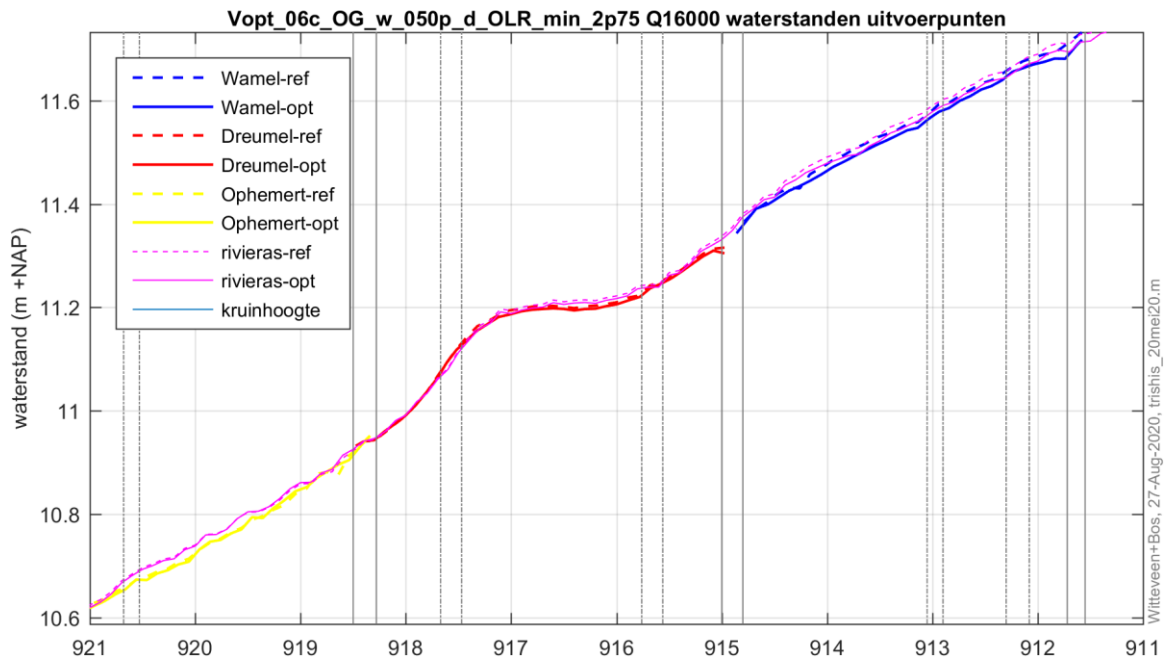


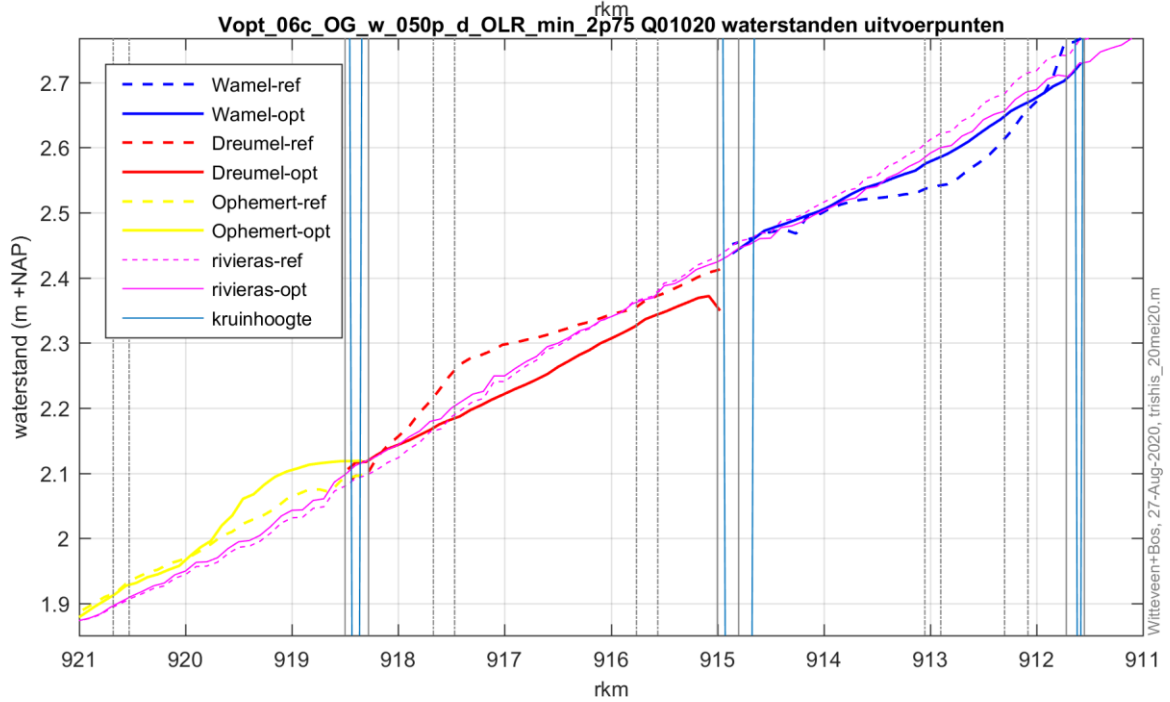
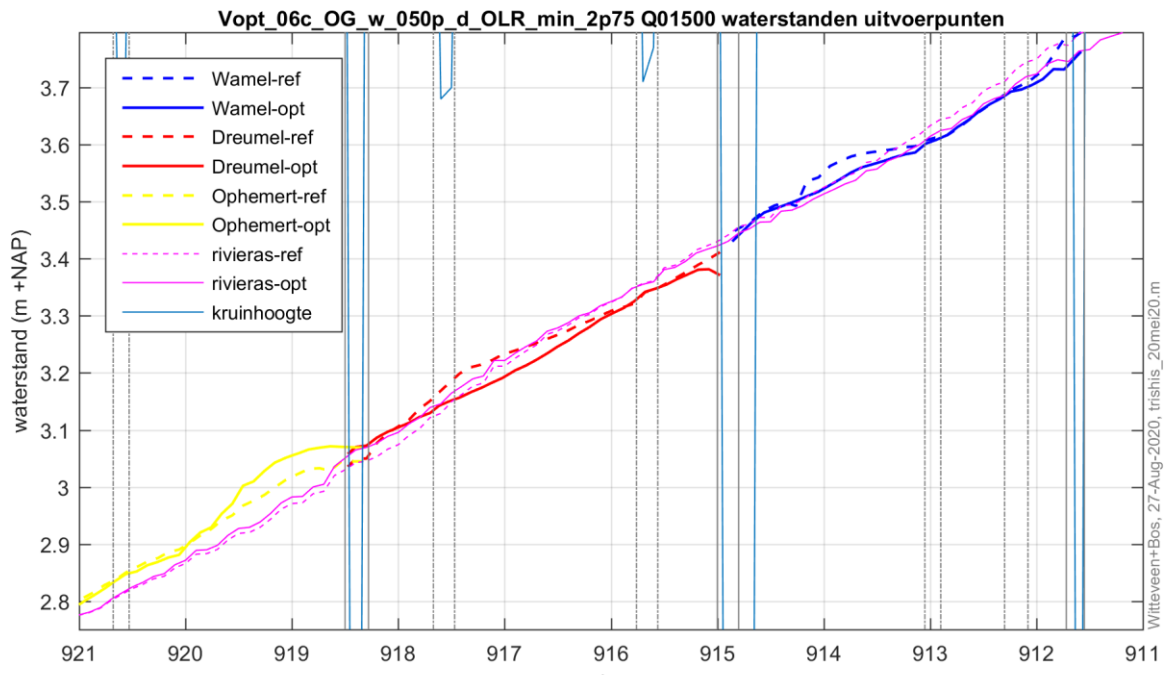


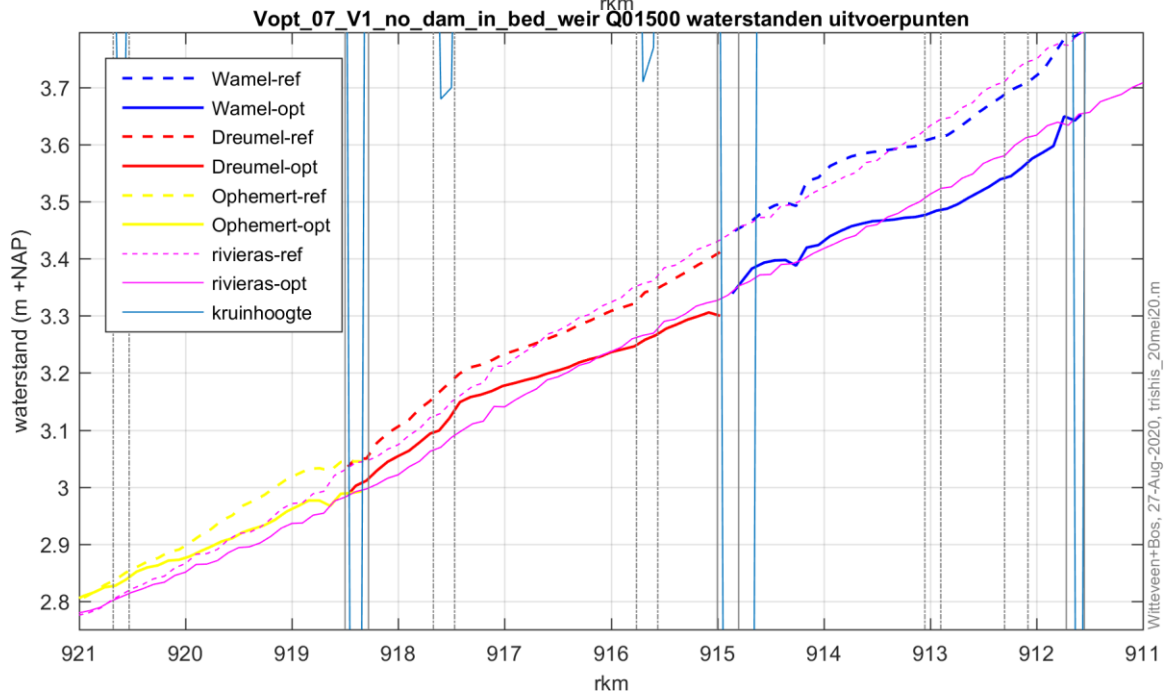
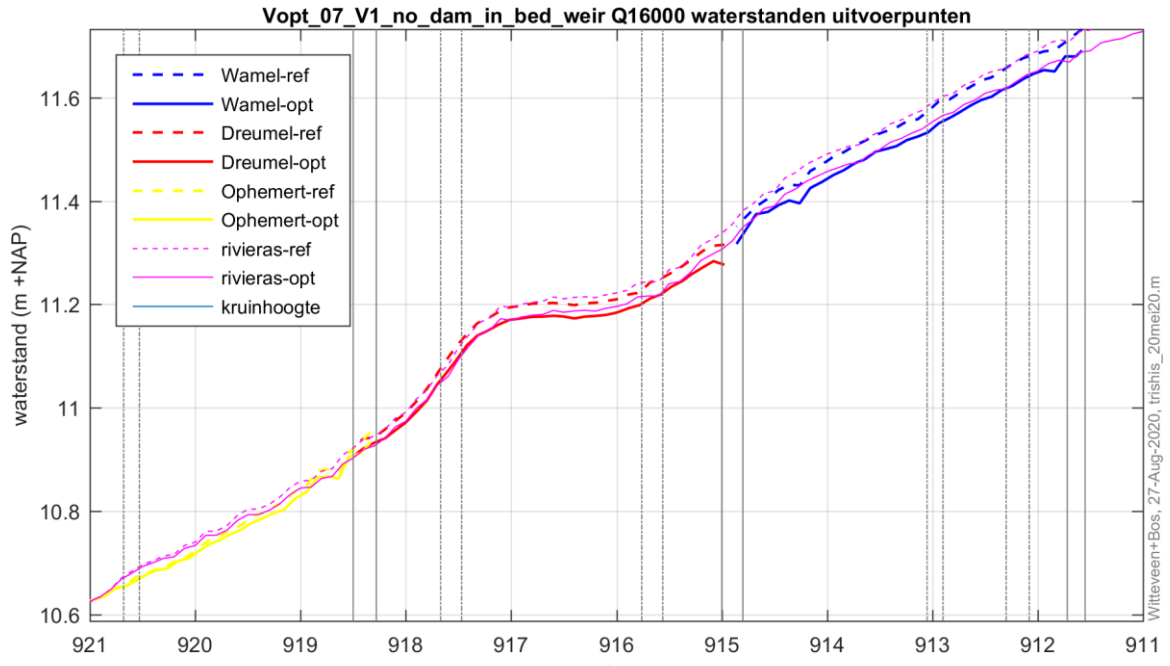




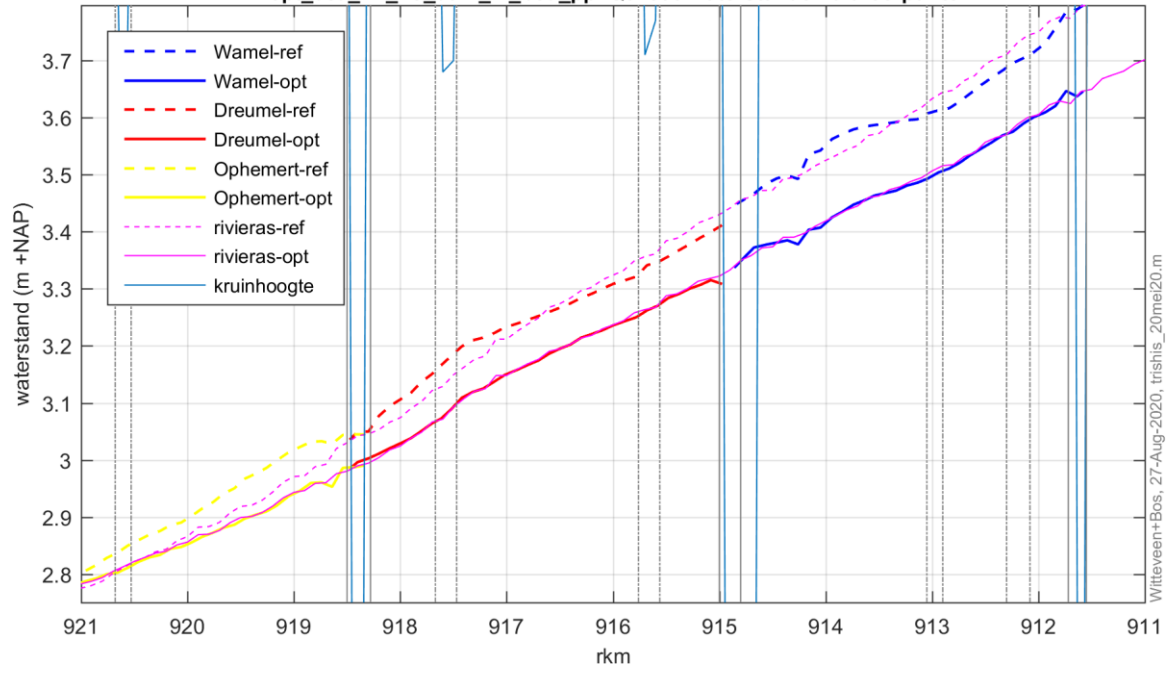








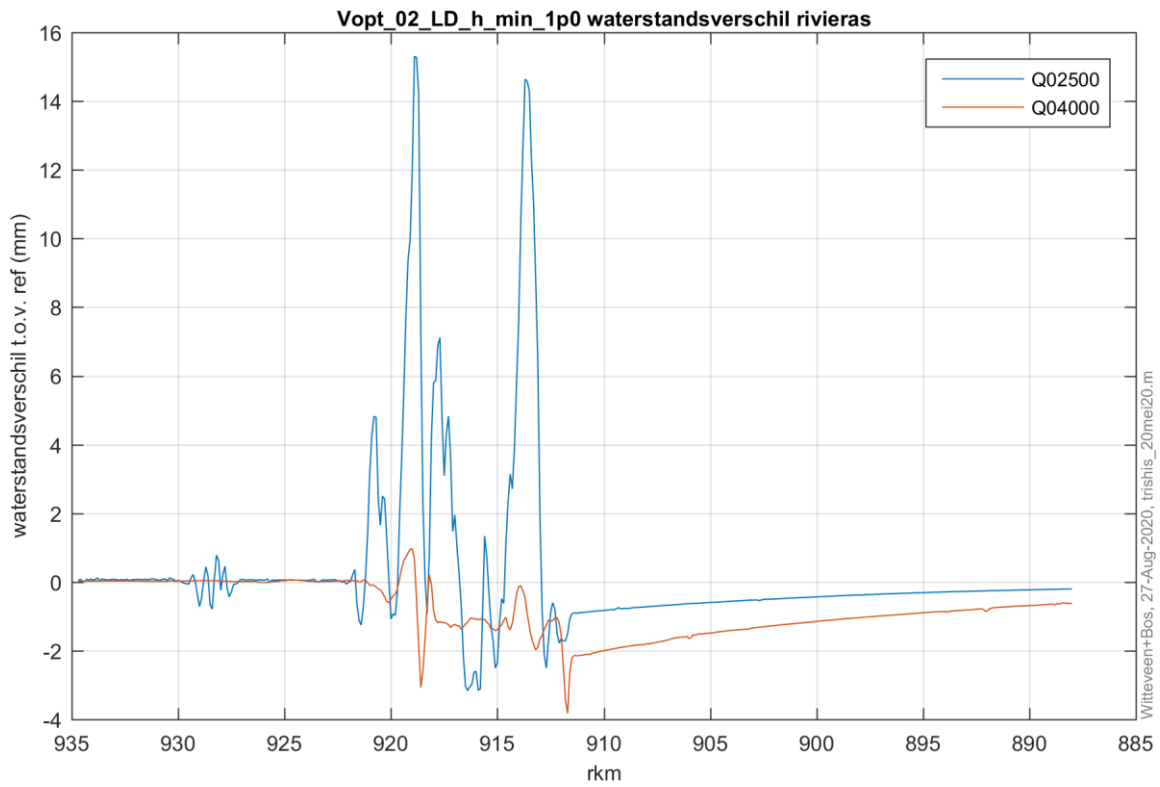
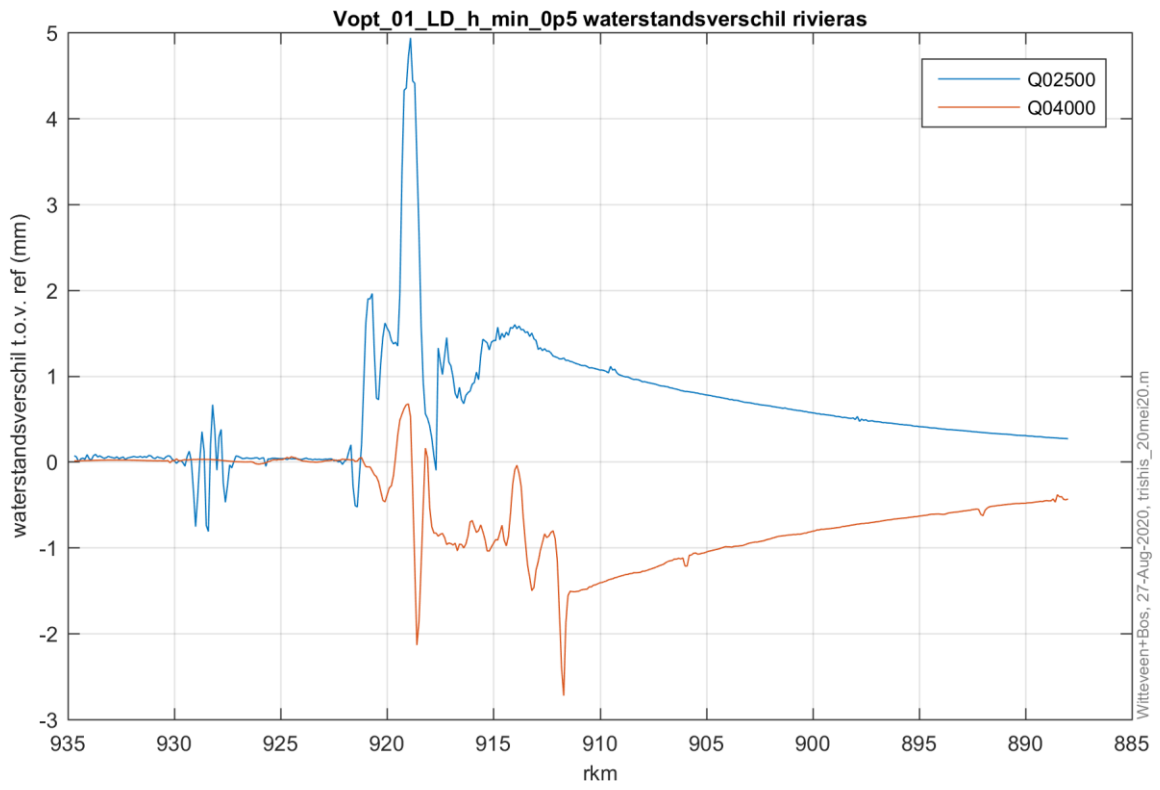
Vopt\_08a V1 no\_dam\_in\_bed\_ppl Q01500 waterstanden uitvoerpunten



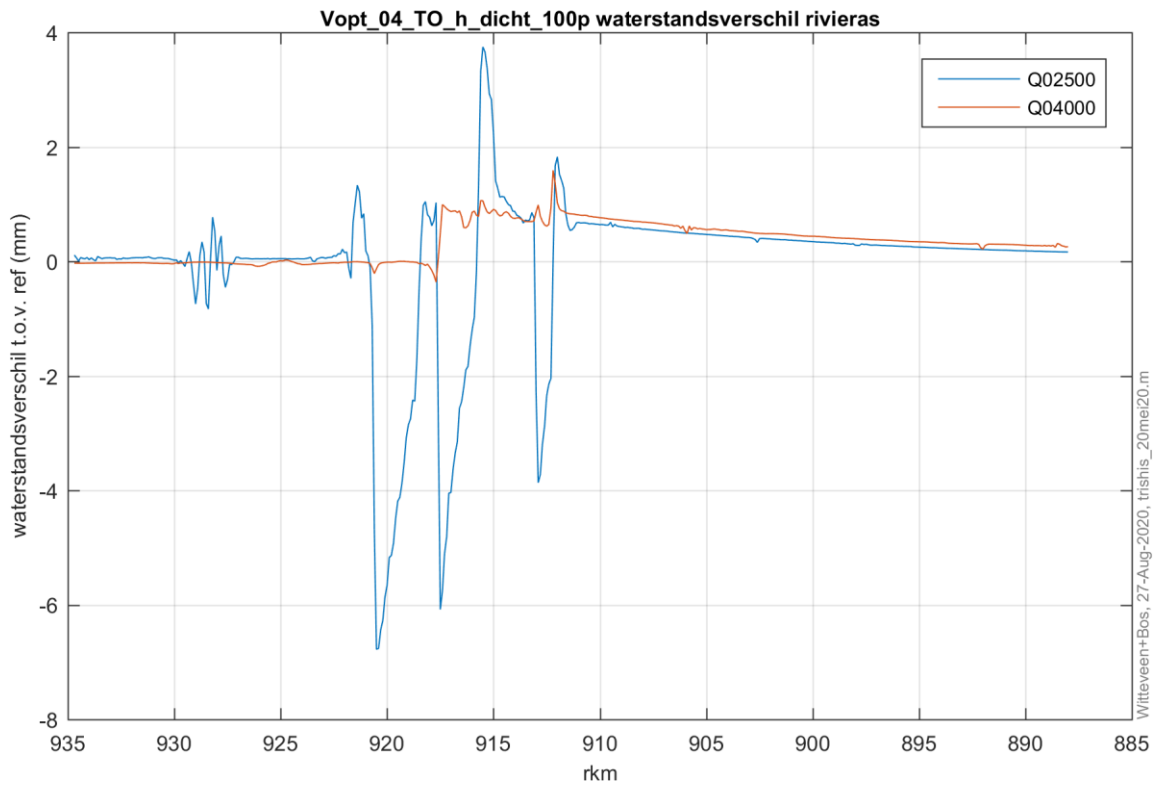
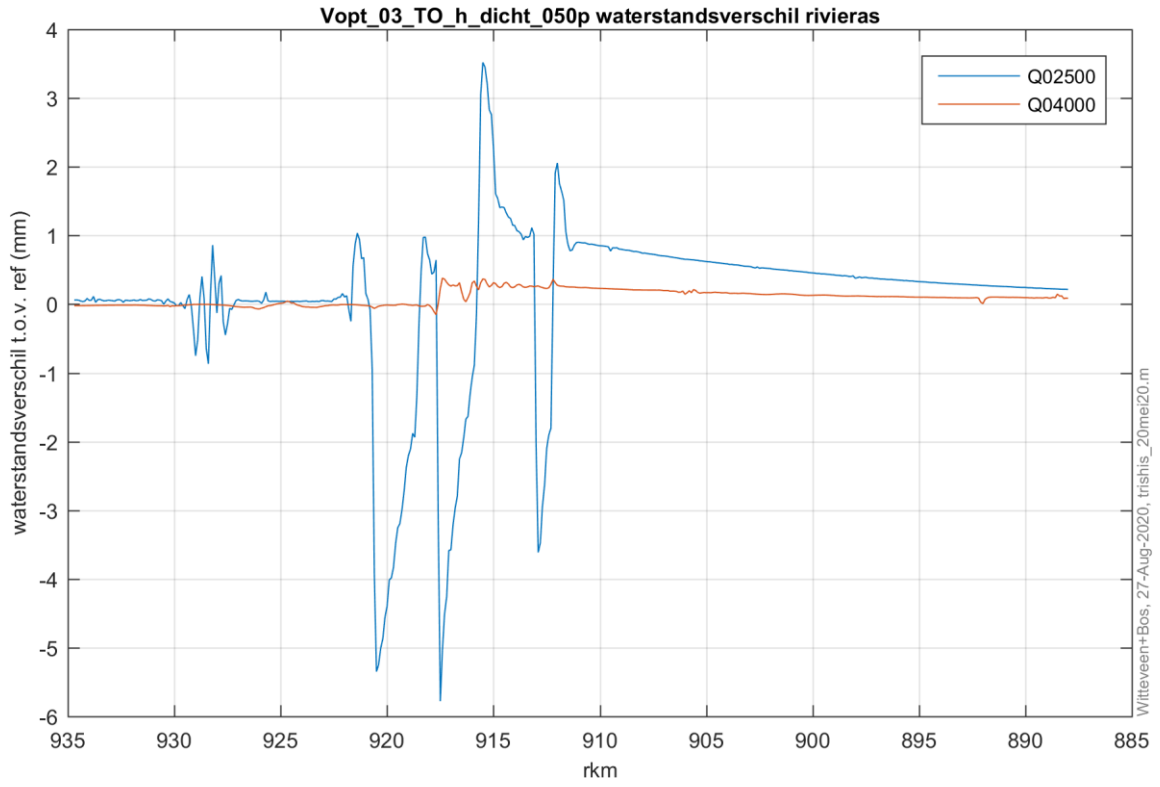


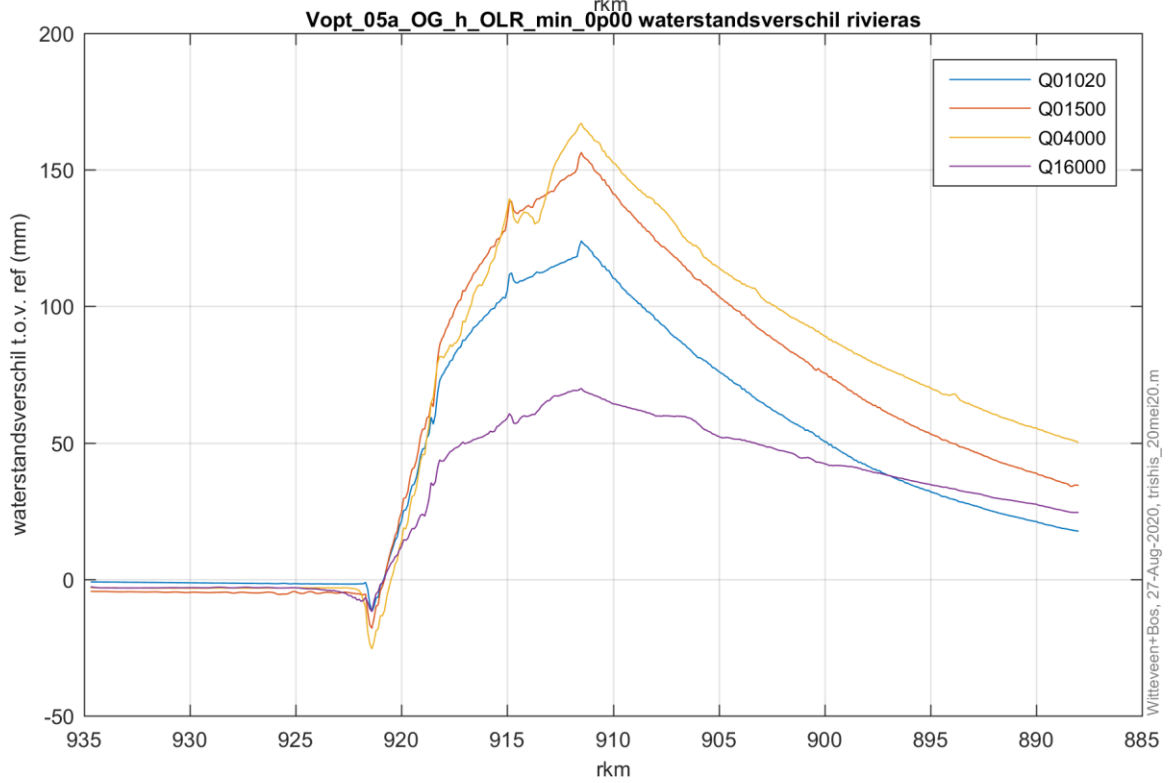
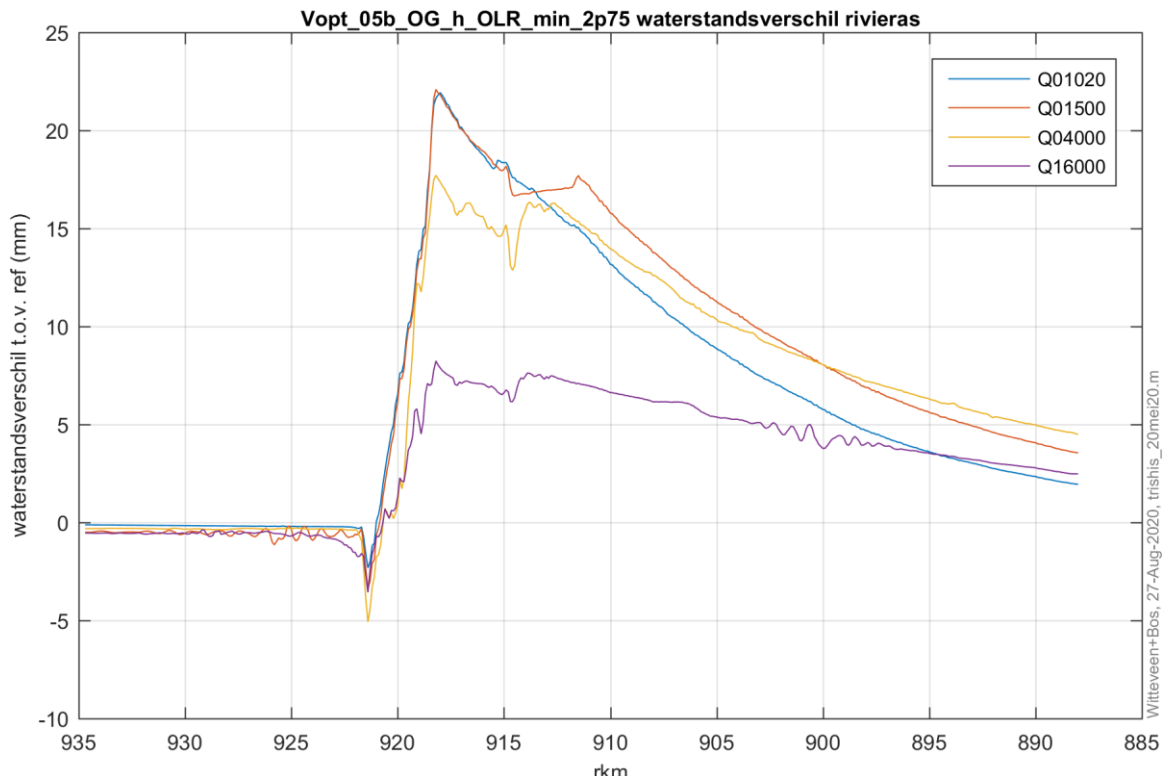


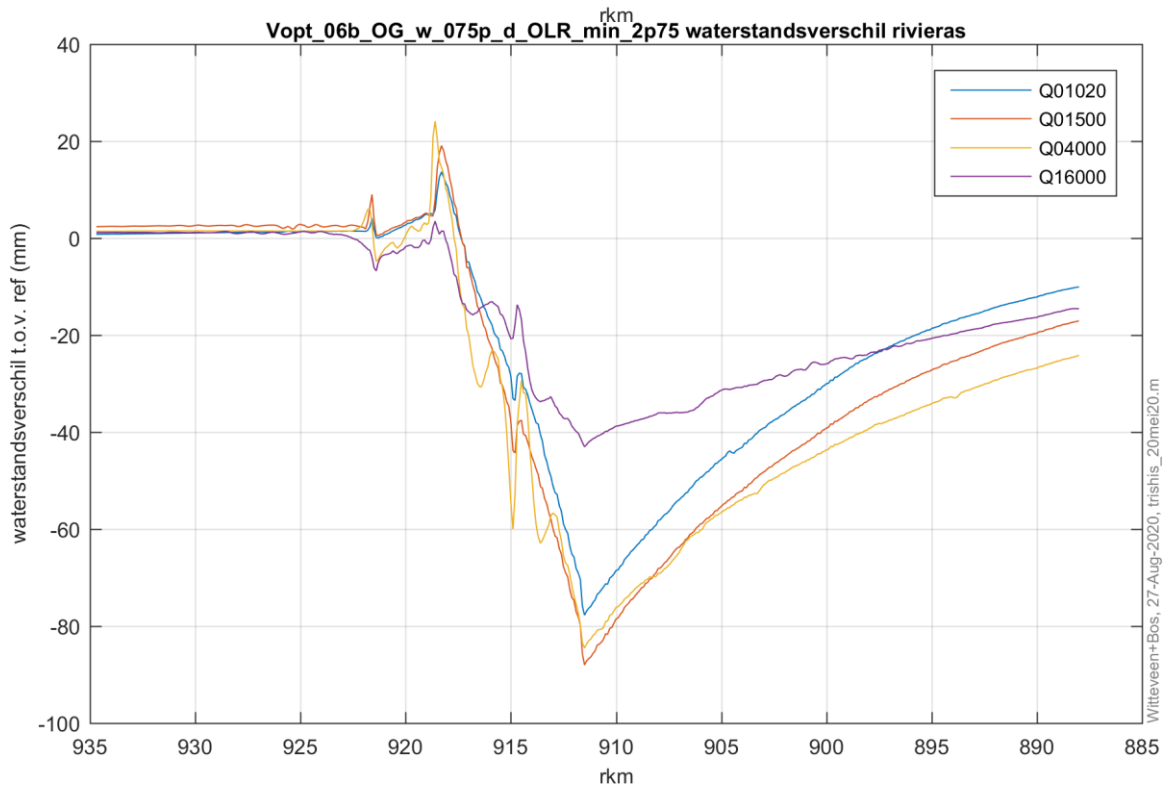
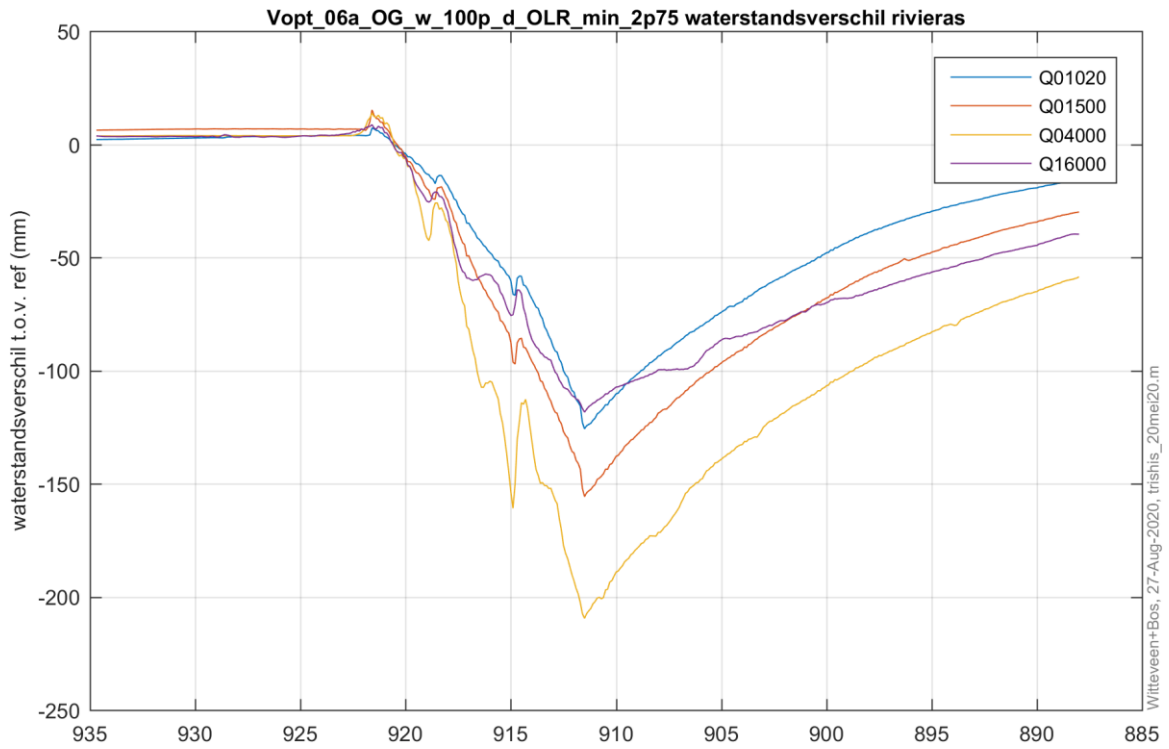
## BIJLAGE: WATERSTANDSVERSCHILLEN OP RIVIERAS



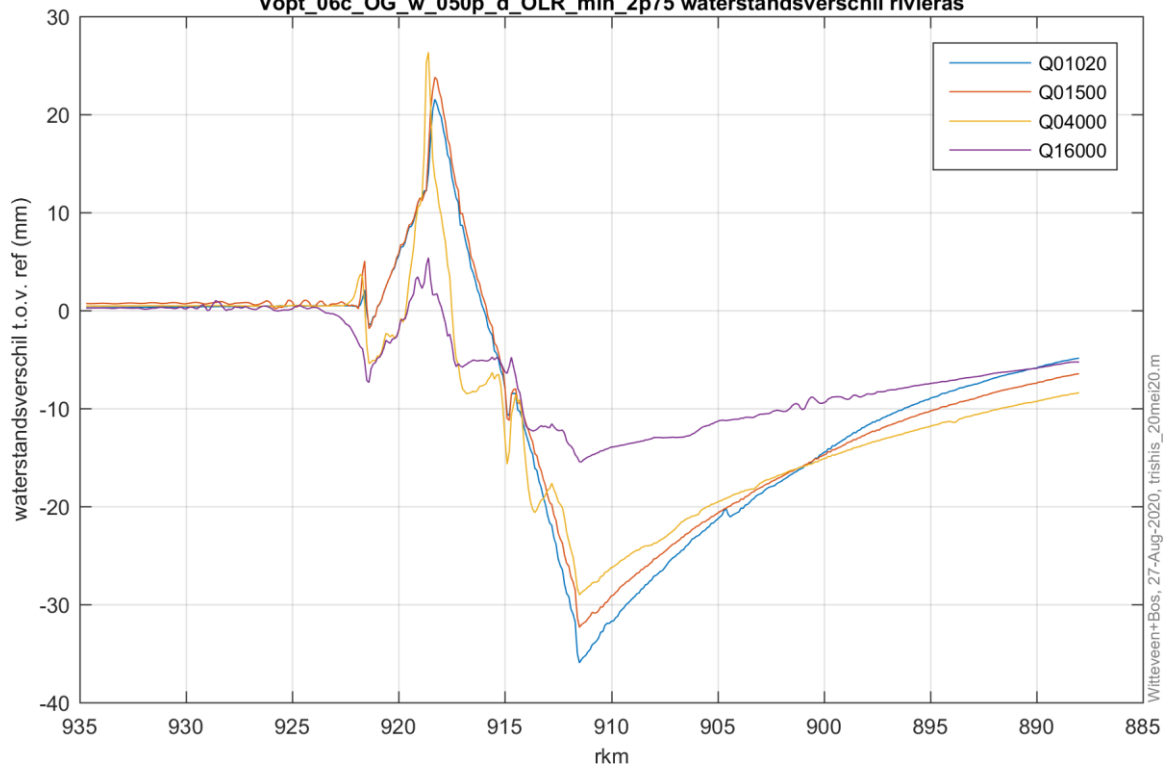






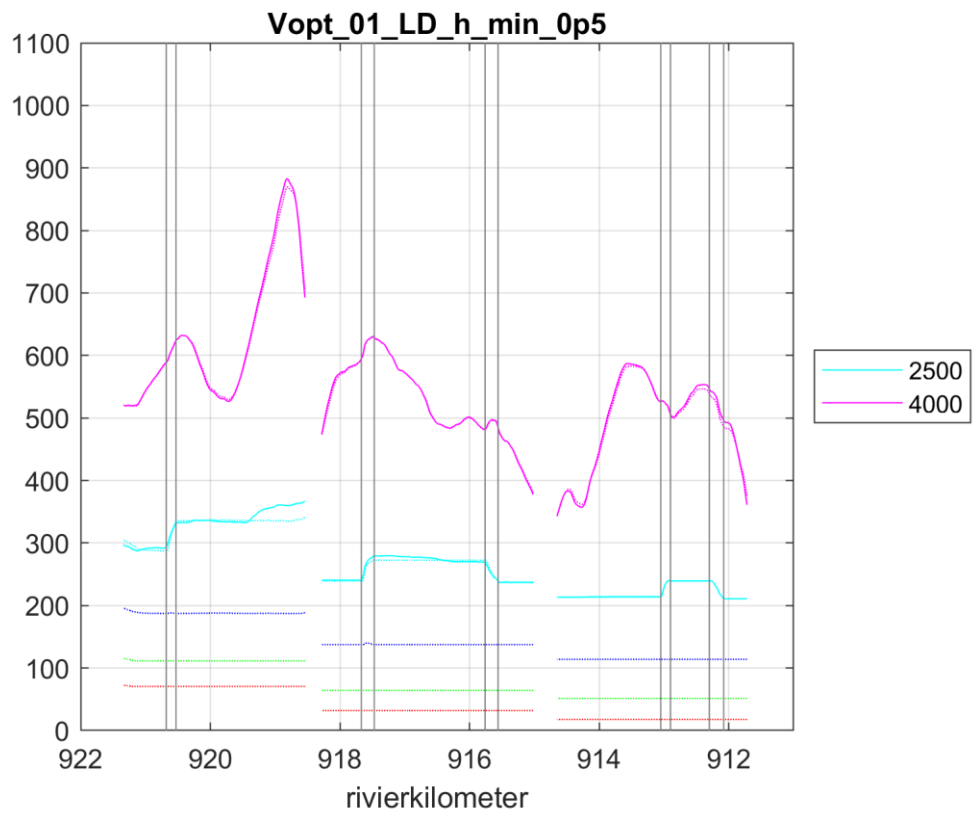


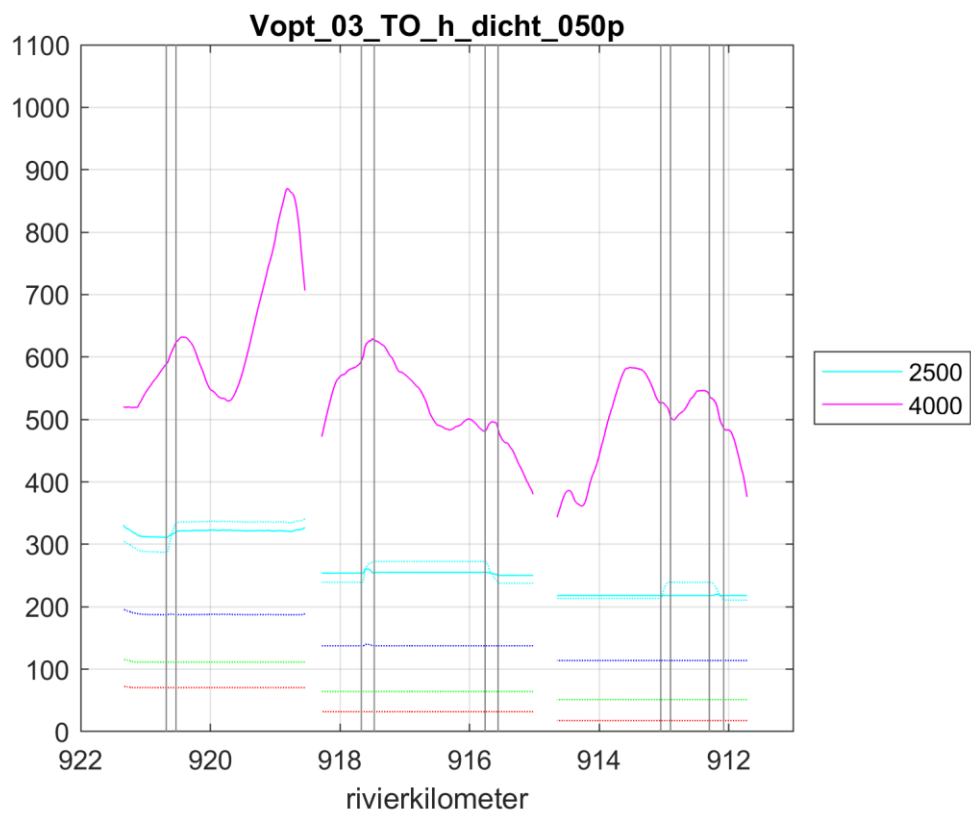
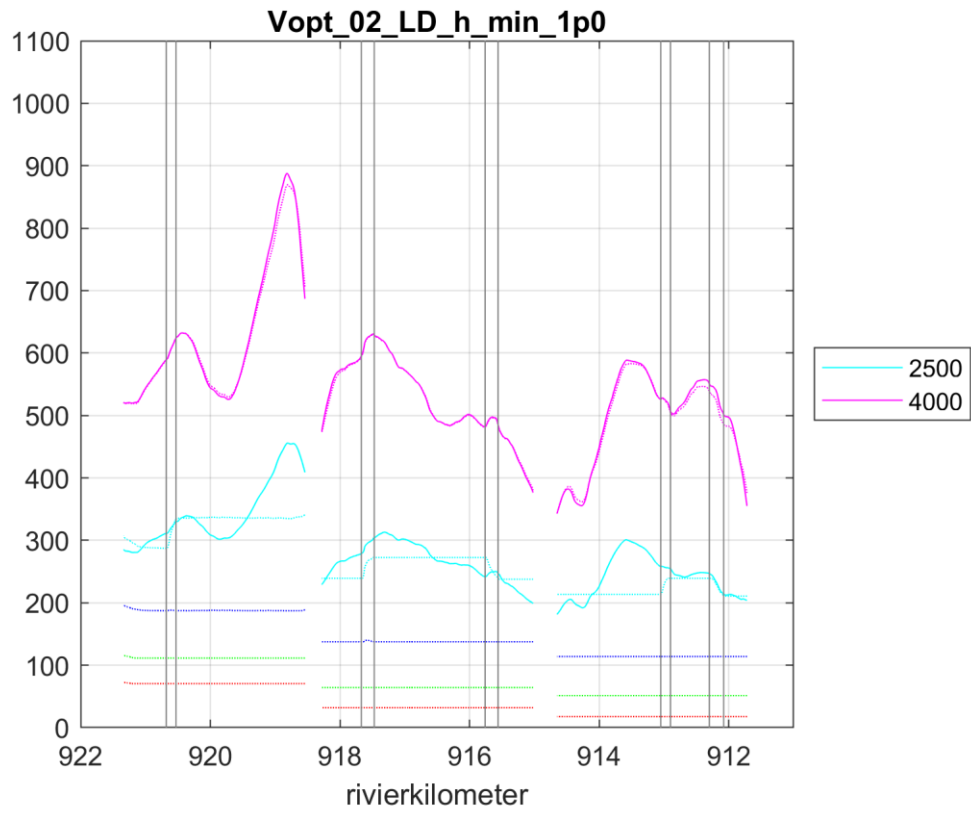
Vopt\_06c\_OG\_w\_050p\_d\_OLR\_min\_2p75 waterstandsverschil rivieras

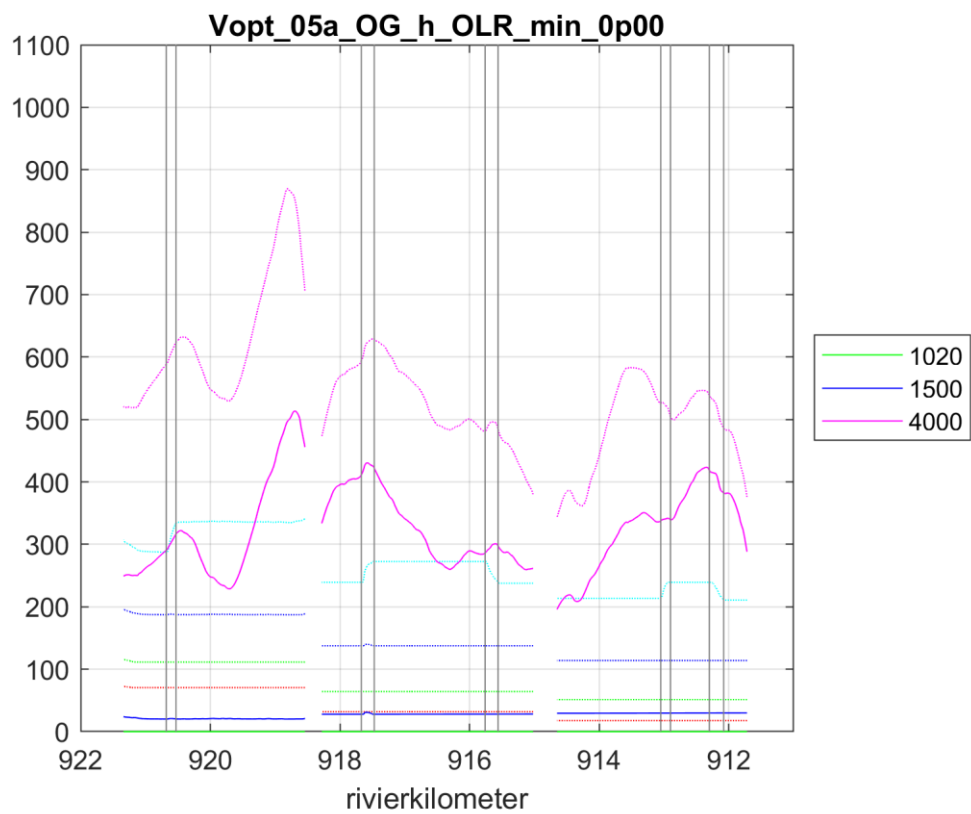
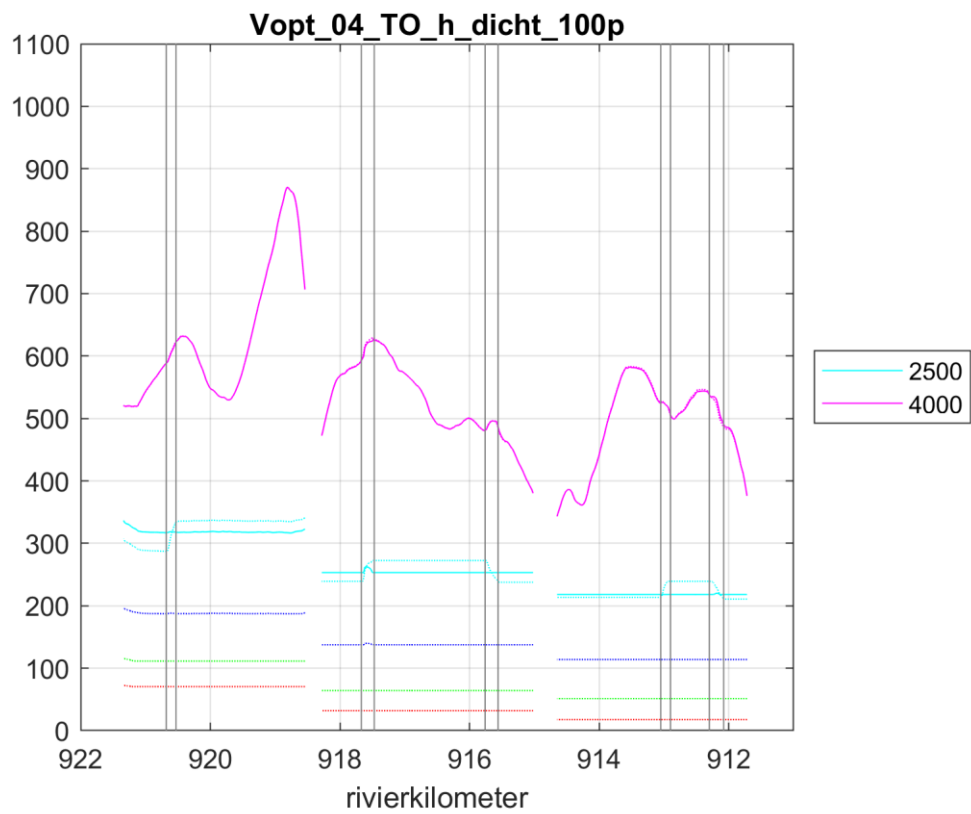




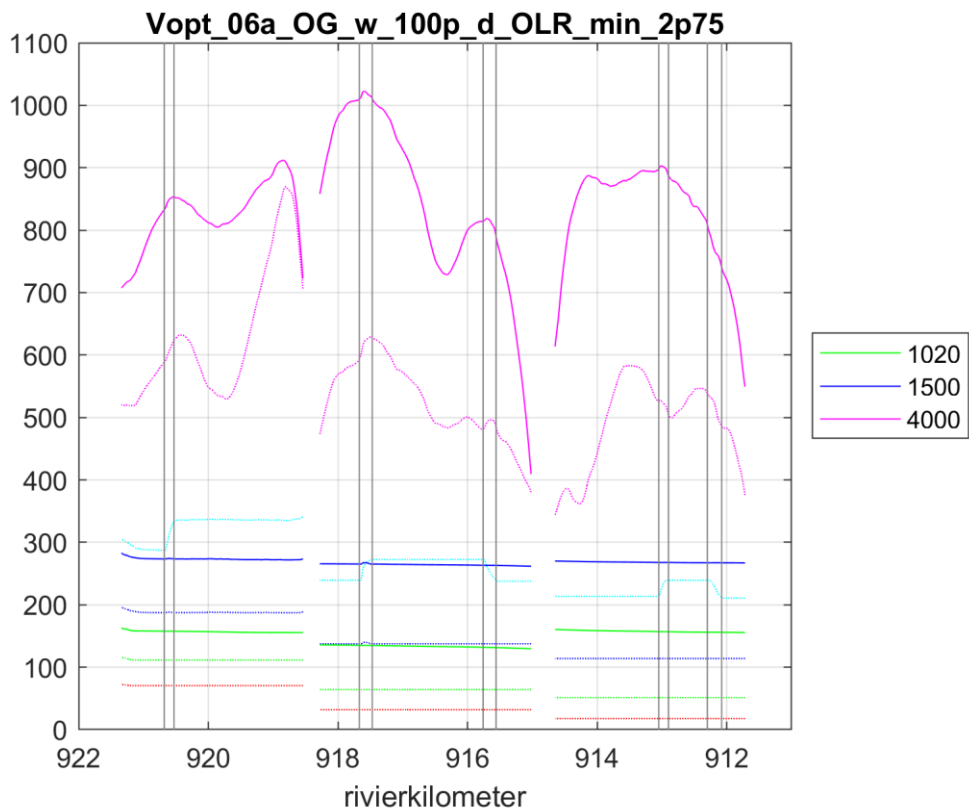
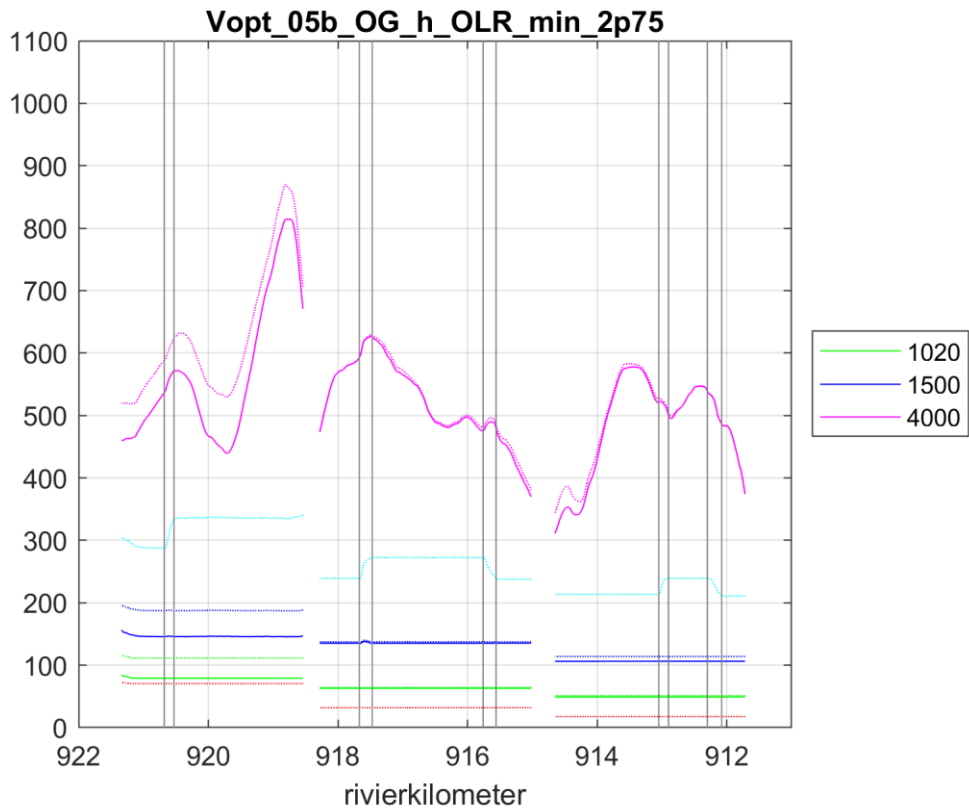
**BIJLAGE: OEVERGEUL AFVOEREN**

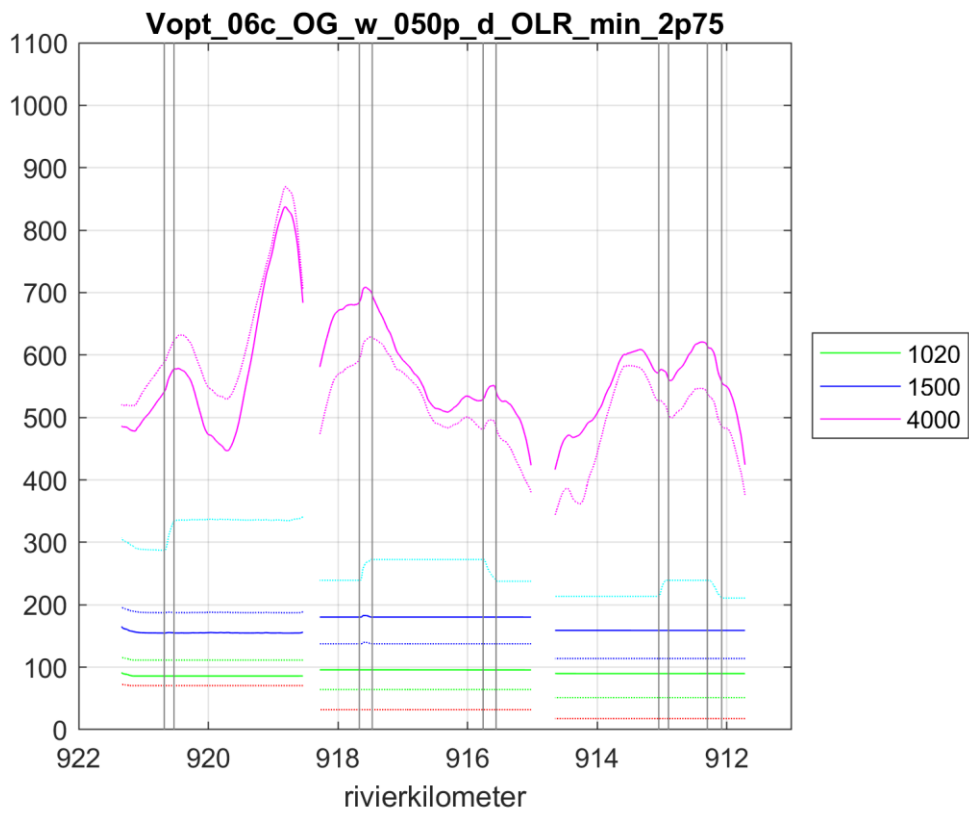
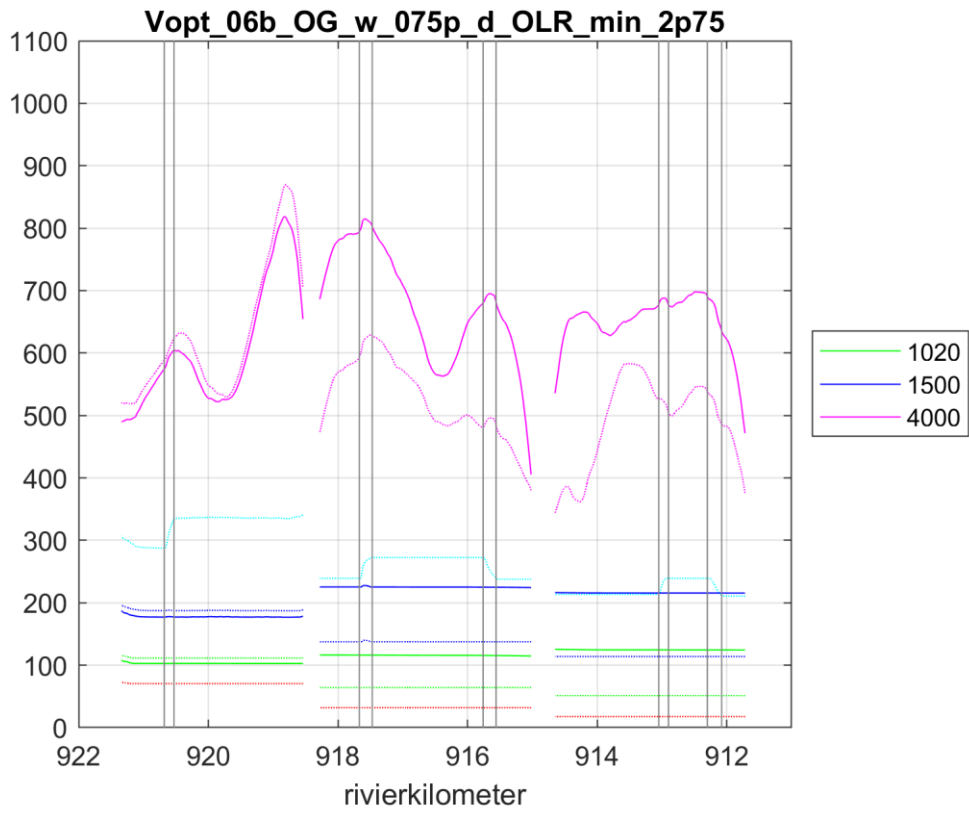


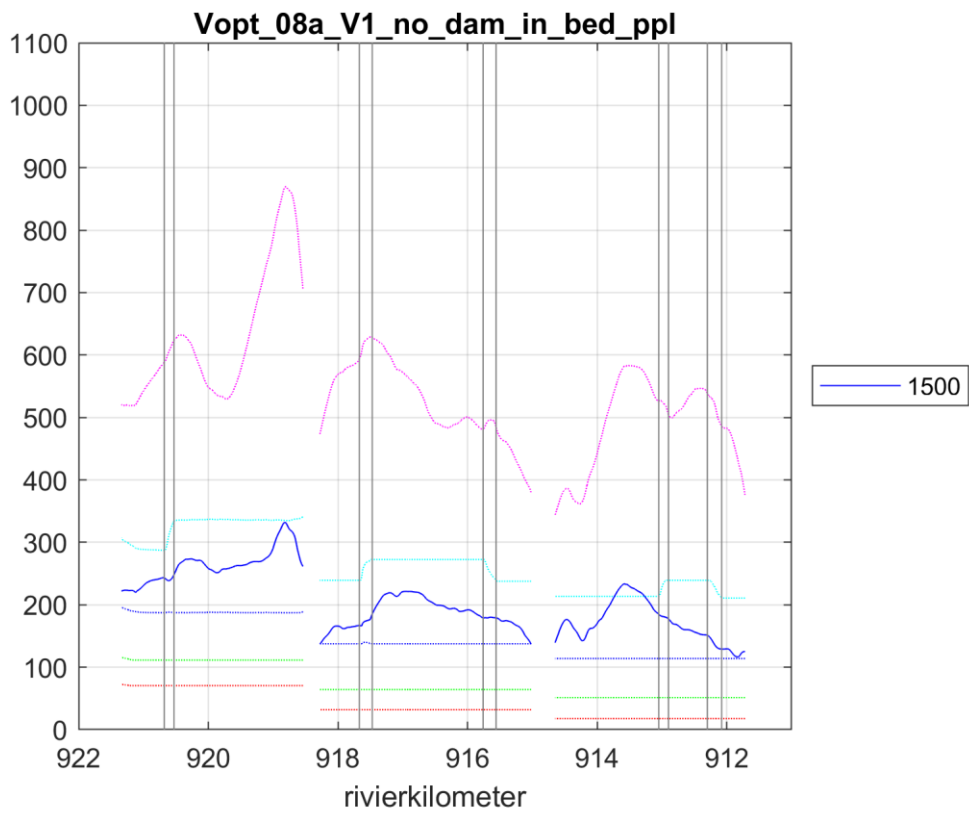
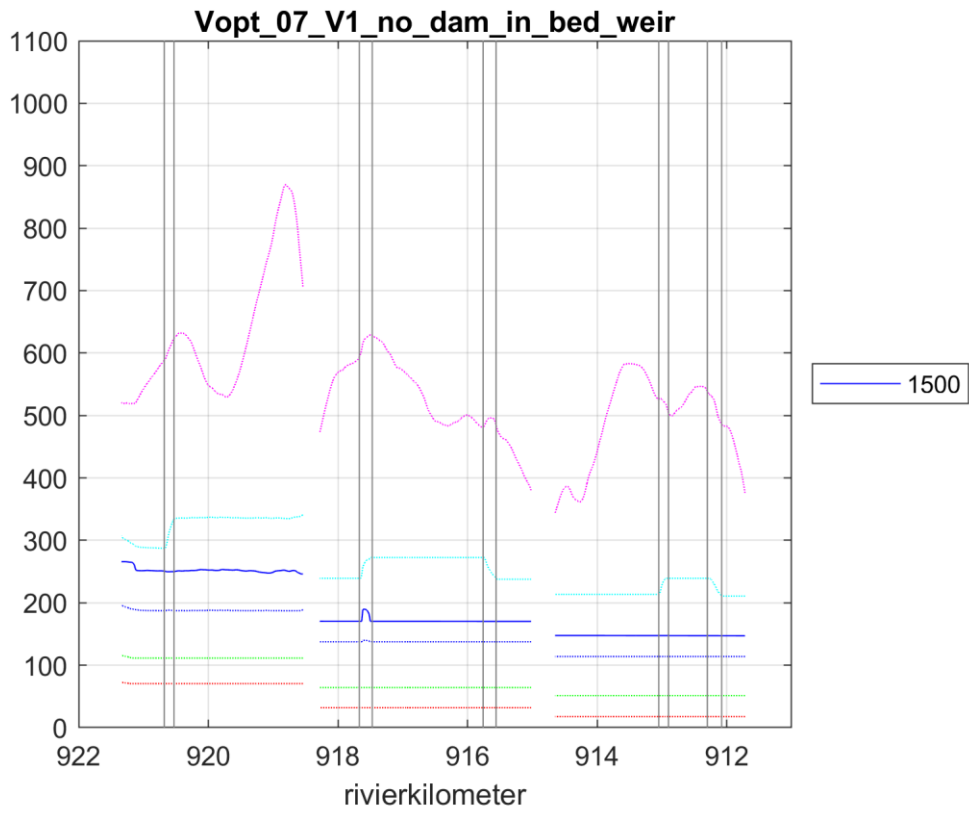


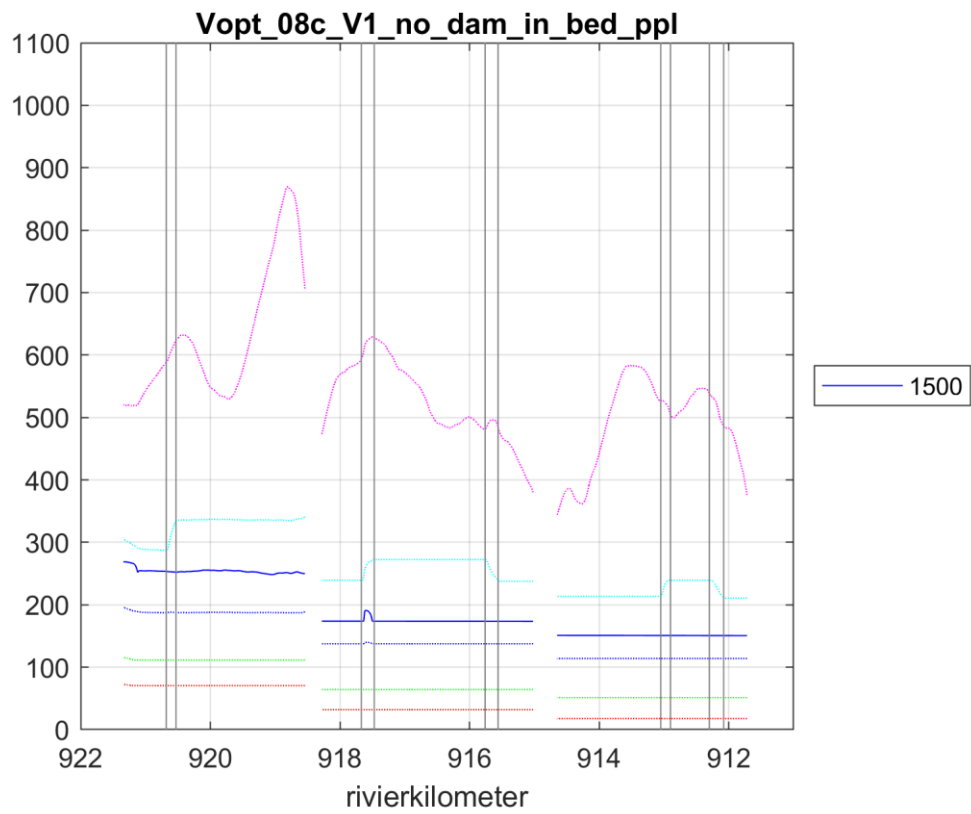
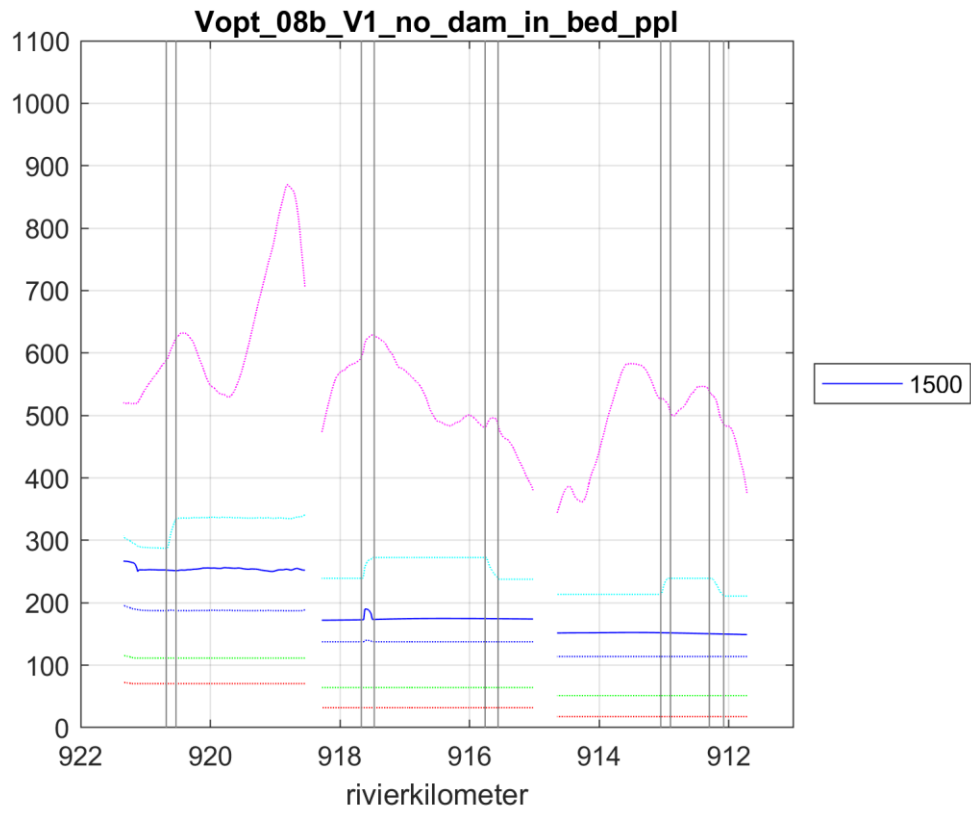


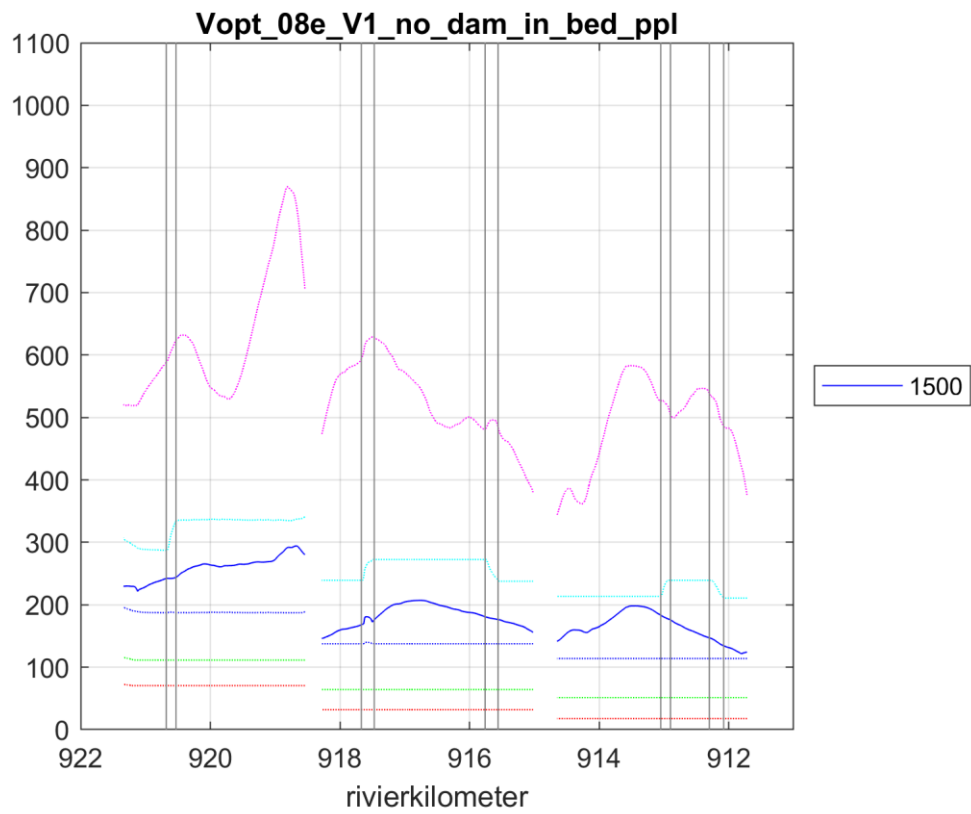
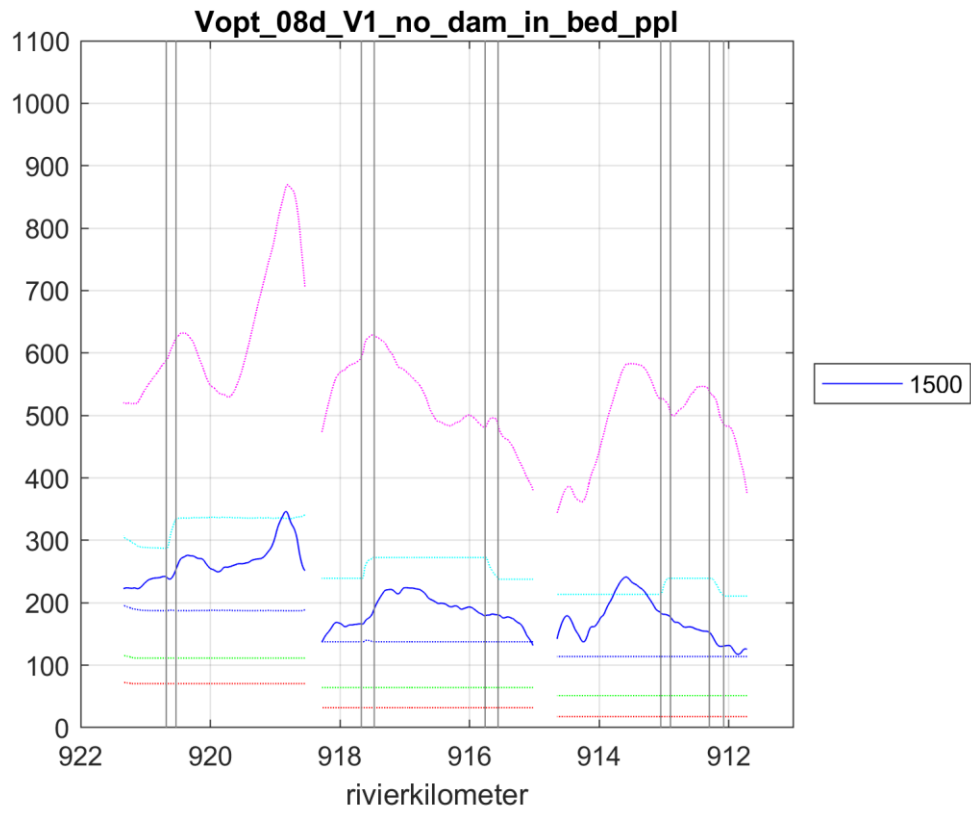


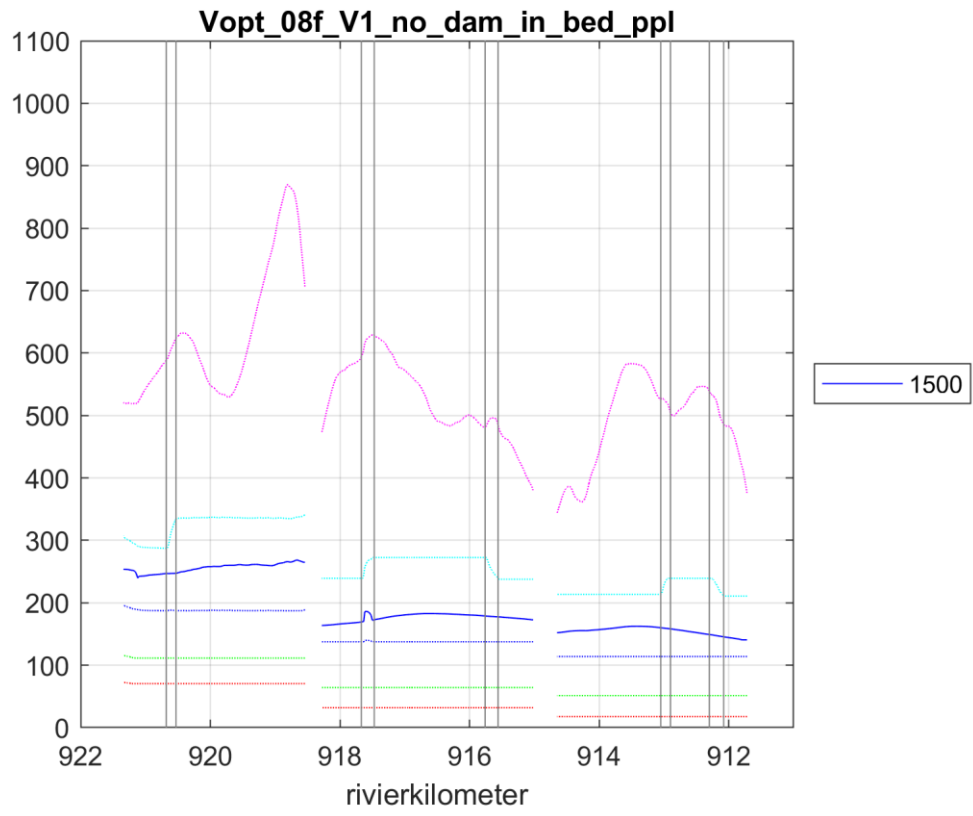












# IV

## BIJLAGE: STROOMSNELHEIDSVERSCHILLEN

