

Validatie Rijntakkenmodellen hoogwater 2018

2D D-HYDRO en 1D SOBEK



Validatie Rijntakkenmodellen hoogwater 2018
2D D-HYDRO en 1D SOBEK

Auteur(s)

Anna Kusters
Koen Berends

Validatie Rijntakkenmodellen hoogwater 2018

2D D-HYDRO en 1D SOBEK

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten
Referenties	
Trefwoorden	D-HYDRO, SOBEK, Rijntakken, validatie, hoogwater 2018

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-12-2022
Projectnummer	11208053-003
Document ID	11208053-003-ZWS-0015
Pagina's	167
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anna Kusters	
	Koen Berends	

Samenvatting

In de afgelopen jaren zijn nieuwe modellen voor de Rijn ontwikkeld in D-HYDRO en SOBEK, als onderdeel van de overstap naar het modelinstrumentarium in de zesde generatie. Het 2D D-HYDRO-model is gekalibreerd en gevalideerd op basis van gemeten waterstanden en afvoeren tijdens perioden uit 1993, 1995, 2010/2011, 2015/2016 en 2016/2017. Het 1D SOBEK-model is afgeleid van het 2D-model, en gekalibreerd en gevalideerd op basis van 2D-modelresultaten.

Het hoogwater van 2018 biedt de kans om de prestatie van de Rijntakkenmodellen in het hoge-afvoerbereik te beoordelen op basis van een recente situatie (na de uitvoering van Ruimte voor de Rivier). Daarnaast zijn extra simulaties uitgevoerd om het effect van reeds ondergelopen uiterwaarden op de modelresultaten rondom de afvoerpiek te bepalen.

Validatieresultaten D-HYDRO

Over de hele validatieperiode (8 december 2017 tot 1 april 2018) is de bias van het model ten opzichte van de meting voor de meeste stations kleiner dan 5 cm (absolute waarde). Benedenstrooms op de Waal (Sint-Andries, Zaltbommel, Vuren) en de IJssel (Doesburg-brug en verder) is de prestatie van het model over de hele periode gezien relatief slecht (bias \geq 5 cm in absolute zin). Bij de genoemde stations op de IJssel worden de waterstanden over vrijwel het hele afvoerbereik onderschat door het model. Op de Waal zijn juist vooral de piekwaterstanden te laag. Ook op de Boven-Rijn onderschat het model de piekwaterstanden.

Het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017, met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december (om het effect van reeds ondergelopen uiterwaarden op de modelresultaten rondom de tweede afvoerpiek te bepalen), heeft geen effect op de gemodelleerde piekwaterstanden bij het tweede hoogwater. Alleen in de aanloop naar het tweede hoogwater leidt het weglaten van de maand december tot lagere waterstanden doordat de uiterwaarden initieel nog niet onder zijn gelopen. Op de meeste locaties leidt dit tot een betere overeenkomst met de metingen, maar langs de IJssel wordt het resultaat in de aanloop naar de tweede piek juist (veel) slechter.

Gedurende de drie hoogwaterpieken gaat er te weinig afvoer naar de Waal en teveel naar het Pannerdens Kanaal. De afwijking is orde grootte $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Het surplus van het Pannerdens Kanaal gaat in zijn geheel naar de Neder-Rijn, waardoor de afvoeren ook hier te hoog zijn. De overeenkomst tussen gemeten en gemodelleerde afvoer naar de IJssel is juist zeer goed (bias slechts $-1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Validatieresultaten SOBEK

Actualisatie van profielen en winterbedruwheden (van j22 naar j19) leidt over het algemeen tot hogere waterstanden in 1D in vergelijking met 2D.

Over de hele validatieperiode (8 december 2017 tot 1 april 2018) zien we met name op de Boven-Rijn en Waal een grotere afwijking van metingen dan in het 2D-model. Op de overige stations volgt het 1D-model de trend van het 2D-model, met vergelijkbare bias maar grotere standaardafwijking. Met name op de Waal worden de piekwaterstanden net als in het 2D-model onderschat.

Het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017 (met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december) beïnvloedt de aanloop naar de piek, maar heeft weinig effect op de gemodelleerde (piek)waterstanden in de rest van de periode.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond en doel	8
1.2	Software en hardware	8
1.3	Organisatie en bijdragen	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Modelopzet	10
2.1	D-HYDRO	10
2.1.1	Baseline	10
2.1.2	Randvoorwaarden	10
2.1.2.1	Open randen en lateralen	10
2.1.2.2	Validatieperioden	10
2.1.3	Kunstwerksturing	11
2.1.3.1	Stuwen Neder-Rijn – Lek	12
2.1.3.2	Gemaal Marijkesluizen	12
2.1.4	Initiële condities	12
2.1.5	Rekentijden	13
2.2	SOBEK	13
2.2.1	Opzet	13
2.2.2	Afleiden profielen en ruwheden	14
2.2.3	Vergelijking met 2D	17
2.2.4	Overzetten randvoorwaarden en kunstwerksturing	19
3	Validatie hoogwater 2018	20
3.1	Beschikbare gegevens	20
3.2	Resultaten D-HYDRO	20
3.2.1	Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018	22
3.2.2	Hoogwaterpiek 10 januari 2018	25
3.2.3	Afvoeren	29
3.2.3.1	Splitsingspunten	29
3.2.3.2	Validatie Qh-relaties Tiel en Olst	29
3.2.4	Effect hoogwaterpiek december 2017	30
3.2.5	Vergelijking RMM	32
3.3	Resultaten SOBEK	33
3.3.1	Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018	33
3.3.2	Hoogwaterpiek 10 januari 2018	34
3.3.3	Effect hoogwaterpiek december 2017	34
3.3.4	Afvoeren	35
4	Conclusies	39
4.1	Validatie D-HYDRO	39
4.2	Validatie SOBEK	39

5	Aanbevelingen	41
5.1	Algemeen	41
5.2	Aanbevelingen D-HYDRO	41
5.3	Aanbevelingen SOBEK	41
	Referenties	42
A	Toelichting meetgegevens.....	43
B	Bepaling laterale uitwisselingen	51
B.1	Inleiding	51
B.2	Afvoeren beken/gemalen	51
B.3	Afvoeren ADM kanalen	53
B.4	Vervallen ten behoeve van schutverliezen	53
B.5	Invoerbesteden en aanpassingen yml	54
B.6	Locaties lateralen	55
B.7	Gemaal Marijkesluizen	57
B.7.1	Methode	57
B.7.2	Bediening keerschuij en sluizen	58
B.7.3	Opmerkingen	59
B.8	Referenties	60
C	Sturing stuwen Driel, Amerongen en Hagestein	61
D	Validatieresultaten D-HYDRO	62
D.1	Waterstanden LMW-stations	62
D.1.1	Topstanden	62
D.1.2	Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018	63
D.1.3	Vergelijking validaties periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018	85
D.2	Verval stuwen	107
D.3	Afvoeren splitsingspunten	109
D.4	ADCP- en ADM-metingen afvoer	112
D.5	Qh-relaties Tiel en Olst	119
E	Validatieresultaten SOBEK	122
E.1	Waterstanden LMW-stations	122
E.1.1	Afleidingsom; vergelijking met 2D	122
E.1.1.1.	Bovenrijn-Waal	122
E.1.1.2.	Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek	125
E.1.1.3.	Ijssel	128
E.1.2	Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018	131
E.1.2.1.	Bovenrijn-Waal	132
E.1.2.2.	Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek	136
E.1.2.3.	Ijssel	140
E.1.3	Vergelijking validaties periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018	144
E.1.3.1.	Bovenrijn-Waal	144

E.1.3.2.	Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek	148
E.1.3.3.	IJssel	153
E.2	Verval stuwen	156
E.3	Afvoeren splitsingspunten	158
E.4	ADCP- en ADM-metingen afvoer	159
F	Zomerbedbreedte in SOBEK.....	164

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel

In de afgelopen jaren zijn nieuwe modellen voor de Rijn ontwikkeld in D-HYDRO en SOBEK, als onderdeel van de overstap naar het modelinstrumentarium in de zesde generatie. Het 2D D-HYDRO-model is gekalibreerd en gevalideerd op basis van gemeten waterstanden en afvoeren tijdens perioden uit 1993, 1995, 2010/2011, 2015/2016 en 2016/2017. Het 1D SOBEK-model is afgeleid van het 2D-model, en gekalibreerd en gevalideerd op basis van 2D-modelresultaten.

De Rijntakkenmodellen worden ingezet in operationele systemen, maar ook voor vergunningverlening in het kader van de Waterwet en voor de berekening van hydraulische belastingen in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI). Dit betekent dat de prestatie van de modellen voor de huidige (en mogelijke toekomstige) rivierinrichting centraal staat, terwijl kalibratie en validatie hebben plaatsgevonden voor perioden die tot bijna 30 jaar in het verleden liggen. Deze discrepantie is het grootst voor hoge afvoeren, omdat deze extreme situaties niet vaak optreden. Tegelijkertijd is het juist in het hoge-afvoerbereik belangrijk dat het model zo goed mogelijk presteert, omdat dit direct raakt aan de hoogwaterveiligheid.

Het hoogwater van 2018 biedt de kans om de prestatie van de Rijntakkenmodellen in het hoge-afvoerbereik te beoordelen op basis van een recente situatie. De laatste keer dat een vergelijkbaar hoogwater optrad was in 2011; deze hoogwaterperiode is dan ook gebruikt voor de kalibratie van het 2D-model in dit afvoerbereik. In de periode 2011-2018 is de inrichting van de Rijntakken significant veranderd (bijvoorbeeld als gevolg van rivierkundige maatregelen in het programma Ruimte voor de Rivier, maar ook door ontwikkelingen als bodemerrosie), dus de vraag die in deze studie centraal staat is hoe goed de modellen in staat zijn de waterstanden en afvoerverdeling voor het hoogwater 2018 correct te simuleren.

Nevendoel is het vergelijken van de resultaten van het 1D-model met die van het 2D-model, en het verklaren van de verschillen. Daarnaast worden extra simulaties uitgevoerd om het effect van reeds ondergelopen uiterwaarden op de modelresultaten rondom de afvoerpiek te bepalen. Het hoogwater dat in deze studie wordt bekeken werd namelijk voorafgegaan door een andere, minder hoge afvoerpiek. Het is bekend dat het leeglopen van de uiterwaarden na deze eerste afvoergolf niet goed kan worden nagebootst in de modellen. Met de aanvullende simulaties wordt de invloed van deze tekortkoming op de resultaten rondom de tweede en hoogste piek geanalyseerd.

1.2 Software en hardware

Voor de validatie is de volgende software gebruikt:

- Bepaling lateralen: RGWM 2.4.0-p02
- Berekeningen 2D: D-HYDRO Suite 2022.01_patch01 (DIMRset 2.17.12_patch01)
- Afleiden 1D-model: FM2PROF 2.2.2.
- Berekeningen 1D-model: SOBEK 3.7.19.

Alle 2D berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux H6 cluster bij Deltares, onder het CentOS 7 besturingssysteem. De 1D berekeningen zijn uitgevoerd op het Windows cluster.

1.3 Organisatie en bijdragen

Aan dit project is door de volgende personen bijgedragen:

Naam	Organisatie	Activiteiten
Anna Kusters	Deltares	projectcoördinatie, uitvoeren D-HYDRO-berekeningen, analyse resultaten en rapportage
Koen Berends	Deltares	werkzaamheden FM2PROF en SOBEK, analyse resultaten en rapportage
Anke Becker	Deltares	review rapportage
Aukje Spruyt	Deltares	projectleider KPP Modelschematisaties zoekt
Dénes Beyer	RWS-ON	aanleveren (meet)gegevens ten behoeve van validatie en kunstwerksturing, controle resultaten, review rapportage
Raymond van Renswoude	RWS-ON	review rapportage
Martin Scholten	RWS-WVL	opdrachtgever, review rapportage

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de modelopzet in D-HYDRO en SOBEK voor de validatie op het hoogwater van 2018 besproken.

Hoofdstuk 3 gaat in op de beschikbare meetgegevens waarop gevalideerd wordt. Vervolgens worden in dit hoofdstuk de validatieresultaten voor zowel D-HYDRO als SOBEK gepresenteerd.

Hoofdstuk 4 bevat de conclusies van de validatie van beide modellen, en hoofdstuk 5 geeft aanbevelingen voor verbetering van de modellen.

2 Modelopzet

2.1 D-HYDRO

2.1.1 Baseline

Voor de validatie wordt de bestaande Baseline-schematisatie baseline-rijn-j19_6-v2 gebruikt. De opzet van deze schematisatie wordt beschreven in Kosters (2022). De gebruikte schematisatie beschrijft een iets recentere situatie dan die ten tijde van het hoogwater. In de schematisatie is één maatregel opgenomen die is uitgevoerd na het hoogwater van 2018. Dat betreft de aanpassing van de openingen in de langsdammen van de Waal naar de situatie in 2019. Verder moet bedacht worden dat het zomerbed in deze schematisatie is ingemeten in de periode oktober 2018 – januari 2019, dus na het hoogwater. In de schematisatie zijn geen kunstwerken aanwezig om inlaatduikers of coupures te schematiseren, zoals eerder wel is gedaan voor hoogwatervalidaties tijdens de modelbouw (Kosters et al., 2022). Bij RWS-ON is een schematisatie in protocol 5 beschikbaar voor de situatie van 2018 die als basis kan dienen voor een eventuele vervolvalidatie.

2.1.2 Randvoorwaarden

2.1.2.1 Open randen en lateralen

Randvoorwaarden zijn afgeleid voor een periode van 4 maanden, van 1 december 2017 tot en met 31 maart 2018. Op de bovenstroomse rand bij Dornick wordt een afvoertijdreeks opgelegd. Deze tijdreeks is gelijk aan de afvoerreeks bij Lobith, met een looptijdcorrectie van 3 uur. De bepaling van de afvoer bij Lobith is toegelicht in Bijlage A.

Het model heeft benedenstroomse randen op de Waal bij Hardinxveld, op de Lek bij Krimpen aan de Lek en op de IJssel bij Ketelbrug. Bij Krimpen aan de Lek en Ketelbrug worden tijdreeksen van gemeten waterstanden opgelegd. Bij de Ketelbrug wordt de meetreeks van station Kamperhoek gebruikt. De meetfrequentie is eens per 10 minuten. Bij Hardinxveld zijn geen gemeten waterstanden beschikbaar. De op te leggen waterstand op deze locatie wordt daarom afgeleid van de gemeten waterstand bij Werkendam-buiten (eveneens elke 10 minuten), op basis van de volgende relaties (Spruyt, 2019):

$$\begin{aligned} H_{\text{Hardinxveld}} &= 1.053 * H_{\text{Werkendam}} - 0.019 && \text{als } H_{\text{Werkendam}} < 2.5 \text{ m +NAP} \\ H_{\text{Hardinxveld}} &= 1.592 * H_{\text{Werkendam}} - 1.367 && \text{als } 2.5 \leq H_{\text{Werkendam}} \leq 3.0 \text{ m +NAP} \\ H_{\text{Hardinxveld}} &= 0.876 * H_{\text{Werkendam}} + 0.781 && \text{als } H_{\text{Werkendam}} > 3.0 \text{ m +NAP} \end{aligned}$$

Laterale toestromingen zijn bepaald met de Randvoorwaardengenerator Watermodellen (RGWM). Hiermee kan uit een beperkte set bekende randvoorwaarden een volledige set worden verkregen door toepassing van regressierelaties. De meetgegevens die in de RGWM zijn gebruikt worden toegelicht in Bijlage B. Een lijst met namen van alle lateralen die in deze validatie worden gebruikt is gegeven in Bijlage B.6.

2.1.2.2 Validatieperioden

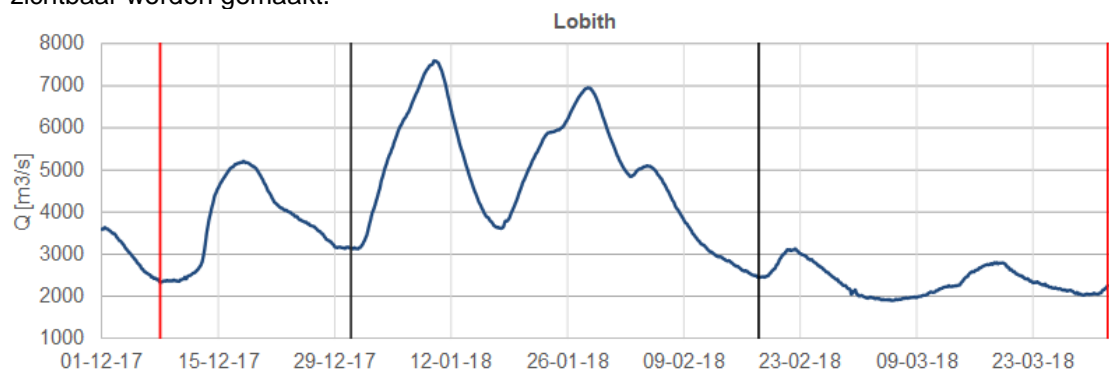
Figuur 2.1 geeft de afvoer bij Lobith voor de volledige periode waarvoor meetgegevens verzameld zijn. In de figuur is goed zichtbaar dat in deze periode eigenlijk drie hoogwaterpieken vlak na elkaar optreden, waarvan de middelste piek (op 9 januari 2018) met ongeveer 7600 m³/s de hoogste is. De validatie op deze piek staat in deze studie centraal.

De hydrodynamische condities die bij deze piek in de Rijntakken optreden zijn afhankelijk van het hieraan voorafgaande afvoerverloop. Te zien is dat op 18 december 2017 een afvoerpiek van 5200 m³/s optreedt. Bij deze afvoer loopt een groot gedeelte van de uiterwaarden al onder. In de periode tussen de eerste en tweede piek stromen ze gedeeltelijk leeg, onder vrij verval of door het water weg te pompen. Ook treedt infiltratie in de bodem en verdamping op. Hoe meer water in de uiterwaarden achterblijft, hoe kleiner de bergingscapaciteit van de uiterwaarden is op het moment dat de tweede piek optreedt.

Het proces van leeglopen van uiterwaarden wordt in de Rijntakkenmodellen echter niet goed gerepresenteerd. Veel kleine kunstwerken in de uiterwaarden zoals gemalen en duikers zijn niet in het model opgenomen.

Daarnaast wordt in het model geen rekening gehouden met infiltratie en verdamping. De verwachting is daarom dat in het model meer water in de uiterwaarden achterblijft na het eerste hoogwater dan in werkelijkheid het geval was. Als gevolg hiervan zouden de gemodelleerde waterstanden bij de tweede piek te hoog uit kunnen vallen.

Om deze hypothese te testen worden met elk model (SOBEK en D-HYDRO) twee validatieberekeningen uitgevoerd. De eerste periode (aangegeven met rode lijnen in Figuur 2.1) loopt van 8 december 2017 tot 1 april 2018 en beslaat daarmee bijna de hele periode waarvoor gegevens beschikbaar zijn (de periode van 1 tot 8 december 2017 is nodig om het model in te spelen). De tweede berekening (zie de zwarte lijnen in Figuur 2.1) is voor de periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018. De eerste piek wordt in deze berekening dus buiten beschouwing gelaten. Door de resultaten van beide berekeningen met elkaar te vergelijken kan het effect van de eerste piek op de resultaten rondom de tweede piek zichtbaar worden gemaakt.



Figuur 2.1 Afvoer bij Lobith in de periode 1 december 2017 tot 1 april 2018.

2.1.3 Kunstwerksturing

Kunstwerken worden zoveel mogelijk gestuurd op basis van metingen of informatie over de bediening uit de validatieperiode. In Tabel 2.1 wordt voor elk kunstwerk kort toegelicht hoe deze wordt gestuurd. Voor de stuwen op de Neder-Rijn – Lek en het gemaal Marijkesluizen wordt in paragrafen 2.1.3.1 en 2.1.3.2 nog een extra toelichting gegeven. De tijdstippen voor de sturing staan in Bijlage A.

Tabel 2.1 Toelichting kunstwerksturing.

Kunstwerk	Toelichting sturing
Stuw Driel	Sturing op gemeten waterstanden of geforceerd open
Stuw Amerongen	Sturing op gemeten waterstanden of geforceerd open
WKC Amerongen	Staat dicht, geen sturing
Stuw Hagestein	Sturing op gemeten waterstanden of geforceerd open
Prinses Marijkesluizen (oost en west)	Tijdserie voor openen en sluiten, gebaseerd op informatie bediening

Gemaal Marijkesluizen	In het model opgenomen als set van 2 lateralen, zie paragraaf 2.1.3.2
Keerschuij Ravenswaaij	Tijdserie voor openen en sluiten, gebaseerd op informatie bediening
Prins Bernhardsluizen (oost en west)	Staat dicht, geen sturing
Pomp inlaat nevengeul Lent	Operationele sturing zoals beschreven in Kusters (2022)
Regelwerk Pannerden	Hoogte schotten 13.9112 m +NAP, zie Kusters (2022)
Regelwerk Hondsbroeksche Pleij	Hoogte schotten 15.2 m +NAP, zie Kusters (2022). De opening met nummer 11 was gedurende de validatieperiode open. Voor deze opening is de drempelhoogte (11 m +NAP) aangehouden.
Inlaat Veessen-Wapenveld	Staat dicht, geen sturing

2.1.3.1 Stuwen Neder-Rijn – Lek

De hoogte van de vizierschuiven van de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein worden gecontroleerd met een PID-controller. Met deze PID-controller wordt getracht de waterstanden bovenstrooms van elke stuw zo goed mogelijk op het stuwpeil te krijgen. Het stuwpeil is in dit geval gedefinieerd als een tijdserie van gemeten waterstanden bovenstrooms van elke stuw.

Op basis van het gemeten verval over de stuwen is bepaald in welke perioden de vizierschuiven gestreken waren (dat wil zeggen dat de schuif boven het water hangt). In deze perioden werd de waterstand niet beïnvloed door de schuif. Om te voorkomen dat de waterstanden in het model in deze perioden wel door de schuiven beïnvloed kunnen worden, worden de stuwen in de betreffende perioden geforceerd open gezet.

Voor een toelichting op het RTC-schema van deze sturing wordt verwezen naar Bijlage C.

2.1.3.2 Gemaal Marijkesluizen

Wanneer de Marijkesluizen en de keerschuij Ravenswaaij gesloten zijn wordt het peil van het Betuwepand gecontroleerd met het gemaal Marijkesluizen. In het operationele model is dit gemaal in het model als pomp geschematiseerd. Voor historische perioden is het echter mogelijk om de gemaalafvoer van tevoren te berekenen op basis van de volgende waterbalans:

$$Q_{\text{gemaal}} = Q_{\text{lozingen}} - (\Delta h / \Delta t)_{\text{Tiel-kanaal}} \cdot A_{\text{Betuwepand}}$$

met:

Q_{gemaal} gemaalafvoer [m^3/s]

Q_{lozingen} toevoer van lateralen naar het Betuwepand [m^3/s]

$(\Delta h / \Delta t)_{\text{Tiel-kanaal}}$ waterstandsverandering op het Betuwepand bij Tiel-kanaal [m/s]

$A_{\text{Betuwepand}}$ oppervlakte van het Betuwepand [m^2]

De berekende gemaalafvoer wordt onttrokken aan het Betuwepand en geloosd op de Lek met behulp van een set van 2 lateralen. De uitwerking van deze methode is toegelicht in Bijlage B.7.

2.1.4 Initiële condities

In paragraaf 2.1.2.2 werd genoemd dat met beide modellen (SOBEK en D-HYDRO) twee validatieberekeningen worden uitgevoerd: één inclusief en één exclusief de eerste hoogwaterpiek van 18 december 2017 (zie Figuur 2.1). In het D-HYDRO-model is voor beide berekeningen een initieel waterstandsveld nodig. Deze waterstandsvelden zijn afgeleid uit een inspeelberekening van 5 dagen (1 tot 6 december 2017). Ook voor deze inspeelberekening is een initieel waterstandsveld nodig.

Hiervoor wordt een waterstandsveld gebruikt dat eerder is afgeleid bij het uitvoeren van standaardberekeningen met het D-HYDRO-model (zie Kusters, 2022). De afvoer bij Lobith op 1 december 2017 is ongeveer 3600 m³/s. Het initiële waterstandsveld behorend bij de standaardberekening met een stationaire afvoer van 3000 m³/s bij Lobith sluit hier het best bij aan.

Het waterstandsveld uit de inspeelberekening op 6 december 2017 00:00 wordt gebruikt als startpunt van de lange berekening. Deze berekening begint op 6 december, maar de eerste 2 dagen (6 – 8 december) worden niet in het validatieresultaat meegenomen omdat het model deze tijd nodig heeft om zich aan de randvoorwaarden aan te passen.

De tweede, kortere berekening begint op 29 december (validatie vanaf 31 december). De afvoer op 29 december is 3200 m³/s. Als we kijken naar de inspeelberekening komen de afvoer en waterstanden rond 3 december 20:00 hier het best mee overeen. Daarom wordt het waterstandsveld van dit tijdstip gebruikt als initiële conditie voor de korte validatieberekening.

2.1.5 Rekentijden

De berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux-rekencluster van Deltares, op 8 partities (2 nodes met elk 4 cores). Specificaties van het cluster zijn gegeven in Tabel 2.2.

De lange berekening (116 dagen) duurt 104 uur. Per uur rekentijd wordt dus ongeveer 1.12 dag doorgerekend. De korte berekening van 51 dagen duurt 59 uur (0.86 dagen per uur). De lange som rekt gemiddeld gesproken efficiënter omdat de tijdstappen met name in de periode na 18 februari (het einde van de korte simulatie) groot zijn. Dat komt omdat de afvoeren en bijbehorende stroomsnelheden in deze periode relatief laag zijn (zie ook Figuur 2.1).

Tabel 2.2 Specificaties van het Linux-rekencluster van Deltares (Hydrax H6).

	Bare metal	Bare metal (v6 CPU)	Virtual
Cores	920/1840(HT)	128/256(HT)	224
CPU	Intel Xeon CPU E3-1276 v3 @ 3.60GHz	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1270 v6 @ 3.80GHz	Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz
Memory	7.3 TB	1 TB	1.8 TB
Storage Filesystems	Multiple PetaBytes (ZFS/NFSv3)	Multiple PetaBytes (ZFS/NFSv3)	Multiple PetaBytes (ZFS/NFSv3)
Network	10GE Interconnect	10GE Interconnect	10GE Interconnect

2.2 SOBEK

2.2.1 Opzet

Voor de validatie van het SOBEK-model is in samenspraak met Rijkswaterstaat gekozen om de schematisatie sobek-rijn-j22_6-v1a1 als uitgangspunt te nemen, maar profielen en winterbedruwheden opnieuw af te leiden op basis van de 2D j19 schematisatie van Berends et al. (2021). Het modelgebied van dit SOBEK-model is hetzelfde als het 2D model, met de bovenrand bij Dornick en benedenranden bij Hardinxveld, Krimpen a/d Lek en de Ketelbrug¹. De zomerbedruwheden worden overgenomen uit sobek-rijn-j22_6-v1a1 – er wordt dus niet gekalibreerd op het D-HYDRO model.

¹ Er bestaat ook een ingekorte versie, sobek-rijn-j22_6-v1a1_rwsos, voor gebruik in RWSOS-Rivieren. Dit model heeft de bovenrand bij Lobith, en de benedenrand van de IJssel ligt bij het Keteldiep en Ketelhaven - het Ketelmeer is daarin dus niet opgenomen.

Omdat er al een j19 model bestaat – het pilotmodel –, verwijzen we naar dit nieuwe op de schematisatie van j22 gebaseerde j19 model als ‘sobek-rijn-j19_6-v1a2’.

2.2.2 Afleiden profielen en ruwheden

De profielen en winterbedruwheden zijn opnieuw afgeleid op basis van de FM2PROF afleidsom met dflowfm2d-rijn-j19_6-v2a uit het pilotproject (Berends et al. 2021), maar met de takkenstructuur en verbeteringen in FM2PROF zoals beschreven in Berends et al. (2022). Hierop gelden de volgende uitzonderingen:

- De profielen op de tak “Twentekanaal” (dit is het deel van de IJssel tot aan sluis Eefde) zijn overgenomen uit sobek-j22_6-v1a1, omdat de D-HYDRO som van het j19-v1 model geen afvoer oplegde op het Twentekanaal. Dit was een verbetering die is doorgevoerd in het j22 model.
- De zomerbedruwheden zijn niet gekalibreerd, maar overgenomen uit j22 (dus geen kalibratie op dflowfm2d-rijn-j19_6-v2a)

De verschillen tussen j22 en j19-v2 zijn op hoofdlijnen bekeken (Figuur 2.3). Hieruit blijkt dat er lokaal aanzienlijke verschillen kunnen zijn in de minimale bodemligging, met name op de Waal. De verschillen in stromende breedte en zomerdijkhoogte zijn, behoudens enkele uitschieters, klein. Enkele uitschieters zijn opvallend:

- Op de Waal neemt de breedte van het zomerbed in profiel waal_1_30730.435 (ter hoogte van rivierkilometer 898; Figuur 2.2) af met bijna 160 m ten opzichte van j22_6-v1a1. De reden hiervoor is een strang waarin in j22_6-v1a1 het stromingscriterium in de 2D afleidsom wél wordt overschreden, maar in j19_6-v1a2 niet. Daardoor wordt het zomerbed breder. De gevoeligheid van de breedte van het zomerbed voor plassen is een bekend punt van aandacht². Binnen RWsOS Rivieren is bijvoorbeeld opgemerkt dat dergelijke plassen kunnen leiden tot een lokaal gebrek aan verhang (zie bijlage F).

Bij grote sprongen in de zomerdijkhoogte is er meestal sprake van een klein of afwezig zomerdijkeffect in één van beide modellen. Als er geen ‘volume achter de zomerdijk’ bepaald kan worden, kan er ook geen eenduidige zomerdijkhoogte bepaald worden. Vaak wordt deze hoogte dan heel laag gelegd.

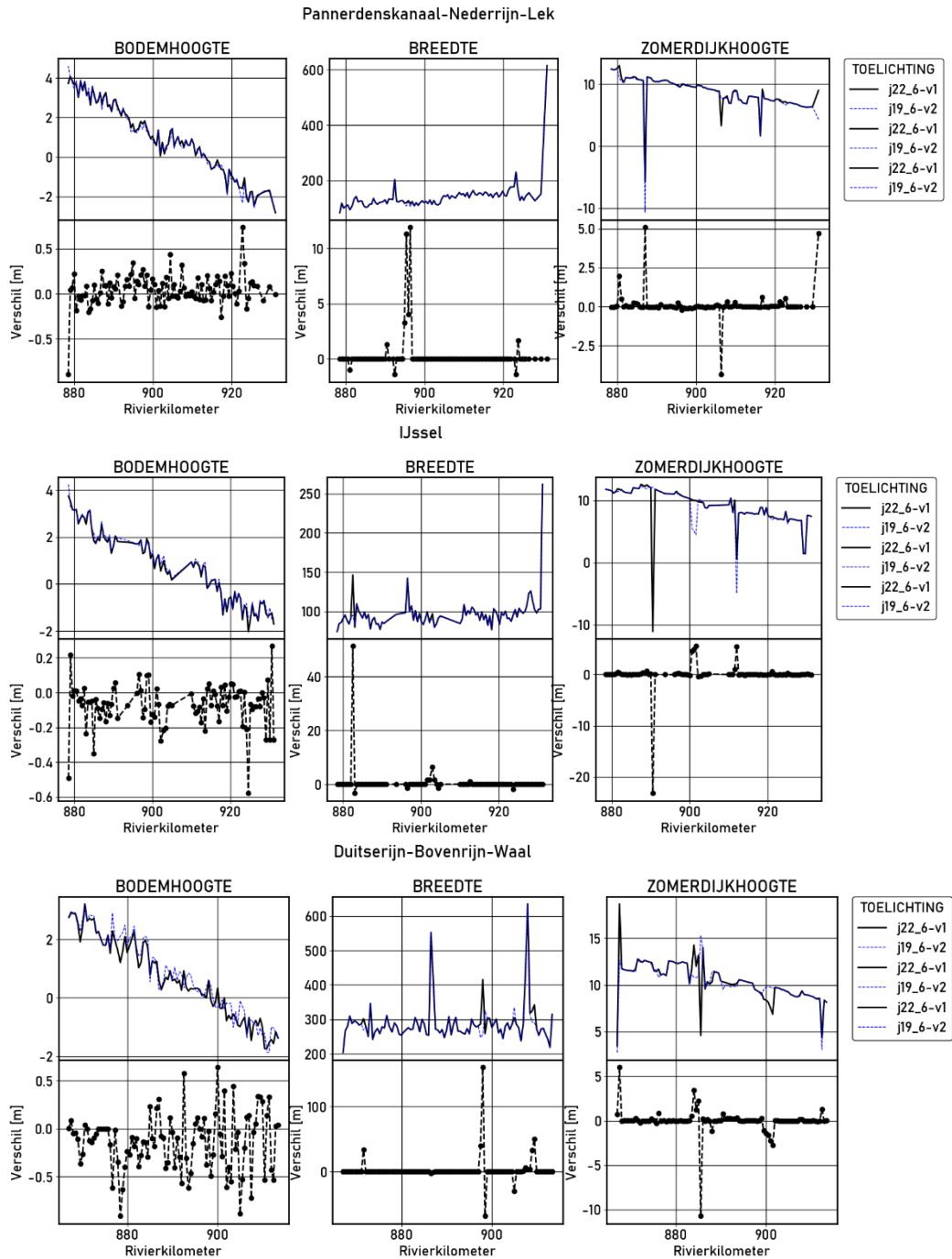
- Op IJssel_1_11996.816 (ter hoogte van rivierkilometer 889) is het verschil in de zomerdijkhoogte 23 meter. De reden hiervoor is, dat er bij dat profiel geen sprake is van een zomerdijk effect. Dat uit zich bijvoorbeeld in het lage ‘volume achter de zomerdijk’: in j22_6-v1a1 is het volume 0 m³, in j19_6-v1a2 is het volume ca. 20 m³. Ter vergelijking: het gemiddelde volume achter de zomerdijk op de IJssel is 857 m³ in j22_6-v1a1.
- Op waal_1_17843.478 (ter hoogte van rivierkilometer 885) is het verschil in de zomerdijkhoogte 10 m. In j22_6-v1a1 is het volume achter de zomerdijk 0 m³, in j19_6-v1a2 is het 713 m³ (gemiddeld voor de Waal is 1390 m³), bij een hoogte van 15.33 m. Dat is hoger dan het hoogste profielpunt. Hoewel dit volume enkel in de meest extreme gevallen aangesproken wordt, is dit gedrag onwenselijk. Het is aangemerkt als te verbeteren punt in FM2PROF³.

² Dit issue is gelogd als nummer 43: <https://github.com/Deltares/Fm2Prof/issues/43>

³ Dit issue is gelogd als nummer 42: <https://github.com/Deltares/Fm2Prof/issues/42>



Figuur 2.2 De ligging van profiel waal_1_30730.435 langs de Waal bij Dodewaard.



Figur 2.3 Verschil in minimale bodemhoogte, breedte van en zomerdijkhoogte tussen j22_v1a en j19_v2

2.2.3 Vergelijking met 2D

Na het afleiden van het model, vergelijken we de simulatieresultaten aan de hand van de afleidsom. Het doel van deze vergelijking is om fouten in invoerbestanden er in een vroeg stadium (dus vóór kalibratie) uit te halen. Deze vergelijking wordt gedaan zonder kunstwerksturing (met open kunstwerken).

De vergelijking met 2D wordt tijdens modelbouw normaliter ongekalibreerd gedaan. Echter, omdat gekalibreerde ruwheden uit het sobek-rijn-j22_6-v1a1 model nu beschikbaar zijn, voeren we de vergelijking van sobek-rijn-j19_6-v1a2 met 2D uit o.b.v. gekalibreerde ruwheden van sobek-rijn-j22_6-v1a1.

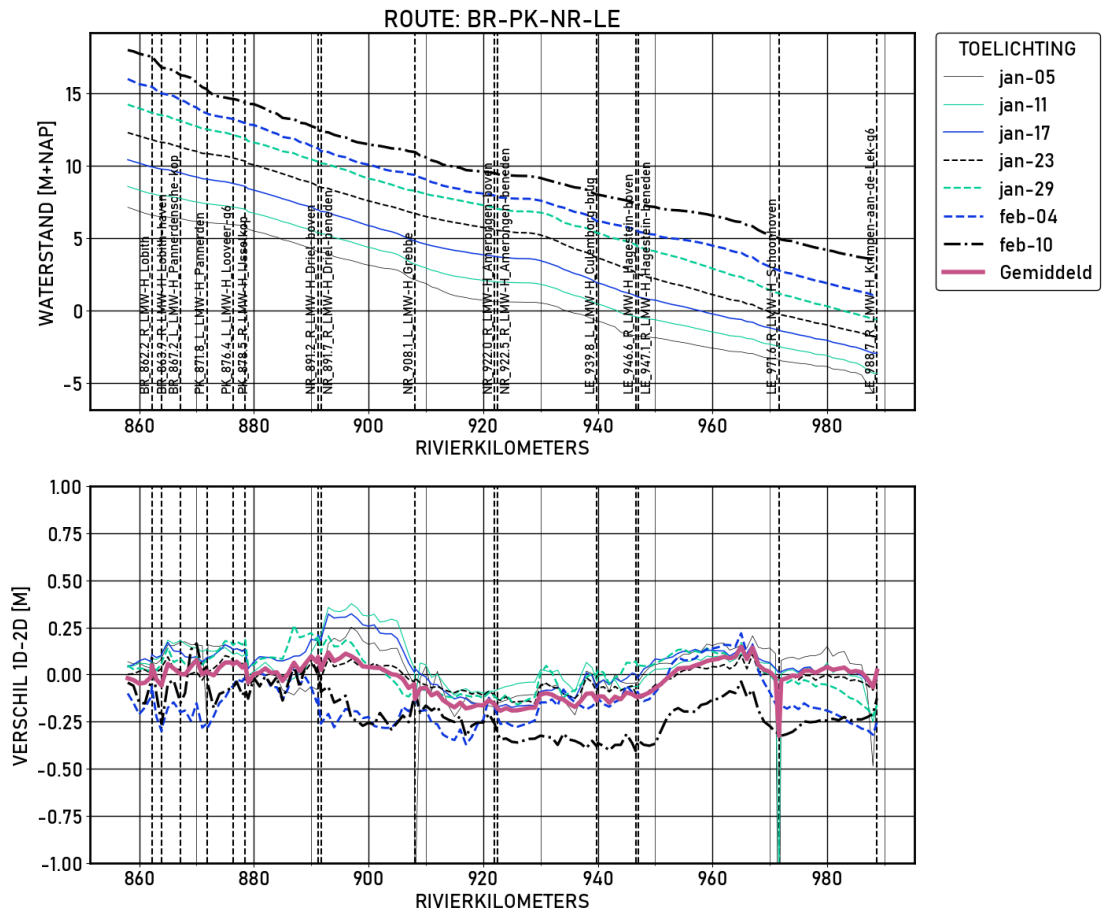
Om te kunnen bepalen in hoeverre de vergelijking met 2D verandert van j22 naar j19, hebben we deze som ook gedraaid met het sobek-rijn-j22-v1a model. De 1D sommen zijn vervolgens vergeleken met het bijpassende 2D model. Dus het 1D j19 model is vergeleken met het D-HYDRO j19 model, en het sobek-rijn-j22_6-v1a model is vergeleken met het D-HYDRO j22 model. Het is niet de verwachting dat deze simulaties leiden tot dezelfde nauwkeurigheid die in kalibratie is gehaald, omdat kalibratie wordt uitgevoerd met kunstwerksturing⁴.

De resultaten laten zien dat het aanpassen van de profielen en winterbedruwheden van j22 naar j19 gemiddeld genomen tot hogere waterstanden leidt in vergelijking met het bijpassende 2D model, met als enige uitzondering de IJssel (Tabel 2.2.3). Deze schijnbare bias van het verschil tussen 1D en 2D suggereert dat herkalibratie na een aanpassing van de profielen en winterbedruwheden mogelijk nodig is. Een grote standaardafwijking duidt erop dat de gemiddelde bias niet evenredig is langs de tak (Figuur 2.4). Het beeld van de afvoerverdeling is vergelijkbaar met eerdere resultaten (Figuur 2.5), met gemiddeld genomen kleine verschillen en op de IJsselkop een opvallend verschil tussen 1D en 2D bij extreme afvoeren (zie Berends et al. (2022) voor meer discussie).

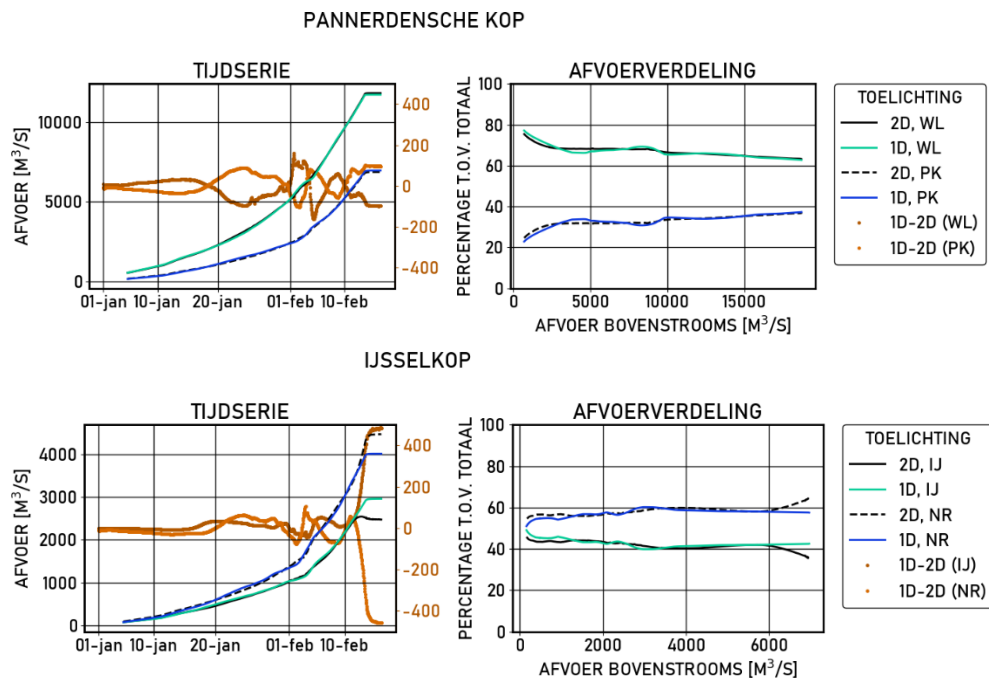
Tabel 2.2.3 Gemiddelde afwijking (bias) van de waterstanden (SOBEK min D-HYDRO) en standaardafwijking van de bias voor alle uitvoerpunten, en voor enkel de LMW locaties. Let op: deze tabel is niet te vergelijken met tabel 3-2 uit de JAMR2022 rapportage (Berends et al., 2022) – dit zijn andere sommen, zie de hoofdtekst voor uitleg.

	Alle uitvoerpunten		LMW locaties	
	j22_6-v1a1	j19_6-v1a2	j22_6-v1a1	j19_6-v1a2
Lek	-0.05±(0.18)	-0.03±(0.19)	-0.15±(0.28)	-0.13±(0.29)
IJssel	0.09±(0.14)	0.08±(0.12)	-0.00±(0.27)	0.00±(0.25)
Waal	0.02±(0.11)	0.05±(0.11)	-0.02±(0.16)	0.00±(0.17)
Bovenrijn	-0.06±(0.09)	-0.01±(0.12)	-0.05±(0.09)	-0.00±(0.13)
Pannerdens Kanaal	-0.01±(0.07)	0.04±(0.11)	-0.01±(0.07)	0.04±(0.10)
Nederrijn	-0.06±(0.11)	-0.04±(0.13)	-0.09±(0.13)	-0.07±(0.15)

⁴ De FM2PROF pilotstudie op de Maas heeft laten zien dat kalibratie met kunstwerksturing leidt tot betere resultaten tijdens validatie.



Figuur 2.4 Vergelijking van waterstanden tussen 1D en 2D op basis van de afleidsom zonder kunstwerksturing. De grote afwijking bij LMW station Schoonhoven komt doordat het station in de 2D som bij zeer lage waterstanden niet meedaalt met de hoofdas van de rivier, in tegenstelling tot het 1D model.



Figuur 2.5 Vergelijking van afvoerverdeling tussen 1D en 2D op basis van de afleidsom zonder kunstwerksturing in j19_6-v1

2.2.4 Overzetten randvoorwaarden en kunstwerksturing

De randvoorwaarden voor het hoogwater van 2018, inclusief laterale toestromingen, zijn overgenomen uit het 2D model, net als de kunstwerksturing. De Bernhardsluizen en het Reevediep⁵ zijn net als in het 2D model dichtgezet.

⁵ Het Reevediep zit niet in het 2D-model dat voor de hoogwatervalidatie is gebruikt, maar wel in de afleidsom voor de profielen en winterbedruwheden van het 1D-model.

3 Validatie hoogwater 2018

3.1 Beschikbare gegevens

Door RWS-ON is een grote hoeveelheid data verzameld voor deze validatie. Een gedeelte van de gegevens wordt in de modelopzet gebruikt om de randvoorwaarden, lateralen en stuwsturing te bepalen (zie paragrafen 2.1.2 en 2.1.3). Overige gegevens worden gebruikt om de modelresultaten te valideren. Het gaat hierbij om de volgende typen data:

- Waterstandsmetingen op LMW-stations, meetfrequentie elke 10 minuten. Bron: RWS-CIV. Door RWS-ON is een correctie uitgevoerd voor station Katerveer in de periode rond 18 januari 2018, zie Bijlage A. Op een groot deel van de locaties is een centraal uurgemiddelde waterstand gebruikt.
- Waterstandsmeting bij Emmerich, meetfrequentie elke 15 minuten. Bron: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), beschikbaar gesteld door de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Waterstandsmetingen bij Voorhavendijk, meetfrequentie elke 15 minuten, omgerekend naar een centraal 2-uurgemiddelde. Bron: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Op deze locatie kan de waterstand op de Lek worden gevalideerd bij gesloten Betuwepand.
- ADM- en ADCP-metingen van de afvoer op verschillende locaties. Bron: RWS-CIV.
- Afvoerreeksen voor Lobith en de splitsingspunten op basis van Qf18, aangevuld met de ADM bij Driel-boven en vereffend om een sluitende waterbalans te verkrijgen.
- Afvoerreeksen op basis van Qh-relaties voor Tiel en Olst uit 2010 en 2013. Vergelijking van het modelresultaat met deze gegevens is meer bedoeld om de prestatie van de Qh-relaties te beoordelen, dan ter validatie van het model.

Een uitgebreide beschrijving van de toegeleverde gegevens is opgenomen in Bijlage A.

3.2 Resultaten D-HYDRO

In paragrafen 0 en 3.2.2 wordt het resultaat van de waterstandsvalidatie bij LMW-stations voor het 2D D-HYDRO-model besproken. De statistieken voor de hele validatieperiode worden gepresenteerd in Tabel 3.1, samen met statistieken voor een venster van 2 dagen rondom de (gemeten) piekwaterstand. Beide statistieken worden in de genoemde paragrafen verder besproken. In Bijlage D.1.1 zijn ook de gemeten en berekende topstand en het verschil daartussen voor alle LMW-stations gegeven. Tabel 3.2 geeft dezelfde statistieken als Tabel 3.1, maar dan samengevoegd per tak.

In paragraaf 3.2.3 wordt de afvoerverdeling bij de splitsingspunten en de validatie van de Qh-relaties bij Tiel en Olst besproken. Paragraaf 3.2.4 gaat in op het effect van het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017, met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december. In paragraaf 3.2.5 worden de validatieresultaten vergeleken met de resultaten van een recente validatie met het model van de Rijn-Maasmonding. Omdat dit model overlap heeft met het Rijntakkenmodel op zowel de Waal als de Lek, kan de prestatie van beide modellen in dit gebied vergeleken worden.

Tijdserie-plots voor gemodelleerde en gemeten waterstanden en het verschil daartussen zijn voor elk LMW-station te vinden in Bijlage D.1.2. De vergelijking voor station Voorhavendijk (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden) is hier ook opgenomen. De validatieresultaten voor de overige gegevens zoals genoemd in paragraaf 3.1 zijn opgenomen in Bijlagen D.2 t/m D.5, met per datatype een korte analyse van de resultaten.

Tabel 3.1 Bias en standaarddeviatie van gemodelleerde min gemeten waterstanden op LMW-stations. Statistieken zijn gegeven voor de hele validatieperiode (8 december 2017 tot 1 april 2018) en voor een venster van 2 dagen rond de gemeten waterstandspiek op elk station. De totale bias over alle stations is het rekenkundig gemiddelde van de biaswaarden. De totale standaarddeviatie is het kwadratisch gemiddelde van de standaarddeviaties.

station	bias [m]	std [m]	bias rond piek [m]	std rond piek [m]	tijdstip piek (gemeten)
RH_851.9_R_BfG_Emmerich	0.029	0.038	-0.087	0.010	10 jan 2018 01:30
BR_862.2_R_LMW-H_Lobith	0.026	0.031	-0.052	0.009	10 jan 2018 03:50
BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven	0.027	0.055	-0.063	0.008	10 jan 2018 03:30
BR_867.2_L_LMW-H_Pann-kop	0.007	0.027	-0.027	0.007	10 jan 2018 02:50
WL_884.9_L_LMW-H_Nijmegen-haven	0.047	0.043	-0.011	0.015	10 jan 2018 04:40
WL_901.4_R_LMW-H_Dodewaard	0.021	0.043	-0.040	0.031	10 jan 2018 11:20
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal-g6	-0.027	0.047	-0.115	0.050	10 jan 2018 10:40
WL_926.1_L_LMW-H_Sint-Andries-Waal	-0.071	0.104	-0.114	0.062	10 jan 2018 08:00
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	-0.048	0.060	-0.099	0.073	10 jan 2018 13:00
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	-0.095	0.081	-0.129	0.044	11 jan 2018 01:40
BO_961.0_C_LMW-H_Hardinxveld-RT	0.001	0.001	0.004	0.000	11 jan 2018 02:20
PK_869.4_R_LMW-H_Gr-Rivier-Pann-ben	-0.420	0.079	-0.524	0.006	13 jan 2018 01:10
PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden	-0.067	0.118	-0.090	0.007	18 dec 2017 08:00
PK_876.4_L_LMW-H_Looveer-g6	0.006	0.030	-0.015	0.010	10 jan 2018 10:30
PK_878.5_R_LMW-H_IJsselkop	0.006	0.035	-0.027	0.015	10 jan 2018 15:10
NR_891.2_R_LMW-H_Driel-boven	0.009	0.034	0.002	0.016	10 jan 2018 14:30
NR_891.7_R_LMW-H_Driel-beneden	-0.017	0.041	-0.024	0.017	10 jan 2018 13:20
NR_908.1_L_LMW-H_Grebbe	-0.012	0.050	-0.015	0.014	10 jan 2018 20:00
NR_922.0_R_LMW-H_Amerongen-boven	0.032	0.058	0.076	0.016	11 jan 2018 03:50
NR_922.5_R_LMW-H_Amerongen-ben	0.003	0.058	0.003	0.018	11 jan 2018 04:40
AR_70.8_L_LMW-H_Tiel-Kanaal	0.038	0.122	0.193	0.213	14 jan 2018 04:30
LE_939.8_L_LMW-H_Culemborg-brug	0.007	0.040	0.005	0.015	11 jan 2018 04:40
LE_946.6_R_LMW-H_Hagestein-boven	0.028	0.054	0.069	0.021	11 jan 2018 02:30
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	0.030	0.061	0.030	0.021	11 jan 2018 14:50
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	0.017	0.037	-0.024	0.049	03 jan 2018 17:00
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-ad-Lek	-0.003	0.002	-0.003	0.002	03 jan 2018 16:20
IJ_879.1_R_LMW-H_HPleij-hwgeul	0.019	0.416	-0.022	0.021	10 jan 2018 11:10
IJ_879.6_R_LMW-H_Pleij-IJssel	0.011	0.030	-0.005	0.013	10 jan 2018 13:40
IJ_881.1_R_LMW-H_Westervoort-IJsseld	-0.024	0.030	-0.031	0.016	10 jan 2018 11:20
IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg	-0.026	0.040	0.019	0.014	10 jan 2018 15:10
IJ_903.0_R_LMW-H_Doesburg-brug	-0.067	0.055	0.026	0.007	10 jan 2018 21:50
IJ_929.3_L_LMW-H_Zutphen-noord	-0.123	0.065	-0.016	0.007	11 jan 2018 09:30
IJ_931.2_R_LMW-H_Eefde-beneden	-0.132	0.065	-0.020	0.004	11 jan 2018 09:30
IJ_945.0_R_LMW-H_Deventer	-0.126	0.087	0.017	0.003	11 jan 2018 06:00
IJ_957.1_R_LMW-H_Olst	-0.075	0.068	0.013	0.004	11 jan 2018 10:00
IJ_965.2_R_LMW-H_Wijhe	-0.075	0.037	-0.043	0.007	11 jan 2018 13:50
IJ_980.8_R_LMW-H_Katerveer	-0.032	0.038	-0.029	0.005	11 jan 2018 19:00
IJ_994.5_L_LMW-H_Kampen-bhaven	0.005	0.046	-0.047	0.179	18 jan 2018 13:40
IJ_1001.3_L_LMW-H_Keteldiep	0.015	0.045	0.002	0.194	18 jan 2018 13:20
KM_LMW-H_Ramspolbrug-RT	0.029	0.047	0.049	0.181	18 jan 2018 13:00
KM_LMW-H_Ketelhaven	0.024	0.055	0.081	0.143	18 jan 2018 12:40
KM_LMW-H_Kamperhoek	0.002	0.003	0.003	0.006	03 jan 2018 16:50
VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord	0.031	0.058	0.020	0.239	18 jan 2018 13:20
totaal	-0.023	0.085	-0.025	0.076	

Tabel 3.2 Statistieken uit Tabel 3.1, samengevoegd per tak. De bias per tak is het rekenkundig gemiddelde van de biaswaarden van de betreffende stations. De standaarddeviatie per tak is het kwadratisch gemiddelde van de standaarddeviaties van de betreffende stations. Waarden ≤ -0.1 of ≥ 0.1 m zijn gemarkeerd.

tak	bias [m]	std [m]	bias rond piek [m]	std rond piek [m]
BR	0.02	0.04	-0.06	0.01
W	-0.02	0.06	-0.07	0.05
PK	-0.12	0.07	-0.16	0.01
NR	0.01	0.06	0.03	0.07
IJ	-0.03	0.11	0.00	0.10

3.2.1 Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018

Over de hele periode is de bias van het model ten opzichte van de meting voor de meeste stations kleiner dan 5 cm. Uitzonderingen hierop zijn:

Sint-Andries Waal (-7.1 cm, Figuur 3.1): Bij lage afvoeren ($< 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith) zijn de gemeten waterstanden tot 30 cm hoger dan de waterstanden uit het model. Bij omliggende stations is dat niet het geval. Deze discrepantie tussen model en meting bij Sint-Andries is eerder geconstateerd in Kusters et al. (2022), alleen was het verschil in die studie over het hele afvoerbereik zichtbaar. Mogelijke oorzaken zijn:

- een fout in de schematisatie van de vaste laag op deze locatie, of
- een fout in de waterstandsmeting zelf.

Vuren (-9.5 cm, Figuur 3.2): de waterstanden worden hier gedurende de hele validatieperiode onderschat door het model, maar de verschillen zijn het grootst tijdens de drie hoogwaterpieken.

Groene rivier Pannerden beneden (-42 cm, Figuur 3.3): In het model stroomt de Groene Rivier onvoldoende in vanuit benedenstroomse richting, waardoor het meetpunt droog blijft. De meting laat zien dat het meetpunt gedurende de tweede en de derde hoogwaterpiek wel overstromde. In werkelijkheid vindt het instromen waarschijnlijk grotendeels plaats via een duiker in de zomerkade tussen de Groene rivier en het uitstroomkanaal vanemaal Kandia.

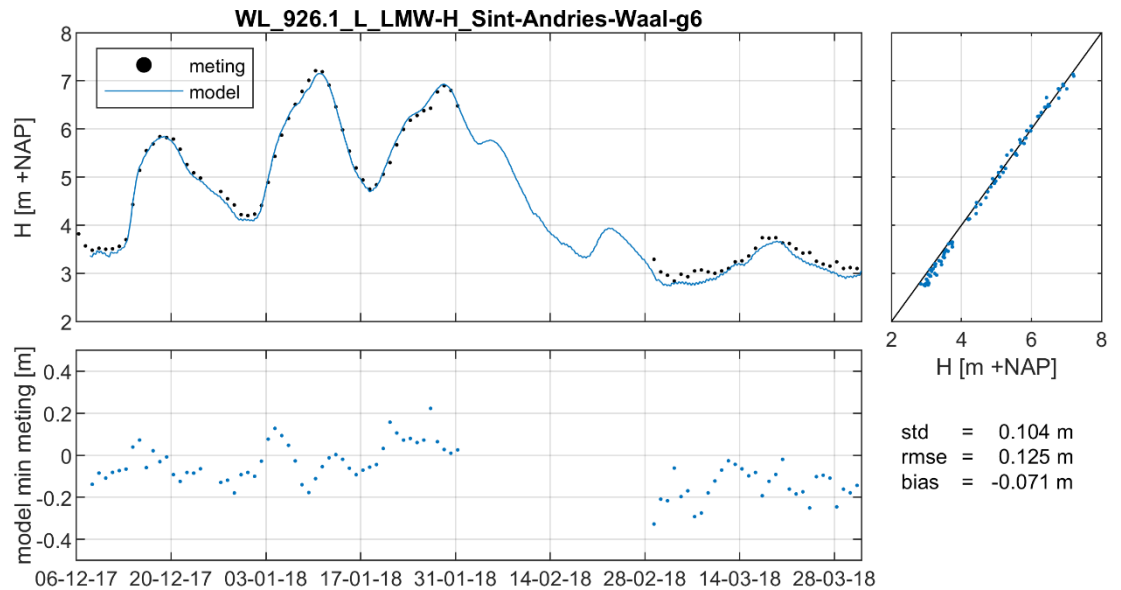
Bij **Pannerden** (-6.7 cm, Figuur 3.4) zijn alleen meetgegevens beschikbaar gedurende de eerste hoogwaterpiek. Rondom en na de piek is de waterstand in het model tot 25 cm lager dan gemeten.

Doesburg-brug (-6.7 cm), **Zutphen-Noord** (-12.3 cm), **Eefde-beneden** (-13.2 cm), **Deventer** (-12.6 cm), **Olst** (-7.5 cm) en **Wijhe** (-7.5 cm): Op de IJssel (ongeveer vanaf De Steeg) zien we onderschattingen van de waterstand ten opzichte van de metingen. Alleen bij de tweede en derde piek worden de waterstanden goed gerepresenteerd. De onderschatting bij overige afvoeren neemt toe in benedenstroomse richting, en is het grootst bij Eefde-beneden (Figuur 3.5) en Deventer. Daarna nemen de verschillen weer af, omdat de resultaten in benedenstroomse richting in toenemende mate worden beïnvloed door de waterstand op het Ketelmeer (benedenstroomse randvoorwaarde). Als we kijken naar de afvoer op de IJsselkop, dan komt deze goed overeen met de ADCP-metingen (zie Bijlage D.4).

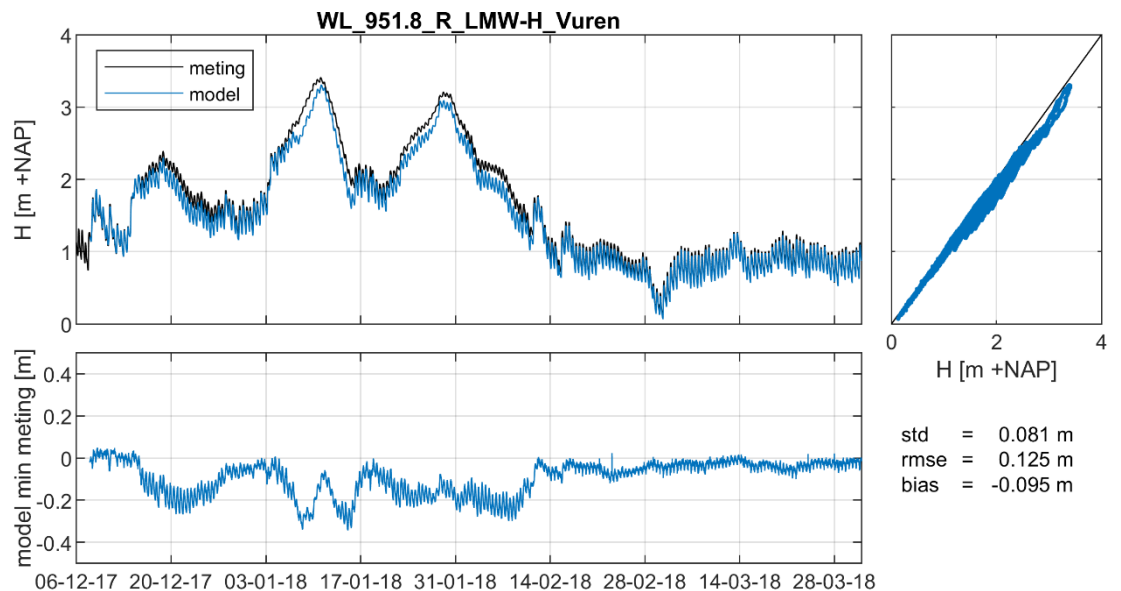
Verder valt de hoge standaarddeviatie bij **Hondsbroeksche Pleij hoogwatergeul** (41.6 cm, Figuur 3.6) op. Net als bij de Groene Rivier Pannerden wordt de in- en uitstroom van deze hoogwatergeul niet goed gerepresenteerd in het model. Bij de eerste piek blijft het meetpunt in het model droog, terwijl in werkelijkheid wel overstroming plaatsvond.

Bij de tweede piek stroomt de geul ruim 3 dagen te laat in, waardoor het verschil tussen model en meting oploopt tot 1.05 m. Rondom de tweede en derde piek is de prestatie van het model relatief goed, maar wanneer de waterstand na beide pieken daalt stroomt de hoogwatergeul niet goed leeg. In deze perioden zijn de gemodelleerde waterstanden dus juist veel te hoog. Over de hele periode is het resultaat een kleine bias, maar een zeer hoge standaarddeviatie. De verschillen worden veroorzaakt door:

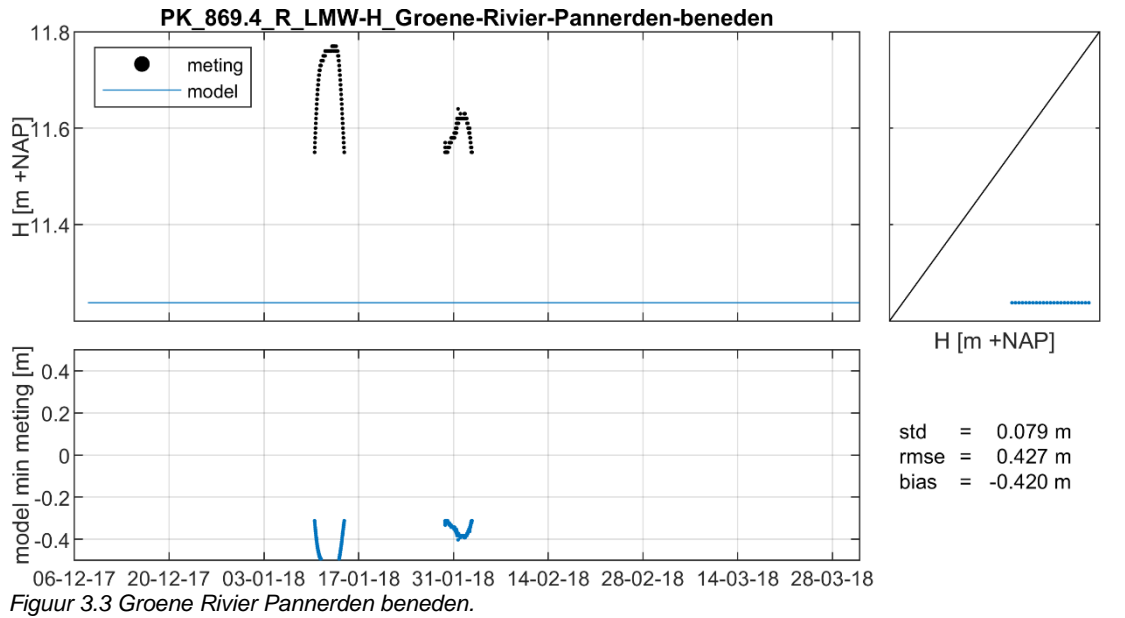
- Het ontbreken van een duiker bij rkm 880.3. In werkelijkheid stroomt de geul vanuit benedenstroomse richting in via deze duiker. Ook het leegstromen gaat via deze duiker.
- De te grove roosterresolutie om de bodemhoogte van de instroomgeul van de uiterwaard bovenstrooms van het regelwerk goed weer te geven. In het model is hier pas instroom mogelijk vanaf waterstanden rond 12 m +NAP, terwijl de instroom in werkelijkheid plaatsvindt vanaf een waterstand van ongeveer 10 m +NAP.



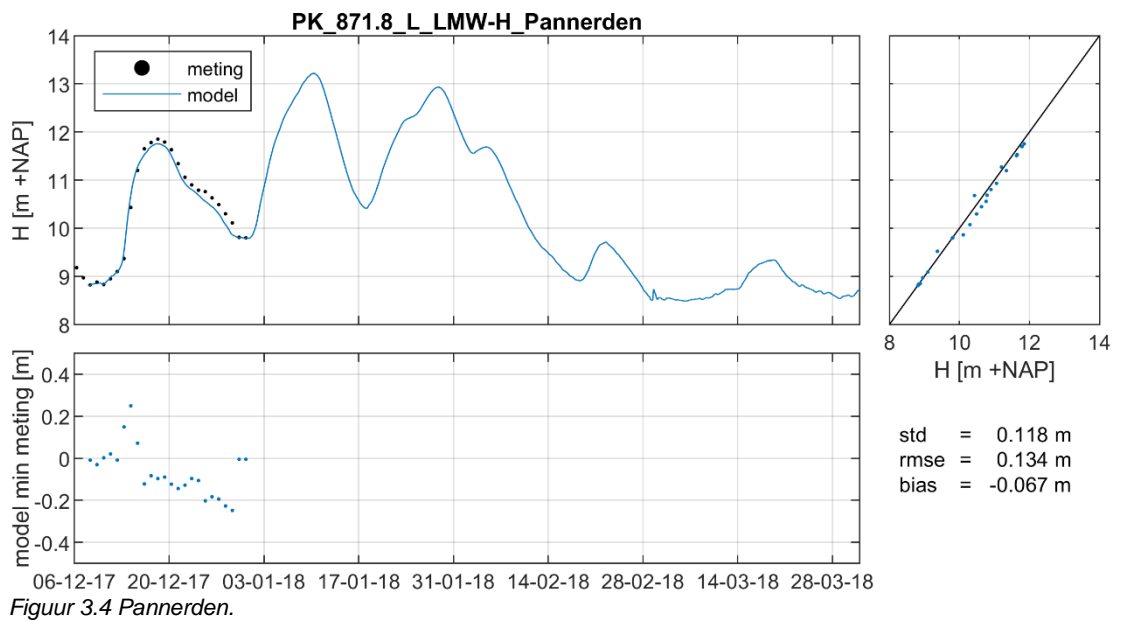
Figuur 3.1 Sint-Andries Waal.



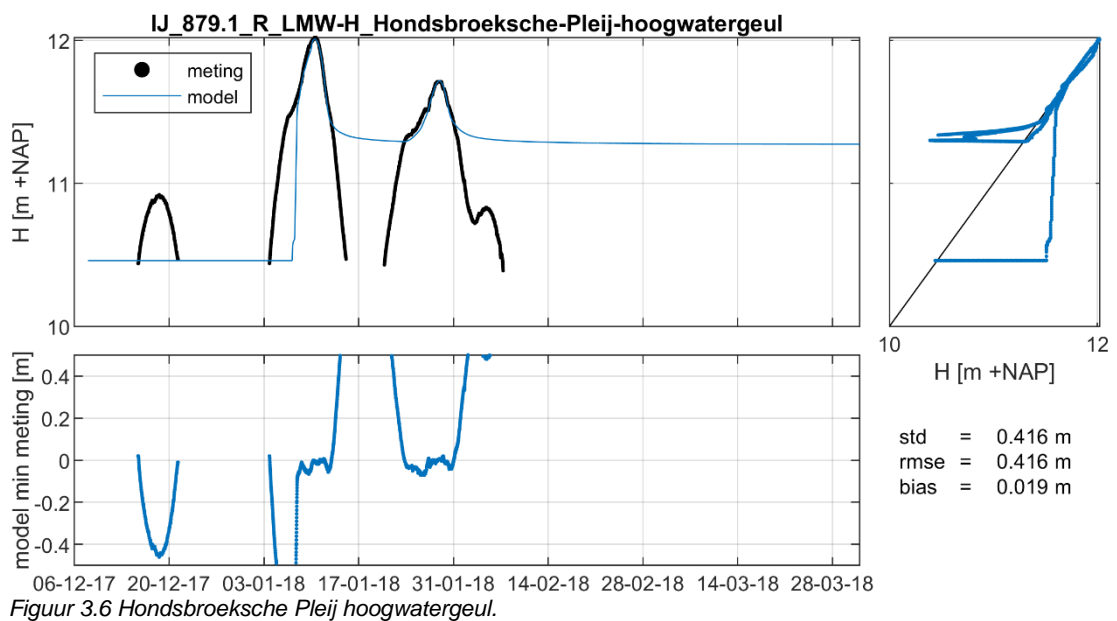
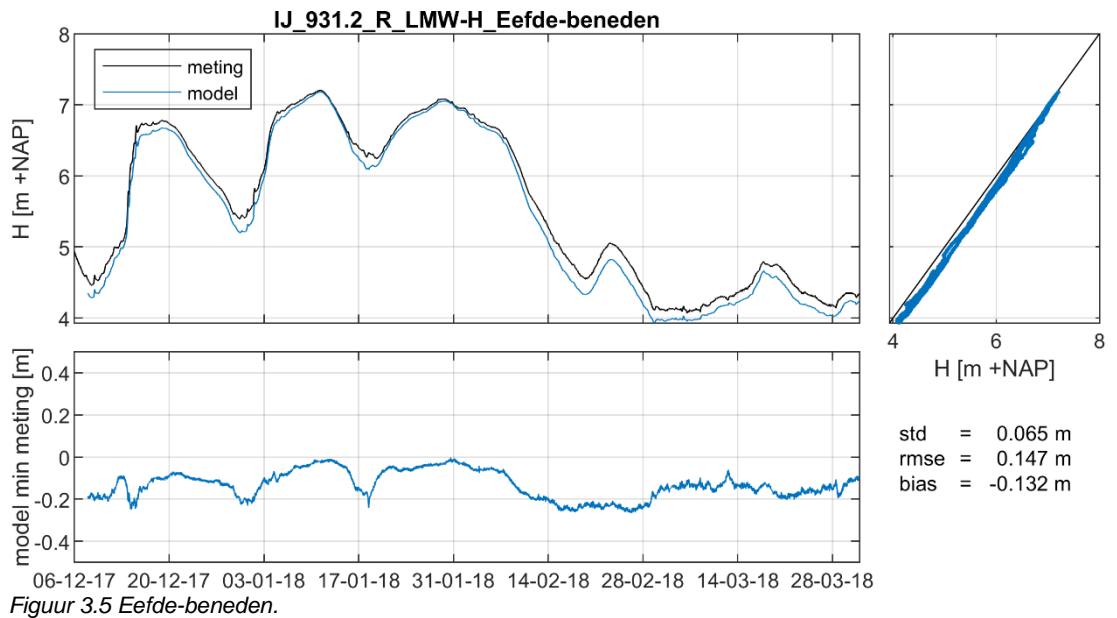
Figuur 3.2 Vuren.



Figuur 3.3 Groene Rivier Pannerden beneden.



Figuur 3.4 Pannerden.



3.2.2 Hoogwaterpiek 10 januari 2018

De vierde en vijfde kolom van Tabel 3.1 geven de statistieken in een venster van 2 dagen rondom de gemeten piekwaterstand op elke LMW-locatie. In de zesde kolom is het tijdstip van de gemeten piek opgenomen. Op de meeste stations treedt de piek op 10 of 11 januari op. Tijdstippen die hiervan afwijken zijn geel gemarkeerd.

Als we kijken naar de bias vallen vooral de Boven-Rijn en de Waal in negatieve zin op. Op de Neder-Rijn heeft het model bij Amerongen- en Hagestein-boven een relatief grote positieve bias ten opzichte van de metingen. Ook bij Tiel-Kanaal (op het Betuwepand) is de bias en standaarddeviatie groot. Bij overige locaties op de Neder-Rijn – Lek en ook op de IJssel wordt de gemeten piekwaterstand goed benaderd door het model. Hieronder worden de meest opvallende resultaten nader besproken.

Op de **Boven-Rijn** wordt het verloop van de hoogwaterpiek goed gevolgd, maar zijn de piekwaterstanden in het model te laag. De onderschatting van de topstand is het grootst bij Emmerich (-9 cm, zie Figuur 3.7) en neemt daarna iets af. Ook bij de derde piek is op de Boven-Rijn een onderschatting te zien, zij het in iets mindere mate.

Ook langs de gehele **Waal** zijn de piekwaterstanden in het model lager dan in de metingen. De aanloop van het hoogwater wordt de eerste dagen (vanaf 1 januari) redelijk goed gevolgd, hoewel de waterstanden bij aanvang van de hoogwatergolf te laag zijn en de waterstanden iets te snel stijgen. Vlak voor de piek vlakken de gemodelleerde waterstanden echter af, waardoor de piek later en lager is dan blijkt uit metingen. Dit effect is het sterkst vanaf Dodewaard en verder benedenstrooms (zie bijvoorbeeld Tiel-Waal in Figuur 3.8, met een onderschatting van de topstand van 9 cm), en lijkt te worden veroorzaakt door instroom van uiterwaarden vlak voor de piek. In werkelijkheid zijn deze gebieden mogelijk eerder en langzamer of gelijkmatiger overstroomd. Dit zou de aanvankelijk minder snelle waterstandsstijging verklaren die in de metingen te zien is.

Op de **Neder-Rijn – Lek** wordt met name de derde piek overschat (niet opgenomen in de statistieken). Dit is al te zien vanaf Driel-boven, maar het verschil tussen model en meting neemt toe in benedenstroomse richting (zie bijvoorbeeld Grebbe in Figuur 3.9). Bij Amerongen-boven (Figuur 3.10) is het verschil zo'n 20 cm. Wat ook opvalt is dat de kleinere piek direct na het derde hoogwater (in de periode 3 tot 7 februari) in de metingen meer afvlakt in benedenstroomse richting dan in het model. Ook dit is goed te zien bij Amerongen-boven.

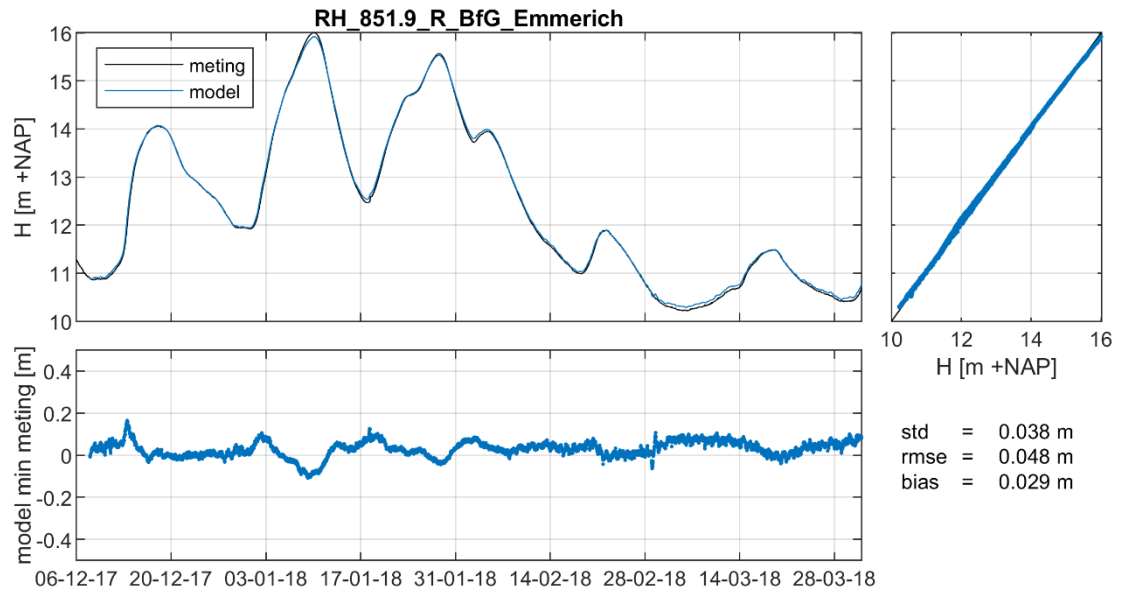
Bij de tweede piek wordt vooral de vorm niet goed gevolgd: in de aanloop stijgen de waterstanden in het model te snel. De piekwaterstanden worden redelijk voorspeld, maar vervolgens dalen de waterstanden teveel, waardoor ze bij aanvang van de derde piek te laag zijn. Alleen bij Amerongen- en Hagestein- boven wordt ook de tweede piek overschat. Hieruit blijkt dat het verval over de stuwen in het model te groot is (zie ook Bijlage D.2).

Bij **Tiel-kanaal** kan niet worden gesproken van een hoogwaterpiek, omdat het Betuwepand bij hoogwater aan beide kanten wordt afgesloten door de Bernhardsluizen, de Marijkesluizen en de keerschuiif Ravenswaaij. Dit gebeurde bij beide pieken in januari 2018. In afgesloten situatie wordt de waterstand op het pand op peil gehouden met het gemaal Marijkesluizen. In paragraaf 2.1.3.2 werd uitgelegd hoe de in het model opgelegde gemaalafvoer tijdens de hoogwaters is bepaald op basis van de gemeten waterstandsverandering en de lozingen op het kanaalpand.

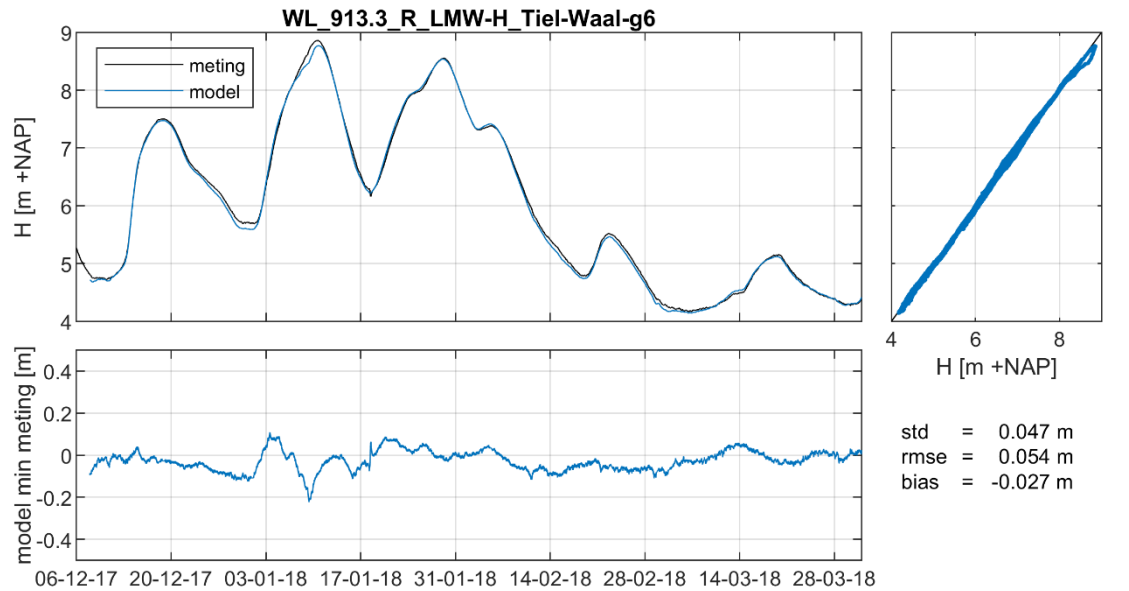
In Figuur 3.11 is echter te zien dat dit niet tot een goed resultaat leidt. Ten eerste is de waterstand op de Lek (en dus op het kanaal) vlak voor sluiting van de Marijkesluizen (op 6 en 25 januari) al veel te hoog. Dit blijkt ook uit de extra waterstandsvalidatie bij Voorhavendijk (zie Figuur D.23 in Bijlage D.1.2). Omdat de gemaalafvoer is berekend op basis van de gemeten waterstandsveranderingen daalt de waterstand op het Betuwepand na sluiting niet ver genoeg. Daarnaast is in beide periodes te zien dat het waterstandsverschil (gemiddeld gesproken) toeneemt gedurende de gesloten situatie. Dat betekent dat de gemaalafvoer te laag is ingeschat. Dit komt door het ontbreken van de lekverliezen bij de sluisen bij de bepaling van de gemaalafvoer.

De piekwaterstanden op de **IJssel vanaf Kampen-Bovenhaven** en op het **Ketelmeer** zijn gemeten op 18 januari. Dit hangt samen met een storm. Omdat de invloed van wind niet wordt meegenomen in het model (behalve via de benedenstroomse randvoorwaarde) worden deze piekwaterstanden fors onderschat (zie ook de vergelijking van topstanden in Bijlage D.1.1). Overigens is op meer meetstations te zien dat de storm een klein waterstandseffect heeft, bijvoorbeeld bij Looveer en IJsselkop.

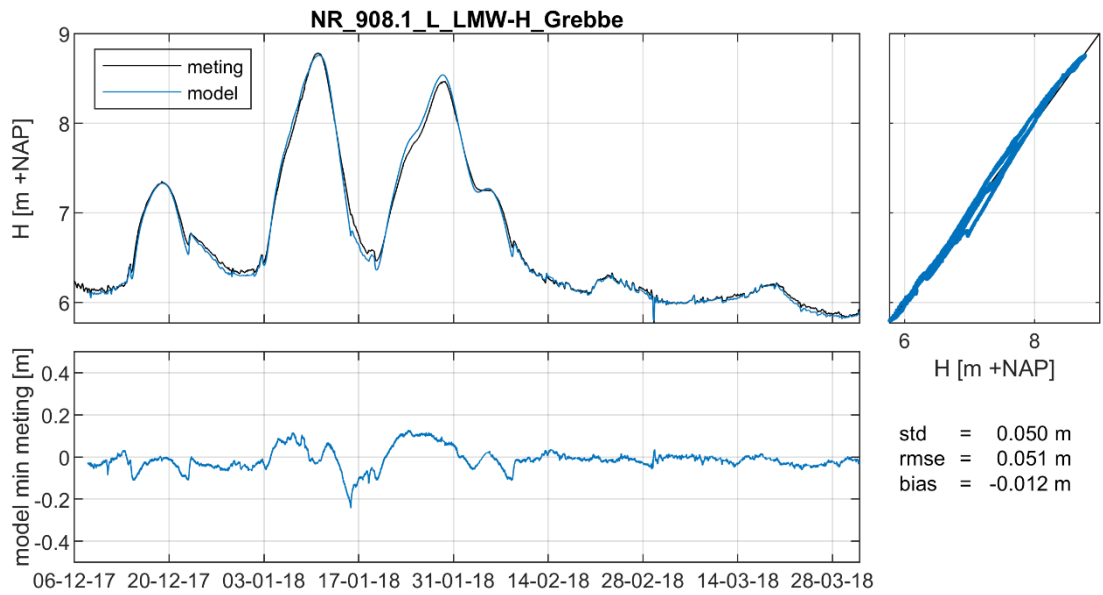
Ook op 3 januari was er een storm; bij Kamperhoek werden bij deze storm nog net iets hogere waterstanden gemeten dan op 18 januari. Deze storm leidt ook tot de hoogste waterstanden benedenstrooms op de Lek.



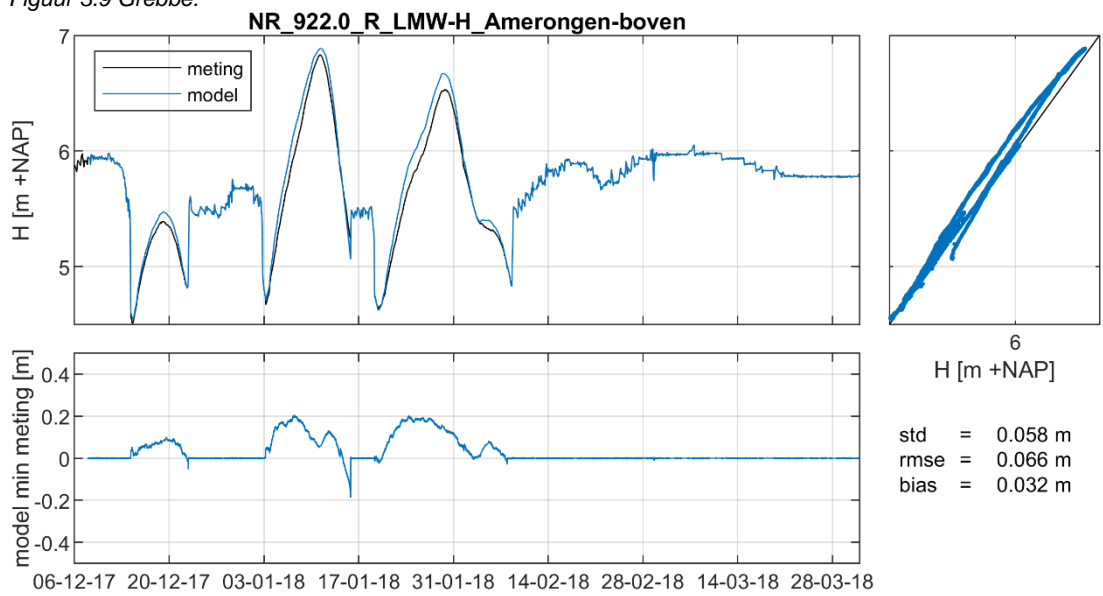
Figuur 3.7 Emmerich.



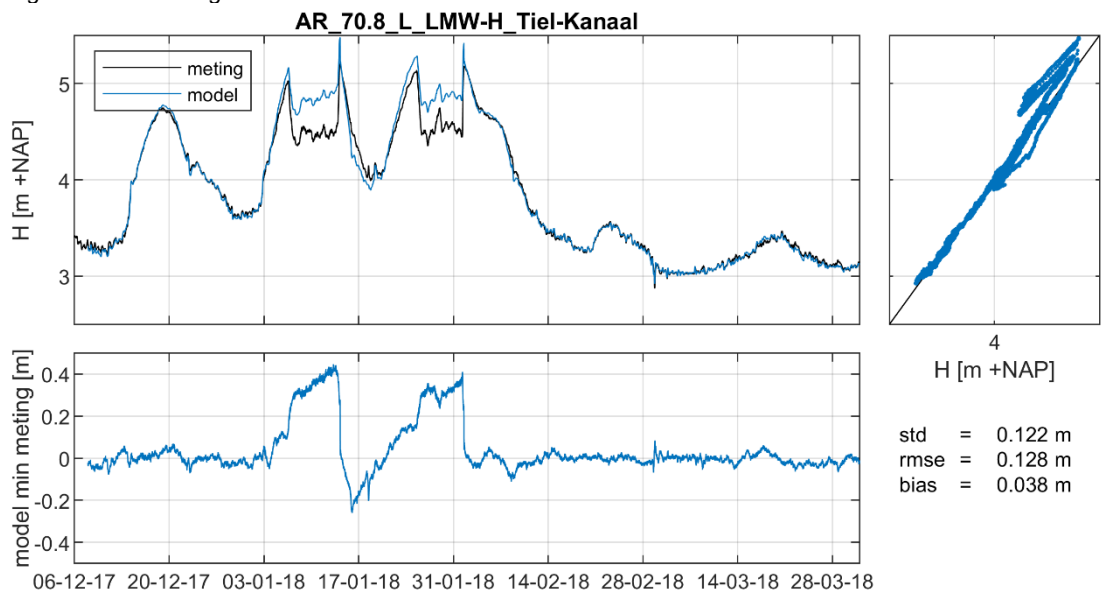
Figuur 3.8 Tiel-Waal.



Figuur 3.9 Grebbe.



Figuur 3.10 Amerongen-boven.



Figuur 3.11 Tiel-kanaal.

3.2.3 Afvoeren

Alle afvoerfiguren van de D-HYDRO-validatie zijn te vinden in Bijlagen D.3 t/m D.5, inclusief een analyse van de resultaten. In deze paragraaf worden de resultaten voor de afvoerverdeling op de splitsingspunten en de validatie van de Qh-relaties bij Tiel en Olst samengevat.

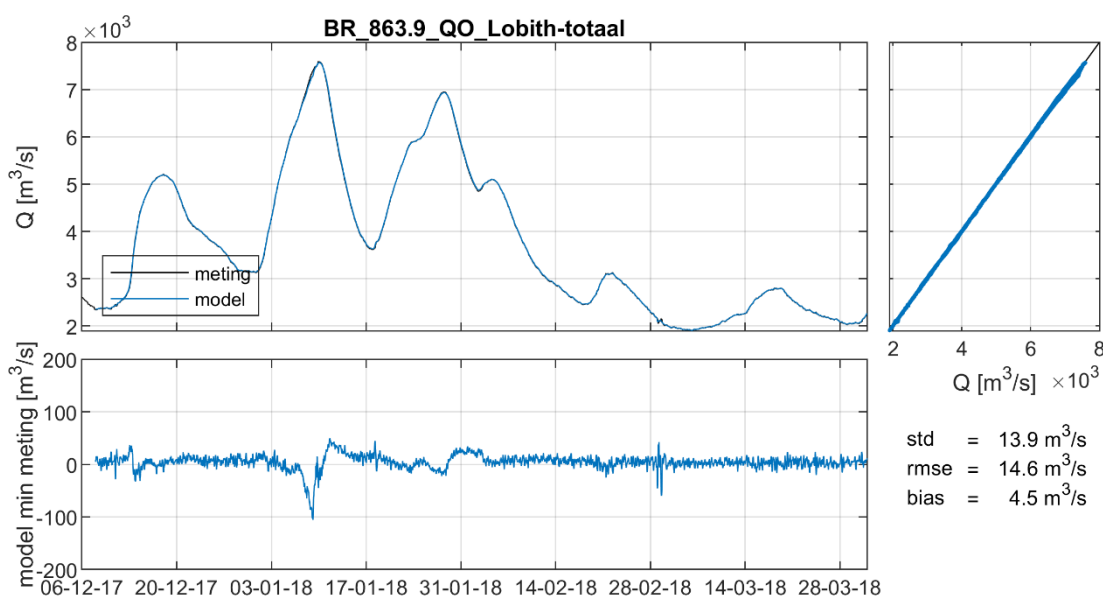
3.2.3.1 Splitsingspunten

Gedurende de drie hoogwaterpieken gaat er te weinig afvoer naar de Waal en teveel naar het Pannerdens Kanaal. De afwijking is ordegrrootte $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Alleen de afvoerpiek van het tweede hoogwater op het Pannerdens Kanaal wordt relatief goed ingeschat. Dit is opvallend, omdat de piek op de Waal te laag is in het model.

Het surplus van het Pannerdens Kanaal gaat in zijn geheel naar de Neder-Rijn, waardoor de afvoeren ook hier te hoog zijn. De overeenkomst tussen gemeten en gemodelleerde afvoer naar de IJssel is juist zeer goed (bias slechts $-1 \text{ m}^3/\text{s}$). Alleen de vorm van de eerste hoogwaterpiek op de IJssel wordt in het model niet goed weergegeven, maar mogelijk klopt de geconstrueerde meetreeks hier niet.

Opvallend genoeg wordt in vergelijking met de ADCP-metingen bij de splitsingspunten de piekafvoer van het tweede hoogwater naar alle takken onderschat. Het verschil is ongeveer $100 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal en het Pannerdensch Kanaal, terwijl de piekafvoer naar Neder-Rijn en IJssel respectievelijk 56 en $72 \text{ m}^3/\text{s}$ lager is dan de meting.

Op de Boven-Rijn valt op dat de vorm van het tweede hoogwater in een venster van ongeveer 6 dagen rondom de piek niet goed wordt weergegeven (zie Figuur 3.12). In de aanloop is de gemodelleerde afvoer lager dan de meting, en na afloop juist hoger. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door berging op de Boven-Rijn. Met een correctie van de afvoerrandvoorwaarde bij Dornick kan dit worden verbeterd.



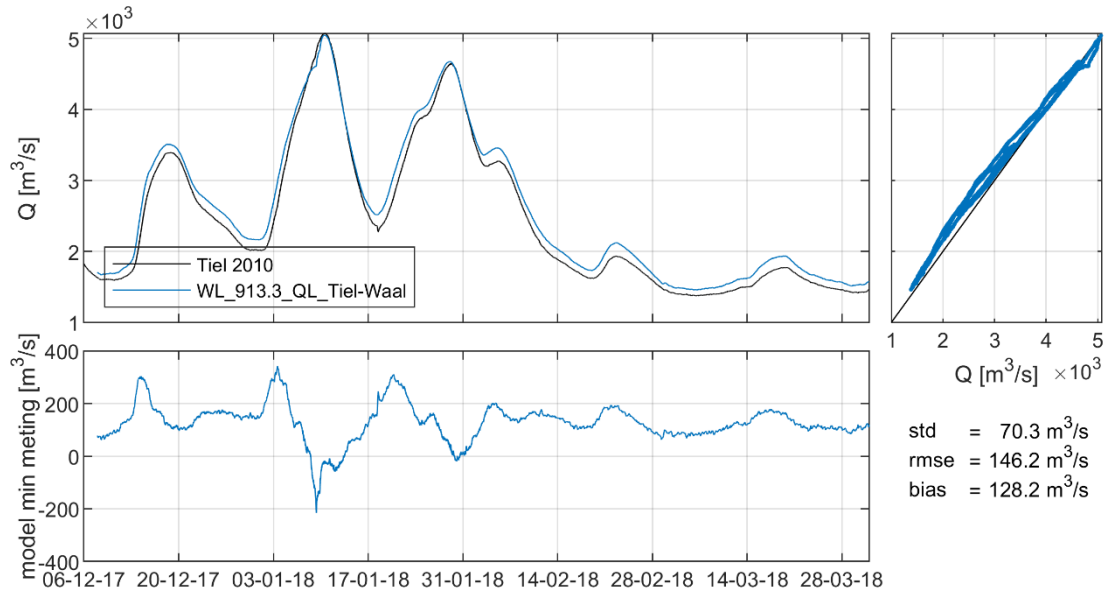
Figuur 3.12 Afvoer bij Lobith.

3.2.3.2 Validatie Qh-relaties Tiel en Olst

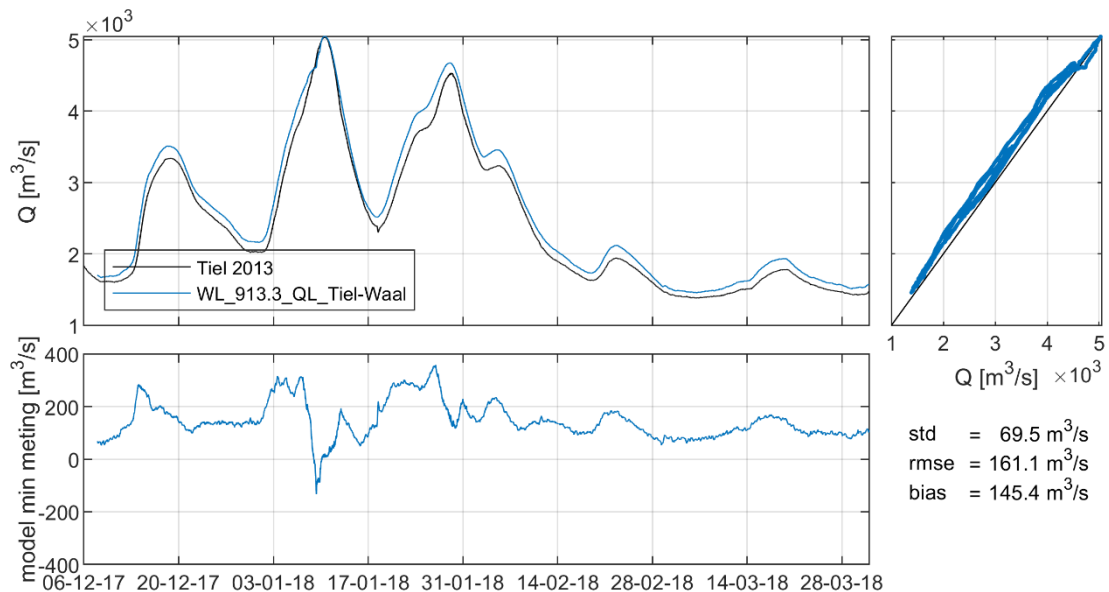
De afvoer op basis van de Qh-relaties uit 2010 en 2013 voor Tiel is zeer verschillend van de gemodelleerde afvoer (zie Figuur 3.13 en Figuur 3.14). In het hele afvoerbereik zijn de Qh-afvoeren lager dan de afvoer uit het model. Verschillen lopen op tot ruim $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

De Qh-relatie uit 2013 komt bij lage afvoeren iets dichterbij het model dan de relatie uit 2010, maar bij de drie hoogwaterpieken is het verschil met het model juist groter. Alleen de maximale afvoer op basis van het model en de Qh-relaties is vergelijkbaar.

Bij Olst zijn de verschillen tussen model en Qh-relaties bij lage afvoeren klein, maar bij de drie pieken nemen de verschillen sterk toe. Met beide Qh-relaties wordt de vorm van de pieken heel anders ingeschat dan in het model. De Qh-relatie uit 2013 heeft wel een beduidend betere overeenkomst met het model in het middelhoge en hoge afvoerbereik.



Figuur 3.13 Afvoer Tiel Qh 2010.



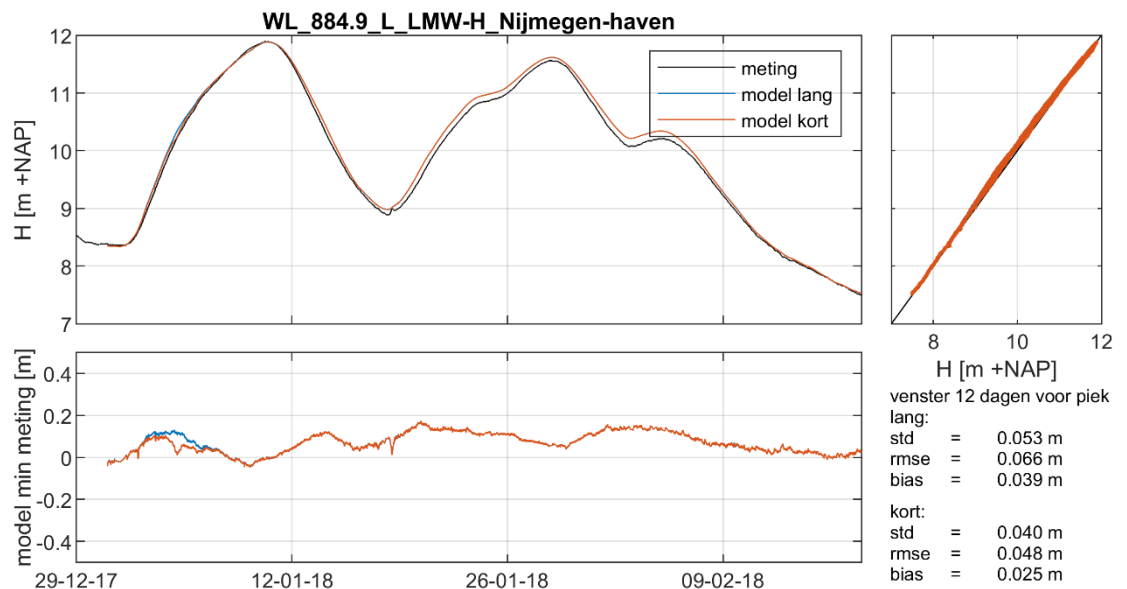
Figuur 3.14 Afvoer Tiel Qh 2013.

3.2.4 Effect hoogwaterpiek december 2017

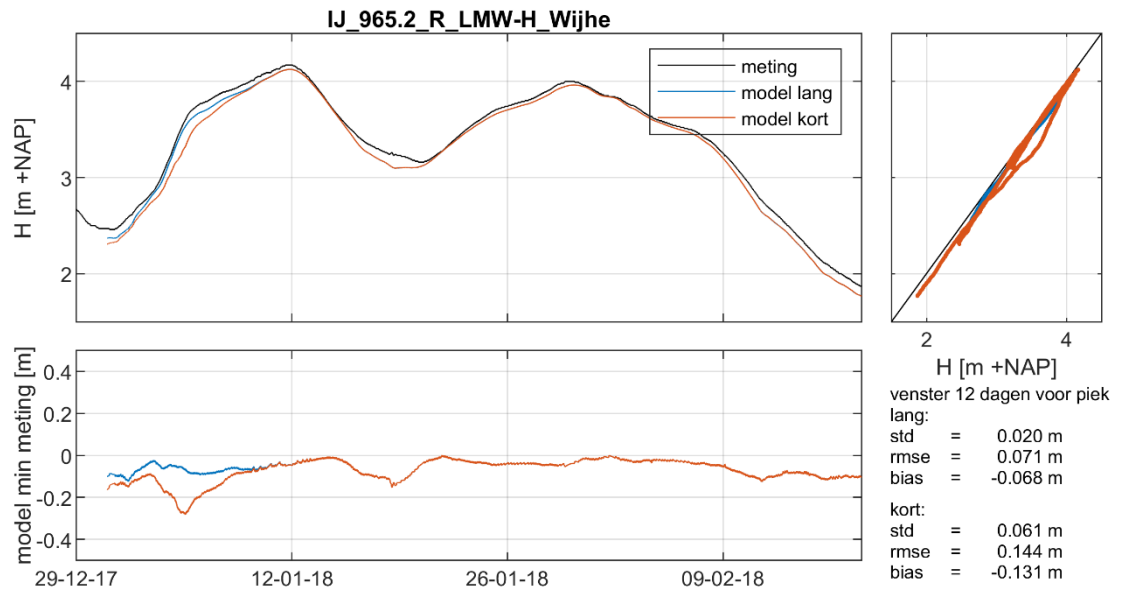
Het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017 (met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december) heeft geen effect op de gemodelleerde piekwaterstanden bij het tweede hoogwater. Alleen in de aanloop naar het tweede hoogwater is een verschil zichtbaar, in het afvoerbereik van het eerste hoogwater. Het weglaten van de maand december leidt tot lagere waterstanden in de aanloop doordat de uiterwaarden nog niet onder zijn gelopen.

Op de meeste locaties leidt dit tot een betere overeenkomst met de metingen, zie bijvoorbeeld Nijmegen in Figuur 3.15. Op de stations langs de IJssel wordt het resultaat echter juist (veel) slechter, bijvoorbeeld bij Wijhe (Figuur 3.16). Op deze locaties werd de vorm van de afvoerpiek in de lange validatieperiode al niet goed gerepresenteerd, en in de korte validatieperiode verslechtert de modelprestatie nog verder. Blijkbaar is hier dus water achtergebleven in de uiterwaarden na de eerste golf.

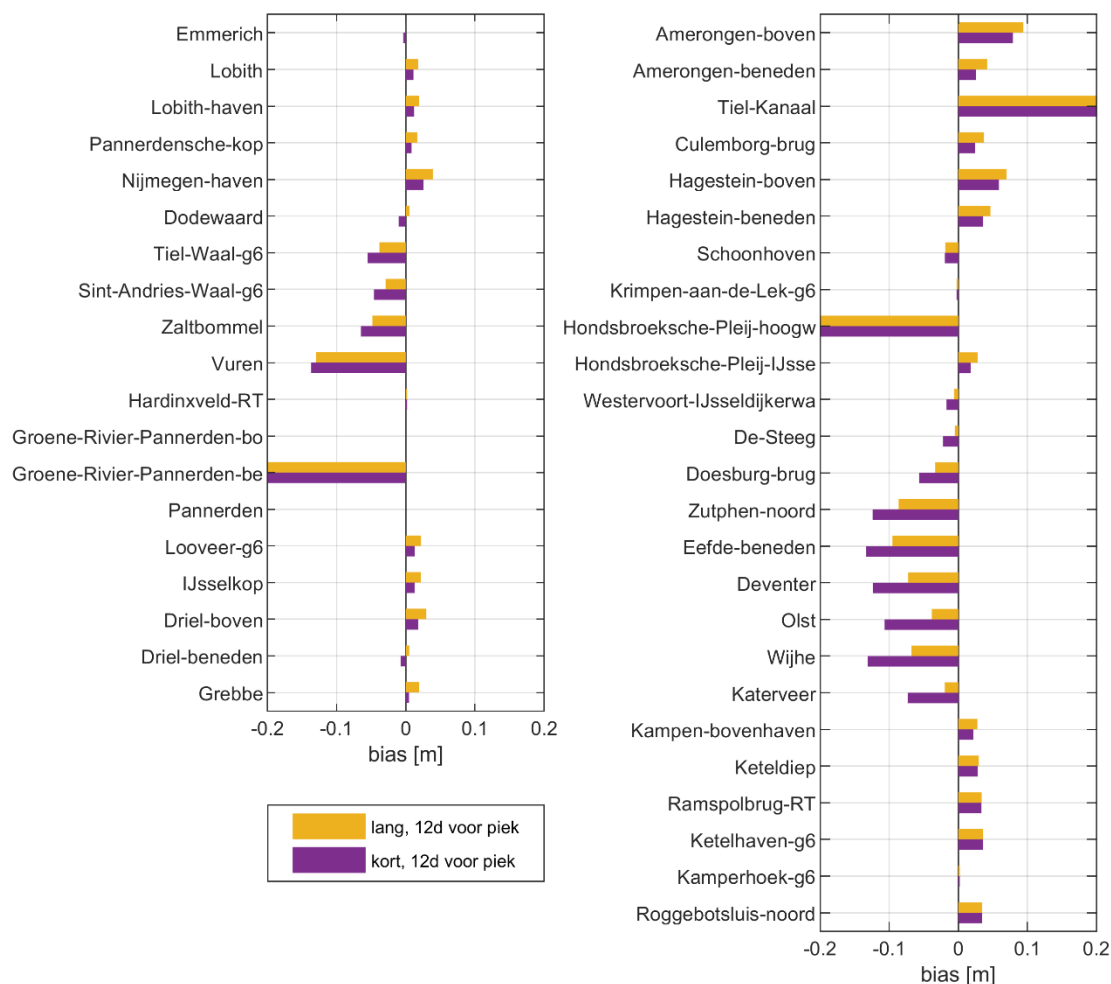
Figuur 3.17 geeft een overzicht van de bias in een venster van 12 dagen voor de gemeten waterstandspiek bij elk station, voor de lange en korte validatieperiode. Het hierboven geschetste beeld is in deze vergelijking duidelijk zichtbaar. In Bijlage D.1.3 zijn tijdserie-plots met vergelijkingen voor alle LMW-stations opgenomen.



Figuur 3.15 Nijmegen-haven, lange en korte validatieberekening.



Figuur 3.16 Wijhe, lange en korte validatieberekening.



Figuur 3.17 Bias van gemodelleerde min gemeten waterstanden op LMW-stations. Statistieken zijn gegeven voor een venster van 12 dagen voor de gemeten waterstandspiek op elk station, voor de complete validatieberekening (lang) en de berekening zonder de eerste hoogwaterpiek (kort).

3.2.5 Vergelijking RMM

Recent is met het 2D-model van de Rijn-Maasmonding (RMM) een validatie voor het jaar 2018 uitgevoerd (Zijlker et al., 2022). Het RMM-model overlapt deels met het Rijntakkenmodel, namelijk op de Waal vanaf Tiel en op de Lek vanaf Hagestein.

Bij Tiel is de afvoer op basis van de Qh-relatie uit 2010 als randvoorwaarde gebruikt. In paragraaf 3.2.3.2 en Bijlage D.5 wordt duidelijk dat deze Qh-relatie niet (meer) representatief is voor de validatieperiode december 2017 tot april 2018. Het gebruik van deze verouderde relatie kan deels verklaren waarom de waterstanden bij Tiel en Zaltbommel in het RMM-model te laag zijn (bias respectievelijk -9.8 en -5.1 cm over het hele jaar, en zelfs -11.4 en -13.1 cm bij $Q_{Lobith} > 4300 \text{ m}^3/\text{s}$). Het Rijntakkenmodel geeft op deze locaties echter ook te lage waterstanden (bias -2.7 en -4.8 cm in de periode 8 december 2017 – 1 april 2018).

Bij Vuren presteert het RMM-model over heel 2018 goed (bias 0.5 cm), maar bij verhoogde afvoeren ($Q_{Lobith} > 4300 \text{ m}^3/\text{s}$) zeer slecht (bias -24.8 cm). Het Rijntakkenmodel geeft bij deze locatie ook veel te lage waterstanden (bias -9.5 cm over de hele validatieperiode, en nog groter gedurende de drie hoogwaterpieken). Mogelijk is de zomerbedruwheid hier te laag. De ruwheid in het overlapgebied op de Waal is bepaald met het Rijntakkenmodel en overgenomen in het RMM-model. De ruwheid die geldt rondom de tweede en derde hoogwaterpiek is gekalibreerd op basis van het hoogwater van januari 2011. Bij de eerste hoogwaterpiek geldt bij benadering een ruwheid op basis van de afvoerpiek van januari 2016.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de kalibratiefactor voor de ruwheid afhankelijk is van de lokale afvoer. Omdat de afvoer die in het RMM-model wordt opgelegd verschilt van de afvoer in het Rijntakkenmodel is de gebruikte kalibratiefactor (en dus de resulterende ruwheid) ook verschillend in de twee modellen.

In het overlapgebied op de Lek (LMW-stations Schoonhoven en Krimpen aan de Lek⁶) presteren beide modellen relatief goed. In het RMM-model wordt bij Hagestein een randvoorwaarde op basis van ADM opgelegd. Deze afvoerreeks komt goed overeen met de gemodelleerde afvoer in het Rijntakkenmodel op deze locatie (zie Figuur D.113 in Bijlage D.4). Bij Schoonhoven geven beide modellen te hoge waterstanden gedurende de twee hoogwaters van januari 2018. Hier zou een te hoge zomerbedruwheid (ook hier gekalibreerd met het Rijntakkenmodel voor het hoogwater van januari 2011) een rol kunnen spelen.

3.3 Resultaten SOBEK

3.3.1 Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018

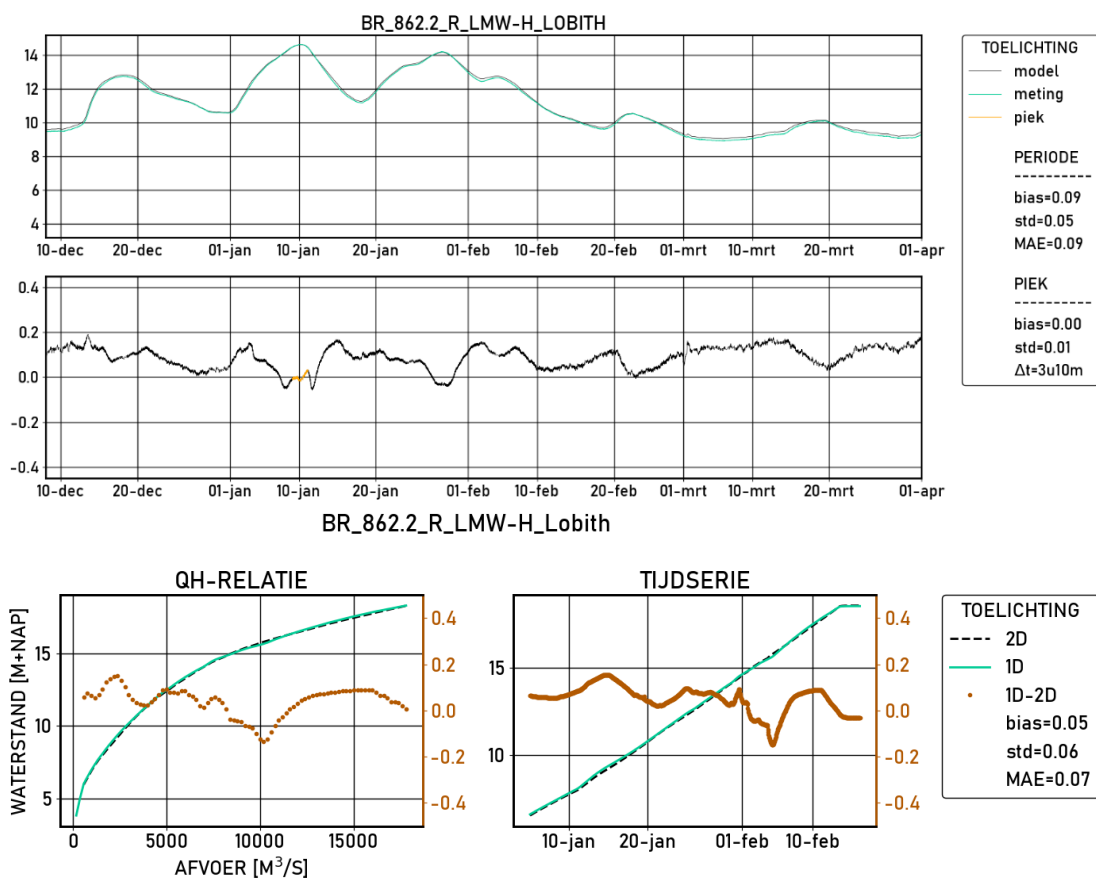
De resultaten van het SOBEK-model ten opzichte van het 2D-model en metingen bij LMW-stations zijn weergegeven in Tabel 3.4. Uit deze vergelijking blijkt dat het SOBEK-model over het algemeen een grotere afwijking heeft van de metingen dan het 2D-model. Dat uit zich bij de meeste stations vooral in een grotere standaardafwijking (bijvoorbeeld station Schoonhoven) en bij een aantal stations in een hogere bias.

Opvallend is met name de grotere bias op de Bovenrijn, het bovenste deel van de Waal en rond de IJsselkop. Als voorbeeld laten we station Lobith zien in Figuur 3.18. Op dit station zien we dat het 1D model ook hogere waterstanden berekent dan het 2D-model over vrijwel het gehele bereik. Ook in de op de afleidsom gebaseerde QH relatie (Figuur 3.18, onderste twee panelen) zien we dat het 1D model hogere waterstanden berekent dan het 2D model.

Op andere stations is de overeenkomst met het 2D-model groter. Op de IJssel onderschat het 1D-model de metingen, net als het 2D-model (zie ook sectie 3.2.1).

Een volledige lijst van tijdseries is opgenomen in bijlage E.1.

⁶ In de RMM-validatie zijn bij Hagestein-beneden onjuiste meetgegevens gebruikt.



Figuur 3.18 Analyse van de verschillen bij station Lobith. Boven: verschil tussen model en meting voor de validatiesom van 2018. Beneden: vergelijking tussen 1D en 2D (j19_6-v2) voor de afleidsom. Let erop dat de 'tijdserie' in de onderste grafiek niet slaat op de tijdserie van de 2018 som, maar de tijdserie van de afleidsom. De statistieken in de legenda staan voor gemiddelde afwijking (bias), standaardafwijking (std) en gemiddeld absoluut verschil (MAE).

3.3.2 Hoogwaterpiek 10 januari 2018

Tabel 3.5 geeft de statistieken in een venster van 2 dagen rondom de gemeten piekwaterstand op elke LMW-locatie. In de laatste kolom is het verschil in tijdstip tussen de gemodelleerde en de gemeten piek opgenomen. Het tijdstip van de gemeten piek is te vinden in Tabel 3.1. We zien dat bij veruit de meeste stations de piek tot 13 cm nauwkeurig wordt voorspeld. Uitzonderingen daarop zijn vooral Tiel-Waal (Figuur 3.20) en Sint-Andries. Het onderschatten van de piekwaterstand op de Waal heeft het 1D-model gemeen met het 2D-model (zie sectie 3.2.2).

Het tijdstip van de piek wordt meestal op enkele uren nauwkeurig berekend, waarbij SOBEK de piek op alle stations behalve IJsselkop te laat berekent. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij veel stations de piek relatief flauw is, waardoor een verschil van enkele uren weinig uitmaakt in centimeters waterstandsverschil. Het grootste verschil treedt op bij station Hagestein-boven (Figuur 3.21).

3.3.3 Effect hoogwaterpiek december 2017

Het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017 (met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december) heeft weinig effect op de gemodelleerde (piek)waterstanden – in tegenstelling tot 2D (zie sectie 3.2.2).

De verklaring hiervoor is dat de uiterwaarden in 1D niet onder water blijven staan na een eerdere piek. De hoeveelheid water ‘achter de zomerdijk’⁷, hangt af van de waterstand op de as van de rivier. Bij een dalende waterstand na een hoogwater neemt het volume dus af, ongeacht of er in 2D water kan blijven staan.

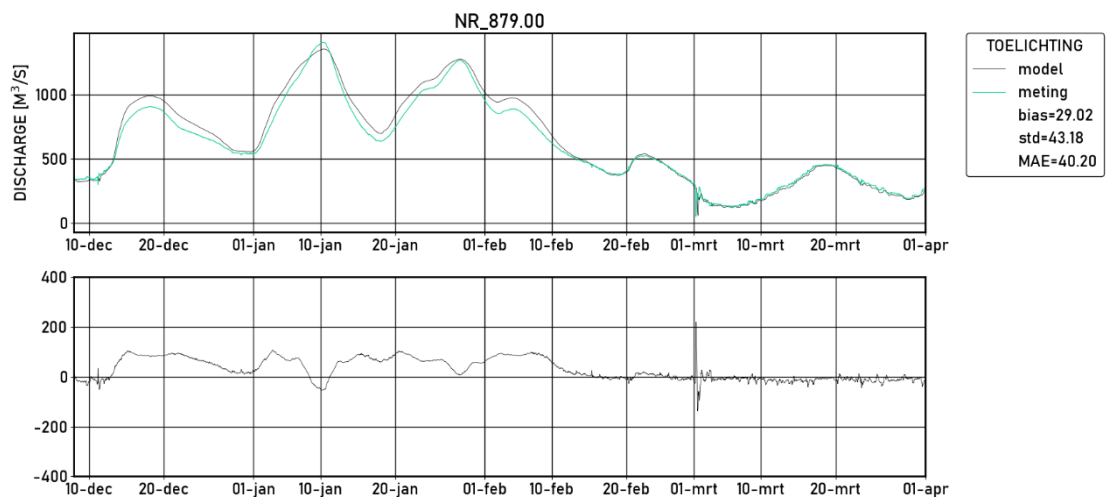
3.3.4 Afvoeren

Er zijn drie type vergelijking met afvoer gedaan: op basis van Q(f) relaties, ADCP metingen en ADM metingen. In deze paragraaf beschrijven we kort de afvoerverdeling. De rest van de resultaten zijn te vinden in bijlages E.3 en E.4.

Gedurende de drie hoogwaterpieken gaat er net als in D-HYDRO te weinig afvoer naar de Waal en teveel naar het Pannerdens Kanaal. De afwijking is ordegrrootte 40 m³/s (Tabel 3.3). Het surplus van het Pannerdens Kanaal gaat net als in het D-HYDRO model vooral naar de Neder-Rijn, waardoor de afvoeren ook hier te hoog zijn. De overeenkomst tussen gemeten en gemodelleerde afvoer naar de IJssel is goed, maar minder dan in D-HYDRO (bias van 14 m³s⁻¹ tegenover -1 m³/s in D-HYDRO). De vorm van de afvoergolf verschilt met name op de Nederrijn opvallend van de metingen (zie Figuur 3.19). Het model simuleert een bredere, vlakke afvoergolf. Ook het D-HYDRO model berekent een vlakke vorm dan de meetreeks.

Tabel 3.3 Vergelijking tussen modelresultaten en de QF relatie, zowel voor het 2D- als het 1D-model.

	Bias (2d)	Std (2d)	Bias (1d)	Std (1d)
BR_863.00	4.500	13.900	3.117	12.216
WL_868.00	-16.600	18.500	-36.346	47.743
PK_868.00	20.300	19.100	41.737	49.969
NR_879.00	21.800	18.700	29.016	43.181
IJ_879.00	-1.000	11.600	13.620	15.532



Figuur 3.19 Vergelijking met de QF relatie (hier: ‘meting’) en de SOBEK berekening. De vorm van de afvoergolf op de Nederrijn wijkt af van wat de QF relatie verwacht.

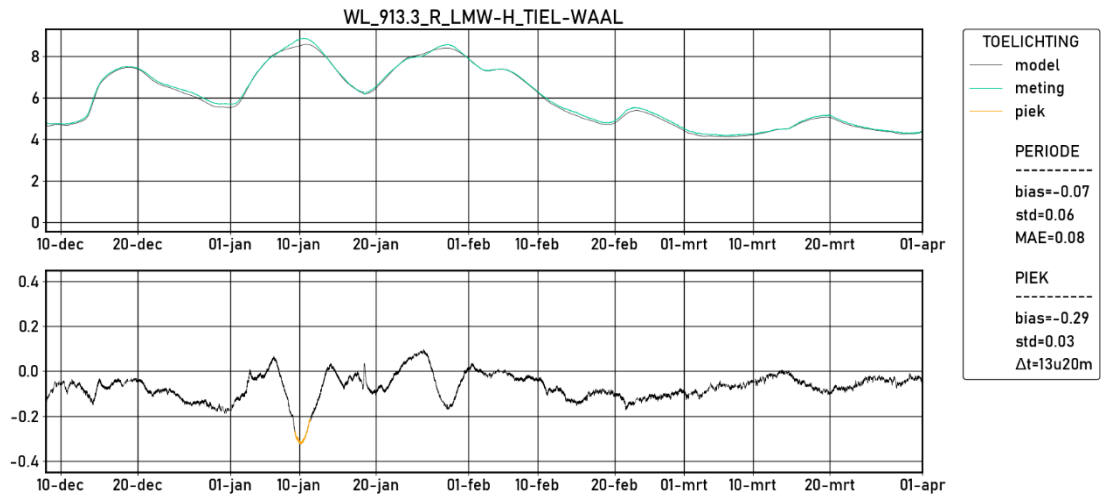
⁷ Het vollopen van uiterwaarden heeft een karakteristiek effect op de volume-waterstandsgrafiek van een dwarsprofiel, dat in gangbare 1D modellen niet gemodelleerd kan worden.

Tabel 3.4 De gemiddelde afwijking (bias) en standaardafwijking (std) tussen model en meting bij de LMW stations. De eerste twee kolommen laten het verschil zien tussen 2D en meting (vgl. Tabel 2.2.3). De laatste twee kolommen tonen het verschil tussen 1D en meting voor het hoogwater van 2018 (hele periode)

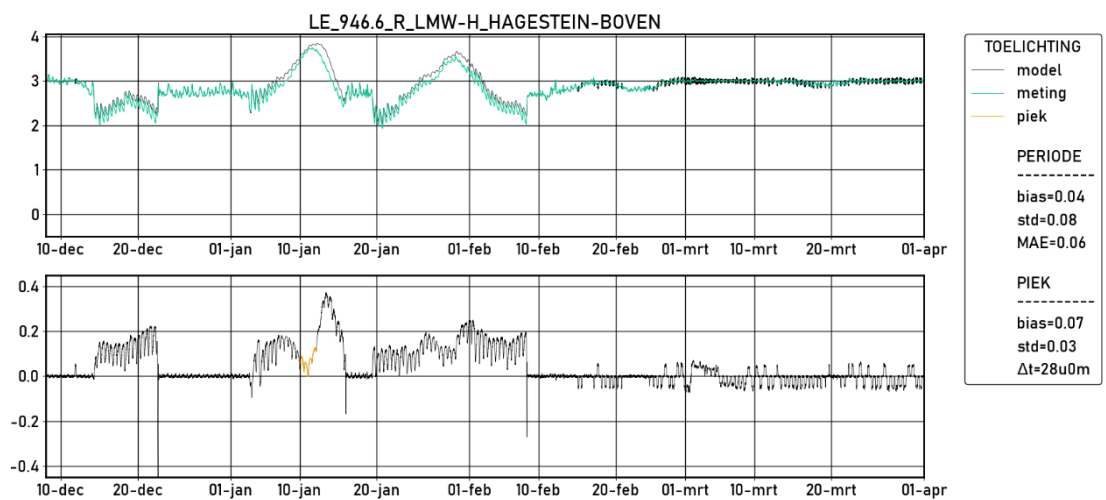
	Bias (2d)	Std (2d)	Bias (1d)	Std (1d)
RH_851.9_R_BfG_Emmerich	0.029	0.038	0.094	0.049
BR_862.2_R_LMW-H_Lobith	0.026	0.031	0.087	0.049
BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven	0.027	0.055	0.081	0.071
BR_867.2_L_LMW-H_Pannerdensche-kop	0.007	0.027	0.074	0.058
WL_884.9_L_LMW-H_Nijmegen-haven	0.047	0.043	0.086	0.066
WL_901.4_R_LMW-H_Dodewaard	0.021	0.043	0.050	0.067
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal	-0.027	0.047	-0.071	0.061
WL_926.1_L_LMW-H_Sint-Andries-Waal-g6	-0.071	0.104	-0.198	0.126
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	-0.048	0.060	-0.033	0.056
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	-0.095	0.081	-0.084	0.073
PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden	-0.067	0.118	-0.036	0.131
PK_876.4_L_LMW-H_Looveer-g6	0.006	0.030	0.083	0.057
PK_878.5_R_LMW-H_IJsselkop	0.006	0.035	0.085	0.069
NR_891.2_R_LMW-H_Driel-boven	0.009	0.034	0.087	0.128
NR_891.7_R_LMW-H_Driel-beneden	-0.017	0.041	0.066	0.104
NR_908.1_L_LMW-H_Grebbe	-0.012	0.050	0.010	0.057
NR_922.0_R_LMW-H_Amerongen-boven	0.032	0.058	0.051	0.078
NR_922.5_R_LMW-H_Amerongen-beneden	0.003	0.058	0.001	0.066
LE_939.8_L_LMW-H_Culemborg-brug	0.007	0.040	0.023	0.055
LE_946.6_R_LMW-H_Hagestein-boven	0.028	0.054	0.044	0.080
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	0.030	0.061	0.036	0.082
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	0.017	0.037	0.020	0.062
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-aan-de-Lek-g6	-0.003	0.002	0.000	0.000
IJ_879.6_R_LMW-H_Hondsbroeksche-Pleij-IJ	0.011	0.030	-0.006	0.046
IJ_881.1_R_LMW-H_Westervoort-IJsseldijke	-0.024	0.030	0.051	0.031
IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg	-0.026	0.040	-0.062	0.075
IJ_903.0_R_LMW-H_Doesburg-brug	-0.067	0.055	-0.056	0.096
IJ_929.3_L_LMW-H_Zutphen-noord	-0.123	0.065	-0.124	0.126
IJ_931.2_R_LMW-H_Eefde-beneden	-0.132	0.065	-0.125	0.127
IJ_945.0_R_LMW-H_Deventer	-0.126	0.087	-0.145	0.145
IJ_957.1_R_LMW-H_Olst	-0.075	0.068	-0.099	0.136
IJ_965.2_R_LMW-H_Wijhe	-0.075	0.037	-0.079	0.113
IJ_980.8_R_LMW-H_Katerveer	-0.032	0.038	-0.018	0.101
IJ_994.5_L_LMW-H_Kampen-bovenhaven	0.005	0.046	0.028	0.046
IJ_1001.3_L_LMW-H_Keteldiep	0.015	0.045	0.067	0.094
Gemiddelde	-0.021	0.050	-0.003	0.080

Tabel 3.5 De gemiddelde afwijking (bias) en standaardafwijking (std) tussen model en meting bij de LMW stations. De eerste twee kolommen laten het verschil zien tussen 2D en meting (vgl. Tabel 2.2.3). De laatste drie kolommen tonen het verschil tussen 1D en meting voor het hoogwater van 2018 (2 dagen rond de piek)

	Bias (2d, piek)	Std (2d, piek)	Bias (1d, piek)	Std (1d, piek)	t_model- t_meting (1d, piek)
RH_851.9_R_BfG_Emmerich	-0.087	0.010	-0.024	0.012	1:25
BR_862.2_R_LMW-H_Lobith	-0.052	0.009	0.001	0.013	3:10
BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven	-0.063	0.008	-0.099	0.016	5:20
BR_867.2_L_LMW-H_Pannerdensche-kop	-0.027	0.007	-0.077	0.016	6:55
WL_884.9_L_LMW-H_Nijmegen-haven	-0.011	0.015	-0.021	0.014	8:50
WL_901.4_R_LMW-H_Dodewaard	-0.040	0.031	-0.126	0.020	6:30
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal	-0.115	0.050	-0.288	0.030	13:20
WL_926.1_L_LMW-H_Sint-Andries-Waal-g6	-0.114	0.062	-0.417	0.000	18:30
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	-0.099	0.073	-0.102	0.024	16:25
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	-0.129	0.044	-0.124	0.057	3:15
PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden	-0.090	0.007	-0.016	0.000	n.v.t
PK_876.4_L_LMW-H_Looveer-g6	-0.015	0.010	0.043	0.010	0:55
PK_878.5_R_LMW-H_IJsselkop	-0.027	0.015	0.071	0.023	-2:15
NR_891.2_R_LMW-H_Driel-boven	0.002	0.016	0.103	0.029	2:45
NR_891.7_R_LMW-H_Driel-beneden	-0.024	0.017	-0.010	0.031	4:30
NR_908.1_L_LMW-H_Grebbe	-0.015	0.014	0.030	0.048	17:15
NR_922.0_R_LMW-H_Amerongen-boven	0.076	0.016	0.131	0.049	17:00
NR_922.5_R_LMW-H_Amerongen-beneden	0.003	0.018	0.028	0.050	21:25
LE_939.8_L_LMW-H_Culemborg-brug	0.005	0.015	0.039	0.035	27:05
LE_946.6_R_LMW-H_Hagestein-boven	0.069	0.021	0.069	0.032	28:00
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	0.030	0.021	0.053	0.059	15:30
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	-0.024	0.049	0.005	0.063	0:10
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-aan-de-Lek-g6	-0.003	0.002	0.000	0.000	0:00
IJ_879.6_R_LMW-H_Hondsbroeksche-Pleij-IJ	-0.005	0.013	-0.019	0.021	0:25
IJ_881.1_R_LMW-H_Westervoort-IJsseldijke	-0.031	0.016	0.018	0.017	3:40
IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg	0.019	0.014	0.079	0.013	7:05
IJ_903.0_R_LMW-H_Doesburg-brug	0.026	0.007	0.107	0.014	5:00
IJ_929.3_L_LMW-H_Zutphen-noord	-0.016	0.007	0.025	0.019	4:45
IJ_931.2_R_LMW-H_Eefde-beneden	-0.020	0.004	0.035	0.015	4:30
IJ_945.0_R_LMW-H_Deventer	0.017	0.003	0.001	0.008	10:35
IJ_957.1_R_LMW-H_Olst	0.013	0.004	0.039	0.011	11:40
IJ_965.2_R_LMW-H_Wijhe	-0.043	0.007	-0.029	0.012	10:20
IJ_980.8_R_LMW-H_Katerveer	-0.029	0.005	-0.051	0.010	12:15
IJ_994.5_L_LMW-H_Kampen-bovenhaven	-0.047	0.179	0.010	0.190	1:05
IJ_1001.3_L_LMW-H_Keteldiep	0.002	0.194	0.118	0.221	2:10
Gemiddelde	-0.025	0.028	-0.011	0.034	



Figuur 3.20 Op de benedenstroomse stations op de Waal wordt de waterstand op de piek onderschat



Figuur 3.21 De grootste afwijking van het voorspelde tijdstip van de hoogwatergolf is bij LMW station Hagestein-boen. Het model voorspelt hier dat de piek bijna 28 uur later is dan die in werkelijkheid optrad.

4 Conclusies

4.1 Validatie D-HYDRO

- Over de hele validatieperiode (8 december 2017 tot 1 april 2018) is de bias van het model ten opzichte van de meting voor de meeste stations kleiner dan 5 cm (absolute waarde). Dit resultaat is vergelijkbaar met de validatieresultaten voor meer historische hoogwaterperioden (zie Kusters et al., 2022).
- Benedenstreams op de Waal (Sint-Andries, Zaltbommel, Vuren) en de IJssel (Doesburgbrug en verder) is de prestatie van het model over de hele periode gezien relatief slecht (bias ≥ 5 cm in absolute zin). Bij de genoemde stations op de IJssel worden de waterstanden over het hele afvoerbereik onderschat door het model. Alleen bij de tweede en derde piek worden de waterstanden goed gerepresenteerd. Op de Waal zijn juist vooral de piekwaterstanden te laag. Ook op de Boven-Rijn onderschat het model de piekwaterstanden.
- Verder valt op dat de in- en uitstroom van de Groene Rivier Pannerden en de hoogwatergeul bij het regelwerk Hondsbroeksche Pleij niet goed wordt gemodelleerd. De hoogwatergeulen stromen te laat in en ook de uitstroom vindt onvoldoende plaats.
- Het weglaten van de periode 8 – 31 december 2017 (met de eerste hoogwaterpiek rond 18 december) heeft geen effect op de gemodelleerde piekwaterstanden bij het tweede hoogwater. Alleen in de aanloop naar het tweede hoogwater is een verschil zichtbaar, in het afvoerbereik van het eerste hoogwater. Het weglaten van de maand december leidt tot lagere waterstanden in de aanloop doordat de uiterwaarden nog niet onder zijn gelopen. Op de meeste locaties leidt dit tot een betere overeenkomst met de metingen, maar langs de IJssel wordt het resultaat in de aanloop naar de tweede piek juist (veel) slechter.
- Gedurende de drie hoogwaterpieken gaat er te weinig afvoer naar de Waal en teveel naar het Pannerdens Kanaal. De afwijking is orde grootte $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Het surplus van het Pannerdens Kanaal gaat in zijn geheel naar de Neder-Rijn, waardoor de afvoeren ook hier te hoog zijn. De overeenkomst tussen gemeten en gemodelleerde afvoer naar de IJssel is juist zeer goed (bias slechts $-1 \text{ m}^3/\text{s}$).
- De afvoer op basis van de Qh-relaties uit 2010 en 2013 voor Tiel is zeer verschillend van de gemodelleerde afvoer. In het hele afvoerbereik zijn de Qh-afvoeren lager dan de afvoer uit het model. Verschillen lopen op tot ruim $300 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Bij Olst zijn de verschillen tussen model en Qh-relaties (ook uit 2010 en 2013) bij lage afvoeren klein, maar bij de drie hoogwaterpieken nemen de verschillen sterk toe. Met beide Qh-relaties wordt de vorm van de pieken heel anders ingeschat dan in het model. De Qh-relatie uit 2013 heeft wel een beduidend betere overeenkomst met het model in het middelhoge en hoge afvoerbereik dan de relatie uit 2010.

4.2 Validatie SOBEK

- Actualisatie van profielen en winterbedruwheden (van j22 naar j19) leidt over het algemeen tot hogere waterstanden in 1D in vergelijking met 2D.
- Over de hele validatieperiode (8 december 2017 tot 1 april 2018) zien we met name op de Boven-Rijn en Waal een grotere afwijking van metingen dan in het 2D-model (hogere waterstanden in 1D). Op de overige stations volgt het 1D-model de trend van het 2D-model, met vergelijkbare bias maar grotere standaardafwijking.
- De afvoerverdeling laat een zelfde trend zien als in 2D, met gemiddeld te weinig water naar de Waal en te veel naar het Pannerdens Kanaal. De gemiddelde afwijking is in de orde van $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De vorm van de afvoergolf op de Nederrijn wijkt af van de Qf relatie, waarbij het model een vlakke golf berekent.

- De waterstanden rond de top worden op de meeste stations tot 13 cm nauwkeurig berekend. Met name op de Waal worden de waterstanden rond de top, net als in het 2D model, onderschat. De timing van de hoogwaterpiek wijkt meestal enkele uren tot een dag af van het gemeten moment van de hoogwaterpiek. SOBEK berekent de top op alle stations met uitzondering van IJsselkop (2u:15m te vroeg) later dan de metingen.

5 Aanbevelingen

5.1 Algemeen

- In 2021 is opnieuw een hoogwater opgetreden op de Rijn. Qua piekafvoer is deze gebeurtenis vergelijkbaar met de hoogwaters van 2018 en 2011. Door de Rijnmodellen ook op dit recente hoogwater te valideren kan meer inzicht worden verkregen in de stationariteit van deze modellen.
De achtergrond van deze aanbeveling is dat de validatie op het hoogwater van 2018 is uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de prestatie van modellen die (direct of indirect) zijn gekalibreerd op historische perioden, maar worden ingezet om de actuele situatie te representeren. Omdat de modellen juist in het hoge afvoerbereik zijn gekalibreerd op perioden die relatief ver in het verleden liggen (2011 en eerder) werd rekening gehouden met de mogelijkheid dat het hoogwater van 2018 met deze modellen niet goed nagebootst zou worden. De modelprestatie voor dit hoogwater blijkt echter vergelijkbaar met de validatieresultaten voor hoogwaters uit het verleden (zie Kosters et al., 2022).
- De berekening van de afvoer door het gemaal Marijkesluizen kan worden verbeterd door de lekverliezen bij de sluisen mee te nemen in de bepaling van de gemaalafvoer.

5.2 Aanbevelingen D-HYDRO

- De validatie wijst uit dat de zomerbedruwheid op het traject Vuren – Merwedekop mogelijk te laag is rondom de afvoerpieken waarop gevalideerd is. Herkalibratie kan het modelresultaat bij deze afvoerniveaus verbeteren.
- De in- en uitstroom van verschillende hoogwatergeulen en uiterwaarden wordt niet goed gerepresenteerd in het model. Nader onderzoek is nodig om dit te verbeteren.
- Het wordt ten zeerste aanbevolen om de Qh-relatie bij Tiel te actualiseren. De Qh-relaties uit 2010 (basis voor de afvoerrandvoorwaarde van het RMM-model op deze locatie) en 2013 zijn niet meer representatief voor de huidige situatie. Dit geldt ook voor de Qh-relaties bij Olst (basis voor de afvoerrandvoorwaarde in het model van de IJssel-Vechtdelta), maar de fout is daar kleiner.
- De afvoer bij Lobith kan (met name in de aanloop naar het tweede hoogwater) worden verbeterd door de randvoorwaarde bij Dornick in meerdere iteraties te corrigeren. Wanneer de resulterende afvoerreeks ook in het SOBEK-model wordt opgelegd, kan het effect bij Lobith daar echter anders uitpakken.

5.3 Aanbevelingen SOBEK

- Binnen de FM2PROF methodiek wordt kalibratie op het 2D model waarvan de profielen zijn afgeleid aangeraden. Dat is in deze validatie niet gedaan. Daarmee kan deze studie een indicatie geven of dergelijke herkalibratie nodig is. Op basis van de resultaten verwachten wij dat herkalibratie op het j19 2D model tot een betere vergelijking tussen metingen en het j19 1D model leidt.
- Niet alle stations die in 2D bestaan zijn aanwezig in het 1D model. Wij adviseren om deze stations in een nieuwe versie van het 1D model over te nemen, met uitzondering van de stations in het winterbed en in nevengeulen.
- De vorm van de afvoergolf in SOBEK wijkt opvallend af van de Qf relatie. Dat werkt ook door in de waterstanden, met name op de Nederrijn. We raden aan de oorzaak hiervan nader te onderzoeken.

Referenties

Berends, K.D., B. Domhof, en A.J. Visser (2021). Pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Rijn: Modelopzet, kalibratie en validatie o.b.v. FM2PROF. 11206813-004-ZWS-0002: Deltares.

Berends, K.D., Domhof, B. en Visser, T. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model 1D. Deltares rapport 11208053-003-ZWS-0006

Beyer, D. (2022). Toelichting meetgegevens hoogwater 2018. Memo 12 december 2022, Rijkswaterstaat Oost-Nederland.

Kosters, A. (2022). Actualisatie zesde generatie Rijnmodellen. Schematisaties j19_6 en beno19_6. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0004.

Kosters, A., Spruyt, A. en Niesten, I. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakkenmodel. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0012.

Spruyt, A. (2019). Relatie waterstand Hardinxveld en Werkendam. Deltares memo 11203714-005-ZWS-0001.

Zijlker, T.D., Veenstra, J. en van der Wijk, R.M. (2022). Aanvullende validatie RMM 2D. Validatieperiode 2018 en 2020. Deltares rapport 11208053-004-ZWS-0010.

A Toelichting meetgegevens

In deze bijlage is het memo 'Toelichting meetgegevens hoogwater 2018' van RWS-ON (Beyer, 2022) in zijn geheel opgenomen.

Beste lezer,

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
2 Meetgegevens waterstanden en afvoeren	1
2.1 Algemeen	1
2.2 Waterstanden	2
2.3 Afvoeren	4
2.3.1 Afvoermetingen ADCP	4
2.3.2 Afvoeren ADM	4
2.3.3 Afvoerreeksen Lobith en splitsingspunten	5
2.3.4 Afvoerreeksen Qh Tiel en Olst	6
3 Kunstwerksturing	7
4 Referenties	8

1 Inleiding

Voor de validatie van D-Hydro en Sobek Rijntakken op de hoogwaterperiode 2017-2018 is een groot aantal gegevens aangeleverd. Het betreft:

- Meetgegevens waterstanden en afvoeren (H2)
- Kunstwerksturingen (H3)

De gegevens beslaan de periode 1 december 2017 tot en met 31 maart 2018.

Dit memo beschrijft de verschillende typen gegevens en de daarop uitgevoerde controles en bewerkingen.

De meetgegevens voor de afleiding van de lateralen staan beschreven in bijlage B van het rapport.

2 Meetgegevens waterstanden en afvoeren

2.1 Algemeen

Van waterstanden en afvoeren zijn de volgende typen meetgegevens verzameld:

- Waterstandsmetingen op LMW-stations,
- Waterstandsmeting bij Emmerich,
- Waterstandsmetingen bij Voorhavendijk,
- ADM- en ADCP-metingen van de afvoer op verschillende locaties,
- Afvoerreeksen voor Lobith en de splitsingspunten op basis van de Qf18, aangevuld met de ADM bij Driel-boven en vereffend om een sluitende waterbalans te verkrijgen.

- Afvoerreeksen op basis van Qh-relaties voor Tiel en Olst uit 2010 en 2013.

Alle gegevens zijn visueel nagelopen op uitschieters en hiaten. Verbetering van foute gegevens. Ook zijn diverse middelingen uitgevoerd.

Alle gegevens zijn verzameld in een spreadsheet. Het spreadsheet bestaat uit een groot aantal tabbladen. De definitieve gegevens staan in een tabblad met de naam def. Andere tabbladen bevatten verzamelde gegevens en (tussenstappen van) bewerkingen.

Wel aanwezige en deels beschikbare maar nog niet aangeleverde meetgegevens zijn:

- waterstandsmetingen waterschappen
- divers Rijn (waterstanden)
- verhanglijnmetingen in de as van de rivier rond de top
- afvoeren per km op de Waal in het zomerbed en kribvakken op het traject km 900-930
- Sentinel satellietfoto van 8 januari 2018 met daarop het geïnundeerde gebied

2.2 Waterstanden

Dit zijn de door Rijkswaterstaat gemeten waterstanden in het kader van het Landelijk Meetnet Water (LMW). Naast de meetgegevens in het modelgebied van de Rijntakken zijn ook de gegevens van Mook en Heesbeen verzameld voor toepassing voor de lateralen (zie bijlage B). Via scripts zijn de waterstanden eind juli 2022 gedownload uit Waterinfo. Waterstanden en afvoeren van RWS-CIV uit het LMW zijn verzameld voor een langere periode (16-11-2017 t/m 14-4-2018) om voldoende gegevens te hebben voor de berekening van uurgemiddelden en hysteresis Qf (4 uur eerder).

Van de LMW meetlocaties zijn 10-minutengegevens beschikbaar. De 10-minutengegevens zijn centraal uurgemiddeld om slingeringen te verwijderen; dit is niet gedaan voor Emmerich, de getij- en merenlocaties, Keteldiep, Kampen-Bovenhaven vanwege de stormen en de twee locaties in de groene rivier Pannerden.

De daggegevens van Sint-Andries Waal en Pannerden zijn niet bewerkt. Van Sint-Andries-Waal ontbreekt heel februari 2018, van Pannerden vanaf januari 2018.

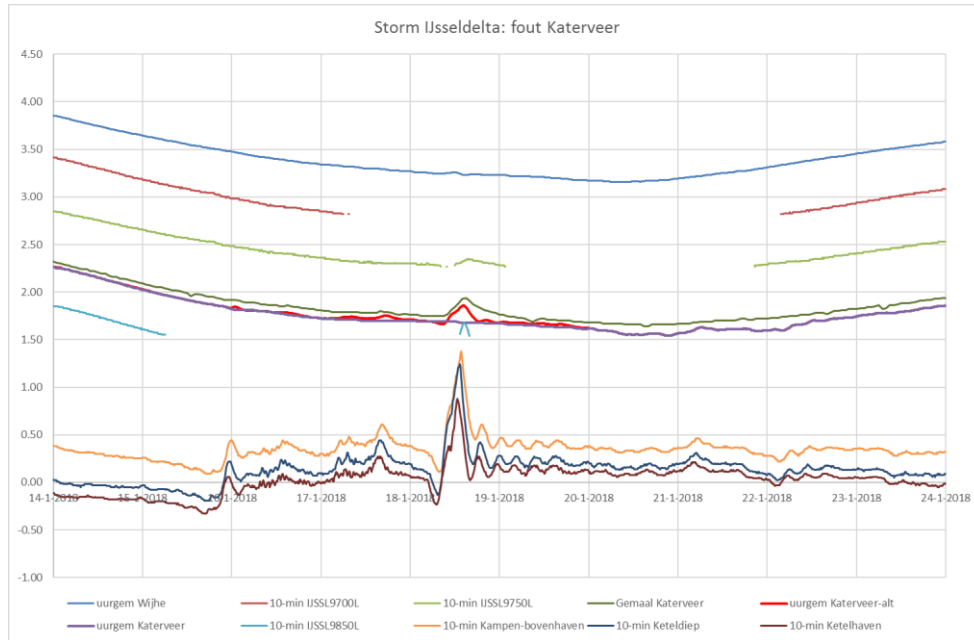
De "gemeten" waterstanden van Hardinxveld ten behoeve van de benedenrand zijn berekend uit Werkendam-buiten volgens Deltares memo "Relatie waterstand Hardinxveld en Werkendam" van Aukje Spruyt, d.d. 12 april 2019 met kenmerk 11203714-005-ZWS-0001. De functie luidt:

- $1.053 * H_{\text{Werkendam}} - 0.019$ als $H_{\text{Werkendam}} < 2.5 \text{ m} + \text{NAP}$
- $1.592 * H_{\text{Werkendam}} - 1.367$ $2.5 \leq$ als $H_{\text{Werkendam}} < 3.0 \text{ m} + \text{NAP}$
- $0.876 * H_{\text{Werkendam}} + 0.781$ als $H_{\text{Werkendam}} > 3.0 \text{ m} + \text{NAP}$

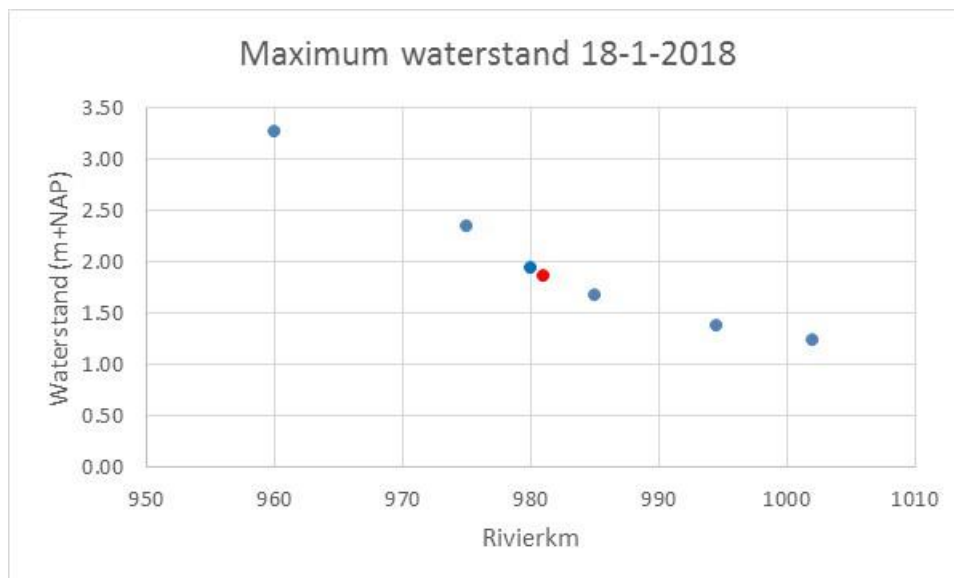
Bij Katerveer is geconstateerd dat de stormpiek van 18 januari in de waterstanden ontbreekt, terwijl deze in omliggende stations vlakbij wel aanwezig is. Ook in de dagen ervoor en erna komt het waterstandsverloop niet overeen met omliggende stations. De metingen kunnen dus niet kloppen. Gebleken is dat de metingen bestaan uit in ruimte en tijd geïnterpoleerde waarden en dus niet uit echte metingen. Daarom is een verbeterde reeks geconstrueerd. Daarvoor is gebruik gemaakt van de oorspronkelijk gemeten waterstanden rond de stormpiek, die tijdens het hoogwater zelf zijn verzameld als download uit Waterinfo. Er is gekeken naar de periode 14-23 januari 2018.

Uit de oorspronkelijke meetreeks (Katerveer-bron) zijn eerst de duidelijke uitbijters verwijderd en de hiaten zijn lineair geïnterpoleerd (Katerveer-bron2). Voor deze analyse zijn de extra beschikbare waterstandsmetingen ook opgenomen van nabijgelegen stations (deze volgen later voor de rest van de periode). Vergelijking met omliggende meetreeksen (gemaal Katerveer, en Kampen-bovenhaven) laat zien dat de waterstandsvariatie groter is dan gemaal Katerveer (uurgemiddelde waterstanden).

Ook de stormopzet (maximum waterstand) is groter dan bij gemaal Katerveer, en dat kan natuurlijk niet. Er is dus een correctie nodig (zie paarse lijn).



De waterstandsvariatie in de oorspronkelijke meting komt wel heel goed overeen met bv. de diverlocatie IJSSL985L en Kampen-Bovenhaven, dus dit is wel een bruikbare meting. Er is gekozen om eerst het verschil te berekenen tussen de officiële waterstanden en de oorspronkelijke. Dat verschil is vermenigvuldigd met een reductiefactor en weer opgeteld bij de officiële waterstanden. Via iteratie is gekozen voor een reductiefactor van 0.4. De resulterende reeks (zie rode lijn) bevat een kleinere waterstandsvariatie en de topwaterstand past goed in de topstanden uitgezet tegen de rivierkm van alle beschikbare stations (zie figuur). De aanpassingen betreffen de periode 15-1-2018 22:10 - 19-1-2018 23:40. De nauwkeurigheid bedraagt enkele cm; de reductiefactor is enigszins arbitrair.



Van de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Duitsland zijn de 15-minutenwaterstanden ontvangen van Emmerich, gemeten door de Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).

Met het bijgeleverde peilschaalnulpunt zijn de waterstanden omgerekend naar NAP. Hoewel de metingen beschikbaar zijn als 15-minuten waterstanden, zijn ze opgenomen in het 10-minuten spreadsheet, dus met waterstanden om :00 en :30. Er zijn ook afvoergegevens van Emmerich beschikbaar.

Vooruitlopend op een validatie op meetgegevens van waterschappen en diverlocaties is van één locatie reeds de gegevens opgenomen. Dit betreft de locatie Voorhavendijk nabij de Prinses Irenesluizen. Deze zijn bedoeld ter validatie van de waterstand nabij de kruising Lek-ARK bij gesloten Betuwepand.

De meetgegevens zijn afkomstig van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) via een download via Lizard. Het betreft 15-minutengegevens. De metingen zijn in UTC en daarom 1 uur verplaatst naar 1 uur later.

Inspectie van de gegevens laat zien dat de metingen tijdens hoogwater ongeveer 5 cm lager zijn dan Tiel-kanaal rond het sluiten van de Marijkesluizen.

In tabblad Waterschappen-15min staan de 2-uurgemiddelde waterstanden zonder correctie. Bij hiaten zijn enkele 2-uurgemiddelden vervangen door 1-uurgemiddelden om het hiaat niet onnodig te vergroten.

2.3 Afvoeren

2.3.1 Afvoermetingen ADCP

In het kader van MWTL (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands) worden jaarlijks afvoermetingen gedaan door (of in opdracht van) RWS-CIV op 9 locaties langs de Rijntakken. Bij hoogwater wordt gemeten volgens het hoogwatermeetprogramma. De locaties zijn Lobith, de 4 takken op de splitsingspunten, aangevuld met Tiel, Hagestein en Olst. Op het Pannerdensch kanaal zijn twee meetlocaties, één bij de Pannerdensch Kop en één bij de IJsselkop (alleen lagere afvoeren). De meting vindt varend plaats met een ADCP (Acoustic Current Doppler Profiler). Per locatie worden meerdere meetraaien gebruikt, afhankelijk van de waterstand. Zo worden de afvoermetingen bij Olst bij hoge afvoeren gedaan bij Deventer.

Bij Tiel en Deventer zijn bij hoogwater grote delen van het dwarsprofiel die niet bemeten worden. Daarvoor wordt een aanname gedaan.

Van RWS-CIV Mobiel Meten zijn apart ontvangen de uitgevoerde afvoermetingen in de hoogwatergeul Hondsbroeksche Pleij en in de groene rivier Arnhem bij km 884. De afvoeren zijn overgenomen uit het meetformulier, het meettijdstip is zelf bepaald.

Bij Tiel is in de metingen geen correctie gedaan voor de afvoer door het winterbed op de linkeroever. Uit luchtfoto's is bekend dat hier wel water heeft gestroomd. De verwachting is daarom dat de metingen een onderschatting zijn.

2.3.2 Afvoeren ADM

Bij Driel-boven en Hagestein-boven zijn Akoestische DebietMeters (ADM-meetopstellingen) aanwezig die continu de afvoer meten. Dit vindt plaats door in een meetkruis op één NAP-niveau de stroomsnelheid te meten. Deze wordt met een dwarsprofiel, de waterstand en een factor omgerekend naar een afvoer. In de gemeten afvoer zit ook de afvoer van de vistrap naast de stuw. Het schutverlies van de naastgelegen sluis ontbreekt in de metingen. Net als bij de LMW waterstanden zijn 10-minutenwaarden beschikbaar. Bij Driel-boven zijn alleen metingen beschikbaar als de waterstand bij Driel-boven lager is dan 9.03 m+NAP. Vanaf dan gaat het stuweiland meestromen en kan geen juiste meting meer worden gedaan.

Bij Hagestein-boven gaat de toegangsdam naar het stuweiland overstromen vanaf een lokale waterstand van 4.00 m+NAP. Vanaf dan meet de ADM niet meer de totale afvoer. Dat niveau is in deze periode niet bereikt.

De 10-minutenwaarden van Driel-boven zijn uitgemiddeld. Er zijn verschillende middelingen bekeken. Gekozen is voor een 2-uursmiddeling in het geval de stuw gestuurd wordt op afvoer (lage afvoeren). Indien de stuw in werking is, wordt een 1-uursmiddeling toegepast (7 10-minutenwaarden). Reden is dat de afvoerverandering door een stuwmanipulatie snel optreedt; een langere middeling zorgt voor een tijdstipverandering en voor een te grote afvoeraanpassing. Soms treedt in het lage afvoerbereik toch een snelle afvoerverandering op. In dat geval zou het beter zijn om toch 20-minutengemiddelden of zelfs 10-minutenwaarden toe te passen. Dit natuurlijk als ook de waterstanden niet uurgemiddeld worden, en de sturing op afvoer van de stuw op 10-minutenbasis plaatsvindt.

De 10-minutenwaarden van Hagestein-boven zijn ook uitgemiddeld. Er zijn verschillende middelingen bekeken. In het bereik waarin de stuw op waterstand stuurt of geopend is (de gehele periode), is een centraal 20-minutenmiddeling toegepast. Deze volgt de stuwbewegingen beter en volgt de getijslag beter dan een centraal uurgemiddelde.

Het verdient aanbeveling voor beide locaties om beter te bedenken hoe de afvoer gemiddeld of gefilterd moet worden, in relatie tot de middeling/filtering van de waterstand en het interval waarop de stuw stuurt.

2.3.3 Afvoerreksen Lobith en splitsingspunten

Voor de validatie zijn gevalideerde afvoerreksen nodig bij Lobith en de splitsingspunten. Een belangrijke voorwaarde is dat de afvoerreksen een sluitende waterbalans bevatten (dat heeft het hydraulische model ook).

De standaard beschikbare afvoerreksen in het LMW zijn niet bruikbaar omdat deze nog gebaseerd zijn op de Qf09. Inmiddels is de Qf geactualiseerd naar Qf18 (Svasek, 2019). Het is de bedoeling om de afvoeren in het LMW met terugwerkende kracht te corrigeren naar de Qf18.

Voor dit project zijn dus aparte afvoerreksen samengesteld (zie ook paragraaf 2.3.4).

De opbouw van de afvoerreksen heeft plaatsgevonden in een aantal stappen:

1. Qf18:
Met behulp van de functies en correctietabellen uit Svasek (2019) zijn de afvoeren berekend op basis van niet-afgeronde uurgemiddelde waterstanden. Het gebruik van uurgemiddelde waterstanden leidt tot een stabielere afvoer. Deze stap is via Python-scripts uitgevoerd.
2. Qf18 1-uurgemiddeld
De afvoeren uit stap 1 zijn uurgemiddeld. Dit bleek toch nodig omdat de correctietabellen van de Qf nog in hele cm zijn, en hier nog niet in wordt geïnterpoleerd. Met name de correctie voor hysteresis leidt daardoor tot een instabieler afvoer. Dat komt omdat dit een functie is van het waterstandsverschil tussen het tijdstip $t=0$ en de waterstand van 4 uur eerder.
3. Qf18 1-uurgemiddeld en ADM Driel-boven met aansluiting.
Voor de Neder-Rijn geldt de Qf18 niet in het lage afvoerbereik omdat de correctie voor stuwwerking niet eenduidig is. In dit bereik is de ADM Driel-boven beschikbaar. De toegepaste reeks is afgeleid uit de 10-minuten gegevens conform paragraaf 2.3.2. Omdat de Qf bij de IJsselkop wordt bepaald is er een tijdverschuiving nodig voor de ADM. Iteratief is gekozen voor een looptijd van 4 uur omdat dit leidde tot een ongeveer gelijk verschil tussen ADM en Qf18 in de was en de val. De looptijd betekent een vervroeging in de tijd van de ADM: de meting van 4:00 uur gaat naar 0:00 uur. De gekozen looptijd van 4 uur is wel aan de hoge kant, dus dit vergt nadere aandacht. Bij toepassing van de ADM blijkt op de overgang naar de Qf18 een sprong in de afvoer op te treden. Vergelijking van de ADM met ADCP metingen van de Neder-Rijn laat zien dat er tot 700 m³/s een goede overeenkomst is. Ook de overeenkomst van de ADCP met de Qf18 vanaf 900 m³/s is goed. Daarom is een overgangsbereik gedefinieerd

van 700-900 m³/s. Hierin is een lineaire overgang toegepast tussen ADM en Qf. Daar waar de ADM beschikbaar is, is de ADM als basis voor deze overgang gebruikt.

4. Qf18 1-uurgemiddeld en ADM Driel-boven met aansluiting en vereffend:
De vereffening vindt plaats om een sluitende waterbalans te krijgen. De toegepaste methode is iteratief per splitsingspunt, rekening houdend met looptijd; Daarbij worden berging in het winterbed en lateralen verwaarloosd. Per splitsingspunt wordt gekeken naar de inkomende en de uitgaande afvoer. De fout wordt evenredig verdeeld over de in- en uitgaande afvoer. Per tak vindt de verdeling evenredig met afvoer met de afvoer plaats.

Opmerkingen

De keuze voor de looptijd tussen IJsselkop en Driel voor ADM pakt verkeerd uit op 1 maart 2018; er ontstaat ten onrechte een dubbele afvoerpiek. De verklaring hiervoor is als volgt. Een verandering van de afvoer tussen IJsselkop en Driel-boven kan door twee oorzaken optreden:

1. De afvoer bij Lobith stijgt, en deze werkt door via IJsselkop naar Driel-boven. In dit geval is een vervroeging van de ADM meting juist.
2. De stuw wordt anders ingesteld met als gevolg een verandering van de afvoer bij Driel-boven die via een looptijd doorwerkt bij IJsselkop. In dat geval zou de ADM afvoer bij Driel-boven niet vervroegd maar verlaat moeten worden. Dat speelt op 1 maart 2018.

Bij de toegepaste correctie voor de waterbalans wordt de berging van water genegeerd. Dit kan echter voor dit hoogwater wel degelijk belangrijk zijn. Bijvoorbeeld op de Boven-Rijn in het winterbed is veel water geborgen via de Bijland, de Geitenwaard en mogelijk de Lobberdense waard. Ook in de Huissensche waarden is water ingestroomd. Negeren van de berging leidt tot een onterechte aanpassing van de afvoeren. Als voorbeeld op de Boven-Rijn: bij de Pannerdense kop komt minder water aan dan bij Lobith en om dat passend te krijgen worden bij beide locaties de afvoeren gecorrigeerd. Uit de vergelijking van de wel en niet-vereffende afvoeren (stap 4 versus stap 3) blijkt dat rond de top van het hoogwater (10 januari) de afvoer bij Lobith ongeveer 100 m³/s is verlaagd. Bij het Pannerdensch kanaal gaat het om 35 m³/s verlaging.

In overleg met Deltares is gekozen om de afvoerreeksen per 10-minuten toe te passen. Tijdens de modelbouw werden de afvoerreeksen op het hele uur toegepast. Voor de zekerheid zijn ook deze toegeleverd.

De afleiding en de berekening van de Qf18 is opgenomen in een apart spreadsheet (niet toegeleverd). Het resultaat en de tussenstappen zijn wel toegeleverd.

2.3.4 Afvoerreeksen Qh Tiel en Olst

In het LMW zijn ook afvoeren beschikbaar bij Tiel en Olst. Deze worden berekend op basis van een Qh-relatie die dateert uit 2010. Daarnaast bestaan er ook geactualiseerde Qh-relaties uit 2013 (Rura, 2013).

Voor de validatie zijn de afvoeren bij Tiel en Olst opnieuw berekend op basis van waterstanden met de beschikbare Qh-relaties. Dat heeft twee voordelen ten opzichte van de officiële afvoeren uit het LMW.

In de eerste plaats zijn de uurgemiddelde waterstanden toegepast, terwijl in het LMW 10-minutenwaterstanden gebruikt. Dat levert een stabielere afvoer op. Tweede voordeel is dat er in de LMW-waterstanden geen hiaten meer zijn waardoor ook in de afvoeren geen hiaten voorkomen. In het LMW worden hiaten in de afvoeren achteraf niet opgevuld en in de waterstanden wel.

Voor zowel Tiel als Olst zijn twee afvoerreeksen aangeleverd. Reden is de beschikbaarheid van twee Qh-relaties.

1. QH2010: officiële QH-relatie zoals ook opgenomen in LMW
2. QH2013: In 2013 heeft een actualisatie van de Qh-relaties plaatsgevonden met afvoermetingen tot en met 2012. Zie hiervoor Rura (2013). Deze is niet opgenomen in het LMW.

Deze validatie kan inzicht bgeven in de meerwaarde van de geactualiseerde Qh-relaties, al moet daarbij bedacht worden dat het riviersysteem sindsdien grootschalig is veranderd (aanleg langsdammen, uitvoering herinrichting uiterwaarden Olst bij Fortmond en Welsum).

Voor Olst is door RWS-ON ten behoeve van de validatie van D-Hydro IJVD in juni 2021 een tijdelijke Qh-relatie afgeleid. Omdat de afvoer bij Olst een bovenrand is voor het IJVD-model is geoordeeld dat een zo goed mogelijke randvoorwaarde nodig was. Er was gebleken dat beide QH-relaties niet passen bij de ADCP-metingen tijdens de afvoergolf van begin januari 2018. Voor deze validatie is de afvoerreeks voor IJVD niet meegenomen.

3 Kunstwerksturing

In de berekeningen vindt de aansturing van een deel van de kunstwerken plaats op basis van tijdreeksen gebaseerd op gemeten gegevens. Omdat bedieningsgegevens niet beschikbaar zijn, is het openen en sluiten van kunstwerken afgeleid uit de beschikbare waterstandsmetingen. Het is niet altijd eenduidig om uit meetgegevens het exacte moment af te leiden. Daarom zijn aannames gedaan.

Driel

initieel	open
6-12-2017 03:10	sturing op waterstand
13-12-2017 10:10	open
13-2-2018 10:10	sturing op waterstand
21-2-2018 05:40	open
24-2-2018 15:10	sturing op waterstand

Amerongen

initieel	sturing op waterstand
14-12-2017 07:50	open
22-12-2017 18:40	sturing op waterstand
3-1-2018 06:10	open
15-1-2018 19:00	sturing op waterstand
19-1-2018 08:40	open
6-2-2018 15:10	sturing op waterstand

Hagestein

initieel	sturing op waterstand
14-12-2017 08:50	open
22-12-2017 12:00	sturing op waterstand
3-1-2018 10:50	open
15-1-2018 22:20	sturing op waterstand
19-1-2018 11:10	open
6-2-2018 09:40	sturing op waterstand

De tijdstippen voor de keerschuij Ravenswaaij en de Prinses Marijkesluizen zijn deels gebaseerd op de ontvangen informatie van RWS-MN over de bediening (zie bijlage B).

Keerschuij Ravenswaaij

6-1-2018 13:00	sluiten
----------------	---------

15-1-2018 10:00	openen
25-1-2018 12:00	sluiten
2-2-2018 10:00	openen

Prinses Marijkesluizen

6-1-2018 15:00	sluiten
14-1-2018 06:00	openen
25-1-2018 14:00	sluiten
1-2-2018 13:00	openen

4 Referenties

- Rura, 2013. Samenstellen Qh-relaties Tiel en Olst, Rura Memo 130812R-2. 22-oktober 2013
- Rura, 2018. Actualisatie beschrijving laterale toestroming Rijntakken. P180510R. Rura Arnhem en Acima. 3 oktober 2018.
 - Memo P180510R-1: Belangrijke beken Rijntakken
 - Memo P180510R-2: Overige lateralen Rijntakken
 - Memo P180510R-5: Schutdebieten
 - Memo P180510R-6: Afvoermetingen op kanalen
 - Memo P180510R-7: Afgesloten kanaalpannen
 - Memo P180510R-8: Afhandeling laterale rivieren
 - Memo P180510R-10: Afvoermetingen bij gemalen
- Spruyt, A., 2019. Relatie waterstand Hardinxveld en Werkendam. Deltares Memo 11203714-005-ZWS-0001, 12 april 2019
- Svasek, 2019. Opstellen Qf relaties 2018. Data-analyse en modelstudie. Definitief. Rapport 1961/U19462/E/BvL. Sam Bom en Bas van Leeuwen (Svašek Hydraulics). 24 december 2019.

Met vriendelijke groet,

Ir. D. Beyer
Rivierkundig adviseur

B Bepaling laterale uitwisselingen

De tekst in deze bijlage is aangeleverd door RWS-ON.

B.1 Inleiding

Voor de bepaling van de laterale uitwisselingen wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van beschikbare meetgegevens. Het betreft afvoermetingen van beken, gemalen en enkele kanalen, en waterstanden voor de bepaling van vervallen bij sluizen. Er zijn echter vele laterale in- en uitstromingen die niet bekend zijn. Hiervoor zijn regressieformuleringen afgeleid (Rura, 2018) en verwerkt in de RGWM. Daarnaast wordt de afvoer van het gemaal Marijkesluizen als onttrekking en lozing opgelegd.

Er is speciale aandacht besteed aan het opvullen van hiaten in de metingen. Hiaten in de meetgegevens worden automatisch door de RGWM opgevuld. Echter daarbij worden de regressiefuncties toegepast die gemiddeld goed werken, maar dat hoeft in de betreffende periode niet zo te zijn. Daarom is het nodig om kleine hiaten in de meetgegevens handmatig op te vullen. Dit is gebeurd op verschillende manieren. Lineaire interpolatie is de meest eenvoudige en in veel gevallen geschikt. Het toepassen van de beschikbare regressiefunctie is beter als het hiaat langer is en er bij omringende meetlocaties duidelijke afvoervariaties aanwezig zijn. De regressiefunctie is indien nodig passend gemaakt op de wel beschikbare metingen door deze iets aan te passen. Interpoleren in 10-minutengegevens die slingeren kan niet zomaar. Er is gekozen om te interpoleren in de uurgemiddelde afvoeren. In gemeten afvoeren komen ook negatieve waardes voor. Dit kan voorkomen onder invloed van wind of door lokale onttrekkingen. Omdat er op de locaties niet onttrokken wordt uit de rivier worden negatieve waardes vervangen door 0.

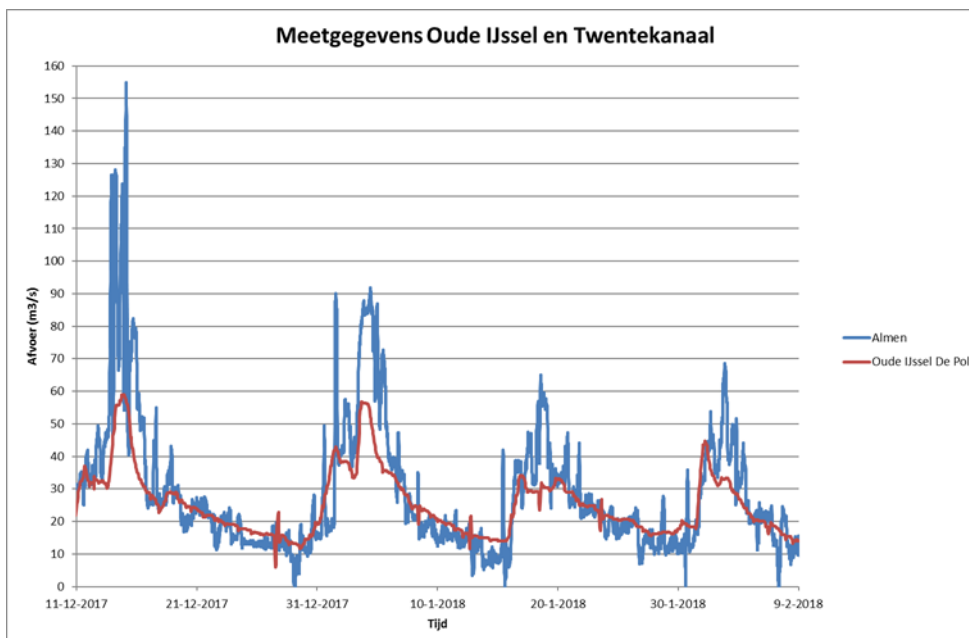
Hieronder worden de verschillende categorieën gegevens beschreven.

B.2 Afvoeren beken/gemalen

Voor de Oude IJssel worden uurgegevens van waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) gebruikt (zie Figuur B.1). De hoofdlocatie is stuw de Pol en deze afvoer wordt vertaald naar Doesburg. De omrekening via de RGWM naar Doesburg is vergeleken met de afvoergegevens van het waterschap zelf; deze komen goed overeen.

Voor het Twentekanaal zijn vanuit het LMW de ADM-afvoermetingen gebruikt bij Almen (samen met de afvoer van de Oude IJssel geplot in Figuur B.1). De 10-minuten afvoeren zijn vrijwel compleet. De aanwezige kleine hiaten in de 10-minutengegevens zijn ingevuld via lineaire interpolatie tussen de uurgemiddelde afvoeren.

Op 14 en 15 december 2017 bereikt Almen viermaal een afvoer van $> 120 \text{ m}^3/\text{s}$ en één daarvan bereikt een piek van $155 \text{ m}^3/\text{s}$. Er is gecontroleerd of dit realistisch is. Uit de afvoermetingen van LMW Markelo-brug blijkt dat deze viermaal een piek bereiken van 60-70 m^3/s . Tussen Markelo-brug en Almen vinden twee lozingen plaats, namelijk bij Haarlo Bolksbeek en Lochem aflatwerk (beide van WRIJ). Deze beide bedragen rond 30 m^3/s . De som van de drie komt dus meermalen rond 120 à 130 m^3/s uit. Door het aanpassen van de aflat bij Eefde kan er gedurende enige tijd ook een grotere afvoer passeren.



Figuur B.1 Selectie meetgegevens (deelperiode).

Van waterschap Rijn en IJssel zijn de volgende andere uurafvoergegevens gebruikt (van boven- naar benedenstrooms):

- de Zwalm (Liemers)
Hiaten zijn opgevuld met lineaire interpolatie.
- Broekhuizerwater (Bevermeer),
negatieve waarden verwijderd (op 0 gezet); er kan hier niet worden onttrokken. Hiaten zijn opgevuld met regressie.
- Grote Beek
De reeks is volledig, maar alle gegevens zijn uitgemiddeld met een 2-uurs centraal gemiddelde.
- Baakse Beek en Kanaal van Hackfort (Groene kanaal)
Kleine hiaten ingevuld met lineaire interpolatie. Groot hiaat rond 18 januari 2018 ingevuld o.b.v. regressie van totale afvoer Baakse Beek+Kanaal van Hackfort met Schipbeek. De regressie is aangepast om het passend te maken op wel beschikbare gegevens. De verdeling over beide lateralen vindt plaats conform Rura (2018).
Wel beschikbare metingen van Kanaal van Hackfort zijn veel lager dan uit de regressie volgt. Dat zou betekenen dat de Baakse beek een veel grotere afvoer zou krijgen. Mogelijk heeft de storm hier mee te maken: W-NW wind die leidt tot minder water via Kanaal van Hackfort. Uit beschikbare waterstanden rond het verdeelwerk is dit niet duidelijk. Een andere mogelijkheid is dat de regressie leidt tot een te grote totale afvoer; de Grote beek heeft niet een duidelijke afvoerpiek. De metingen zouden dan wel goed zijn met een normale afvoer voor de Baakse Beek. Gekozen is om de genoemde metingen van Kanaal van Hackfort te negeren.
- Gemaal Helbergen
De beschikbare metingen zijn slechts beschikbaar tussen 5 en 12 december 2017 en vanaf 14 februari 2018. Het betreft alleen de vrije lozing; de bijdrage van het gemaal ontbreekt. Automatische regressie levert een te lage afvoer op in vergelijking met metingen. Daarom zijn de hiaten ingevuld met bijna tweemaal hogere regressie ($2 \cdot 0,0443 \cdot Q_{OY} + 0,18$). Pompgegevens van Helbergen laten zien dat als er gemalen wordt, dit bijna altijd met één pomp gebeurt, behalve rond 14/15 december. Een pomp levert $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$, en de toegepaste regressie komt soms wat hoger uit.
- Afleidingskanaal Berkel
Eén hiaatperiode is opgevuld met lineaire interpolatie.

- Dommerbeek
De meting betreft alleen de vrije lozing. Hiaten zijn ingevuld op basis van een aangepaste regressie met de afvoer Oude IJssel. Er is een reductiefactor van 0,3 toegepast om de regressie aan te laten sluiten op metingen.
- Schipbeek
De meetgegevens zijn omgerekend van locatie A1 naar Kloosterstuw volgens de regressie van Rura (2018). Het nadeel van deze omrekening is dat alle afvoeren bij Kloosterstuw lager zijn dan bij A1, en dat is niet logisch. Er is nadere aandacht nodig om dit te verbeteren.

Van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) zijn gebruikt de meetgegevens van de ADM bij Wijk bij Duurstede Kromme Rijn. De basismetreeks is 1 uur verschoven aangezien de meting van HDSR in GMT plaatsvindt. Daarna is een centraal 2-uurs gemiddelde berekend om slingeringen te verwijderen. Hiaten in de 15-min gegevens zijn ingevuld met een lineaire interpolatie tussen de 2-uursgemiddelden of 1-uursgemiddelden. Waarden kleiner dan nul zijn verwijderd omdat er niet geloosd kan worden. De afvoeren zijn opgelegd als onttrekking (negatieve waarde). Daarna is een uurreeks gemaakt (waarden op het hele uur), al kan de RGWM 15 min reeksen verwerken. De meetgegevens van de inlaat bij Vreeswijk (HDSR) zijn niet gebruikt. Er is nader contact nodig met HDSR over de metingen.

B.3 Afvoeren ADM kanalen

Voor het Amsterdam-Rijnkanaal bij Wijk bij Duurstede, en het Lekkanaal bij Nieuwegein zijn ADM-afvoeren uit het LMW toegepast. Van beide locaties zijn over de hele periode 10-minutengegevens opgenomen in de invoer. Voor hiaten is uiteindelijk gekozen voor een lineaire interpolatie tussen de 2-uurgemiddelde afvoeren. Daarbij is rekening gehouden met de juiste positie in de 10-minutenreeks. In enkele periodes zijn de hiaten opgevuld op basis van 1-uurgemiddelden omdat er meerdere hiaten kort bij elkaar waren (bv. Wijk bij Duurstede 17-2-2018 1:40 en 3:10). Enkele 10-minutenwaarden rond hiaten zijn overschreven met geïnterpoleerde waarde om de interpolatie goed te kunnen uitvoeren (bv. Wijk bij Duurstede 14-12-2017 12:00-12:20).

Op het Lekkanaal zit bij Nieuwegein het drinkwaterinnamepunt Cornelis Biemond. De afvoermeting van de ADM Nieuwegein wordt in de RGWM gecorrigeerd voor deze waterinname aangezien de drinkwaterinname een extra onttrekking is aan de Lek.

NB: de toegepaste interpolatiemethode levert niet dezelfde 2-uurgemiddelde afvoeren op als de interpolatie. Aanbevolen wordt om na te denken over een andere methode.

B.4 Vervallen ten behoeve van schutverliezen

Voor de bepaling van de schutverliezen bij sluizen zijn vervallen nodig. Indien er meetgegevens zijn, heeft dat de voorkeur boven een afleiding uit de afvoer bij Lobith. De benodigde meetgegevens van de LMW-stations zijn overgenomen. Om de vervallen te bepalen zijn extra waterstanden nodig op de Maas bij Mook (voor sluis Weurt) en Heesbeen (voor de Wilhelminasluis op de Afdamde Maas). Indien nodig worden er correcties toegepast voor de periodes dat de keersluizen bij Heumen dan wel de keersluis in het Heusdensch kanaal gesloten zijn; in die gevallen zijn de gemeten waterstanden te hoog. Voor de Koninginnesluis in Vreeswijk en de Grote sluis van Vianen zijn de waterstandsmetingen van Vreeswijk (HDSR) toegepast. Voor de Prinses Marijkesluizen zijn de waterstandsmetingen van Voorhavendijk (HDSR) toegepast. Voor de bepaling van de vervallen worden alleen de waarden op het hele uur gebruikt.

Een overzicht van de gebruikte meetlocaties is gegeven in Tabel B.1. De vervallen zijn als volgt bepaald: Waterstand 1 min Waterstand 2.

Tabel B.1 Overzicht meetlocaties t.b.v. bepaling schutverliezen bij sluizen.

Sluis	Waterstand 1	Waterstand 2
Weurt	Mook	Nijmegen-haven
Prins-Bernhardsluizen	Tiel-Waal	Tiel-kanaal
Wilhelminasluis Andel	Heesbeen	Vuren
Prinses-Marijkesluizen	Tiel-kanaal	Voorhavendijk (HDSR)
Grote sluis Vianen	0.5 m+NAP	Vreeswijk (HDSR)
Koninginnesluis Vreeswijk	Vreeswijk (HDSR)	0.6 m+NAP

De waterstanden Voorhavendijk zijn identiek aan degene die zijn gebruikt voor de bepaling van de gemaalafvoer Marijkesluizen (zie paragraaf B.7). Buiten de sluitingsperiode is het verval handmatig op 0 gezet.

Voor de Koninginnensluis en Grote sluis Vianen zijn de metingen van HDSR Vreeswijk_Lek gebruikt. Van de 15-minutengegevens zijn alleen de waarden op het hele uur gebruikt. Hiaten in de waterstanden zijn ingevuld conform Rura (2018), memo 5 Schutdebieten bijlage 4:

$$\text{LMW Hagebe} - 0.1344 * (\text{LMW Hagebe} - \text{LMW Schoonho}).$$

Ook de laagwaterstanden in de metingen rond en lager dan -0,36 m+NAP zijn gecorrigeerd conform de formule; in de metingen kan de waterstand niet lager worden dan -0.36 m+NAP. Bij HDSR zijn ook metingen beschikbaar op de locatie Vreeswijk_Merwedekanaal (aan de noordzijde van de sluis). Voor de eenvoud is hieruit een gemiddelde waterstand van 0,6 afgeleid.

Het kanaalpeil van het Merwedekanaal zuid (zuidzijde Grote Sluis Vianen) is aangenomen op 0.5 m+NAP.

NB: alle vervallen zijn gedefinieerd van zuid naar noord conform Rura (2018), dus niet hoe de lateraal functioneert. Dus de Prinses Marijkesluizen (loost van noord naar zuid) heeft negatieve vervallen; in RGWM wordt dit omgezet naar de juiste lozing/onttrekking.

Bij de opbouw van de bestanden voor de modelbouw was dit niet consequent doorgevoerd. In 1993, 1995 en 2011 was het gemeten verval van de Marijkesluizen wel positief gemaakt en is de yml aangepast. Voor deze validatie is wel de juiste definitie gehanteerd en is de yml gecorrigeerd (zie ook paragraaf B.5). Het belang van het toepassen van de juiste definitie zit in de bepaling van de vervallen als er geen meting is; die staat nl. ook in de yml.

Op basis van het (negatieve) verval voor de Koninginnesluis werd in de yml een lozing berekend. Dat klopt niet en is nu gecorrigeerd.

B.5 Invoerbestanden en aanpassingen yml

Alle meetgegevens zijn opgenomen in invoerbestanden (*.tim). Dit zijn ASCII-tekstbestanden waarin het begintijdstip en de frequentie van de gegevens staat. Daaronder staan alle getallen. Hiaten kunnen worden opgenomen met #N/B.

Naast invoer voor de lateralen is ook invoer aangemaakt voor de randvoorwaarden. Dit zijn bestanden voor Dornick, Lobith en de waterstanden op de benedenranden.

In het invoerbestand (*.yml) staan per locatie de invoerbestanden genoemd. Ontbreekt het invoerbestand, dan wordt een regressie toegepast.

Het nieuwe yml-bestand is rgwm_lat_rijn_j18-v1.yml. Als basis is gebruikt het bestand rgwm_lat_rijn_j16-v2.yml.

De volgende wijzigingen zijn doorgevoerd:

- Naam 1_01_Emmerich.tim vervangen door 1_01_Dornick.tim
- Naam 6_07_Sluis_Konininginne.tim vervangen door 6_07_Sluis_Koniningne.tim
- Schutverliezen Marijkesluizen
 - alpha omgewisseld ten opzichte van eerdere yml
 - verval Marijkesluizen nu conform afspraak: negatief verval omdat verval van zuid naar noord geldt
 - onttrekkingslocatie (noordzijde): alpha = 1.00
 - lozingslocatie (zuidzijde): alpha = -1.00
- Schutverliezen Koninginnensluis (Vreeswijk)
 - alpha gewijzigd: positief verval naar noorden betekent onttrekking (negatief debiet)
 - alpha = -1.00
- Invoerbestand Helbergen (Vierakkerse Laak) en Dommerbeek toegevoegd aan yml.

B.6 Locaties lateralen

In Tabel B.2 staan alle locaties waarvoor lateralen worden opgelegd.

Tabel B.2 Overzicht laterale lozingen en onttrekkingen. Naamgeving volgens Baseline.

Lateraal	type	Afgeleid van
RH_852.4_L_Gemaal_Kalflack		Oude IJssel
BR_863.9_L_Gemaal_Kellener-Altrhein		Oude IJssel
BR_863.9_L_Gemaal_Spoykanal		Oude IJssel
WL_877.1_R_RWZI_Millingen-Gendt-buitendijks		Oude IJssel
WL_883.4_L_Gemaal_Hollandsch-Duitsch-Het-Meertje		Oude IJssel
WL_887.0_L_Sluis_Weurt	schutdebiet	
WL_889.1_L_RWZI_Nijmegen-buitendijks		Oude IJssel
WL_904.3_L_RWZI_Druten-buitendijks		Oude IJssel
WL_914.6_R_Inlaat_Echteldsedijk-Tiel	inlaat	
WL_926.2_L_Sluis_Sint-Andries	schutdebiet	
WL_933.2_L_RWZI_Bommelerwaard-Oost-buitendijks		Oude IJssel
WL_935.6_R_RWZI_Haaften-buitendijks		Oude IJssel
WL_943.0_L_RWZI_Aalst		Oude IJssel
BO_952.7_L_Pomp_Andel	pomp	
BO_952.7_L_Sluis_Andel	schutdebiet	
BO_952.7_L_Inlaat_Woudrichem	Inlaat	
BO_954.6_R_Inlaat_Gorinchem-Benedenstad	Inlaat	
BO_957.8_L_Gemaal_Altena-Land-van-Heusden-en-Altena		Oude IJssel
PK_870.3_L_Inlaat_Doorneburg-Linge	Inlaat	
PK_873.5_R_Gemaal_Kandia-Rijnstrangen		Oude IJssel
PK_876.2_L_Inlaat_Vitens-Arnhem-Zuid	Inlaat	
NR_881.9_R_Gemaal_t-Broek-Arnhem		Oude IJssel
NR_882.8_R_Beek_Sint-Jansbeek		Oude IJssel
NR_887.6_L_Gemaal_Drielsedijk-Arnhem-zuid		Oude IJssel
NR_889.7_R_Beek_Oosterbeekse-Beken		Oude IJssel

Lateraal	type	Afgeleid van
NR_897.0_R_Beek_Heelsumse-beken		Oude IJssel
NR_897.6_R_RWZI_Renkum-buitendijks		Oude IJssel
NR_899.5_R_Beek_Renkumse-beken		Oude IJssel
NR_902.0_L_Gemaal_Kuijk-Linge-1		Oude IJssel
NR_908.0_R_Inlaat_Grebbesluis-Valleikanaal	inlaat	
NR_913.0_R_RWZI_Rhenen-buitendijks		Oude IJssel
NR_918.4_L_RWZI_Eck-en-Wiel-buitendijks		Oude IJssel
NR_926.3_R_Inlaat_Kromme-Rijn	Inlaat	
LE_929.0_R_Sluis_Prinses-Irenesluizen	schutdebiet	
LE_950.0_R_Sluis_Prinses-Beatrixluizen	schutdebiet	
LE_950.4_L_Sluis_Grote-sluis-Vianen	schutdebiet	
LE_950.4_R_Inlaat_Oude-Sluis-Vreeswijk	inlaat	
LE_950.6_R_Sluis_Koninginnensluis-Vreeswijk	schutdebiet	
LE_952.0_R_RWZI_Nieuwegein-buitendijks		Oude IJssel
LE_962.0_L_Inlaat_Ameide	Inlaat	
LE_962.5_R_RWZI_Lopik-buitendijks		Oude IJssel
LE_964.7_R_Gemaal_Koekoek-Lopikerwaard		Oude IJssel
LE_971.0_L_RWZI_Gelkenes-buitendijks		Oude IJssel
LE_980.1_R_Gemaal_Krimpenerwaard		Oude IJssel
LE_986.6_L_RWZI_Nieuw-Lekkerland-buitendijks		Oude IJssel
LE_988.1_L_Gemaal_Elshoutsluis		Oude IJssel
IJ_883.5_R_RWZI_Nieuwgraaf	lozing	
IJ_885.7_L_Gemaal_Velperwaarden-Rozendaalsebeek-Beekhuizerbeek		Oude IJssel
IJ_889.0_L_Gemaal_Rheden-Beekhuizerbeek-Oost		Oude IJssel
IJ_897.2_R_Gemaal_Liemers-De-Zwalm		Oude IJssel
IJ_901.8_R_Gemaal_Bevermeer-Broekhuizerwater		Bevermeer
IJ_901.8_R_Beek_Oude-IJssel		Oude IJssel
IJ_904.8_L_Beek_Havikerwaard		Oude IJssel
IJ_911.6_L_Inlaat_sluis-Dieren-Apeldoorns-kanaal	Inlaat	
IJ_913.7_L_Gemaal_Soerense-beek		Oude IJssel
IJ_916.6_R_Gemaal_Grote-Beek		Grote Beek
IJ_918.3_L_Gemaal_van-Sytsema-Leuvenheimse-beek		Oude IJssel
IJ_921.5_R_Gemaal_Baakse-Beek		Baakse Beek
IJ_923.5_R_Beek_Groene-kanaal		Kanaal van Hackfort
IJ_925.9_L_Gemaal_Colenbrander-Oekense-beek-Rhienderense-beek		Oude IJssel
IJ_927.7_R_Gemaal_Helbergen-Vierakkerse-laak-Berkel		Oude IJssel
IJ_932.4_R_Beek_Flierderbeek		Oude IJssel
IJ_935.2_L_Gemaal_vd-Feltz-Voorsterbeek-Lage-Leiding		Oude IJssel

Lateraal	type	Afgeleid van
IJ_939.1_R_Gemaal_Dommerbeek		Oude IJssel
IJ_942.3_R_Beek_Schipbeek		Schipbeek
IJ_943.9_R_Gemaal_Ankersmit-Overijssels_kanaal		Oude IJssel
IJ_948.8_L_Gemaal_vd-Feltz-Toevoerkanaal-Terwolde		Oude IJssel
IJ_957.7_R_RWZI_Olst-buitendijks		Oude IJssel
IJ_974.8_R_Inlaat_Harculo	Inlaat	
IJ_977.7_L_Gemaal_Veluwe-Grote-wetering-Wapenveld		Oude IJssel
IJ_980.0_R_Gemaal_Katerveer-Zwolle-zuid-en-polder-Vijf-marken		Oude IJssel
IJ_982.2_L_Gemaal_Antlia-Gelderse-Stouwe		Oude IJssel
IJ_990.1_L_Gemaal_Adsum-Laag-en-hoog-Zalk		Oude IJssel
IJ_999.0_L_RWZI_Kampen	lozing	
IJ_999.9_R_Gemaal_Raasje		Oude IJssel
IJ_1001.7_R_Gemaal_Vosje		Oude IJssel
KT_1002.2_R_Gemaal_t-Katje		Oude IJssel
AR_71.3_C_Sluis_Prins-Bernhardsluis-zuid	schutdebiet	
AR_70.8_C_Sluis_Prins-Bernhardsluis-noord	schutdebiet	
AR_69.0_R_RWZI_Tiel	lozing	
AR_68.5_L_Gemaal_van-Beuningen-Linge_2		Oude IJssel
AR_64.7_L_Gemaal-Rijkwijkse-veld		Oude IJssel
AR_62.3_R_Inlaat_Drielandenpunt	Inlaat	
AR_62.2_L_Sluis_Prinses-Marijkesluizen-lozing	schutdebiet	
AR_61.9_L_Sluis_Prinses-Marijkesluizen-onttrekking	schutdebiet	
TK_3.3_R_Beek_Twentekanaal-Sluis-Eefde		Twentekanaal
TK_3.3_R_Pomp_Onttrekking-Twentekanaal	Onttrekking	
TK_3.2_R_Beek_Afleidingskanaal-Berkel		Twentekanaal
TK_0.8_L_Beek_Eefsebeek		Oude IJssel

B.7 Gemaal Marijkesluizen

Het gemaal Marijkesluizen loost op de Lek als de keerschuij Ravenswaaij en de Marijkesluizen gesloten zijn. Het doel is peilhandhaving op het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal.

De aansturing van het gemaal Marijkesluizen in de validatie vindt plaats via laterale uitwisselingen (onttrekking en lozing). De hiervoor benodigde afvoer is van tevoren berekend.

B.7.1 Methode

Er zijn zes lateralen aanwezig op het Betuwepand:

- AR_70.8_C_Sluis_Prins-Bernhardsluis-noord
- AR_69.0_R_RWZI_Tiel
- AR_68.5_L_Gemaal_van-Beuningen-Linge_2
- AR_64.7_L_Gemaal-Rijkwijkse-veld
- AR_62.3_R_Inlaat_Drielandenpunt
- AR_62.2_L_Sluis_Prinses-Marijkesluizen-lozing

Het gemeten peil op het Betuwepand is bekend via de (uurgemiddelde) waterstand bij Tiel-kanaal. Uit de waterstandsverandering per uur bij Tiel-kanaal is met de oppervlakte van het Betuwepand de netto afvoerverandering per uur te berekenen. De afvoer door het gemaal is de netto afvoerverandering plus de toevoer door de lateralen. De afvoer is berekend als een positieve waarde.

De oppervlakte is ontleend aan Baseline:

haven Tiel:	96,245 m ²
kanaal:	1,502,011 m ²
totaal:	1,598,256 m ²

Voor het bepalen van de tijdstippen, en het verval voor de lateraal Marijkesluizen worden ook metingen van Voorhavendijk (HDSR) gebruikt. Inspectie van de gegevens laat zien dat de metingen tijdens hoogwater ongeveer 5 cm lager zijn dan Tiel-kanaal rond het sluiten van de Marijkesluizen. Dit is aangepast voor de bepaling van de gemaalafvoer.

Alle lateralen worden opgegeven in een tijdreeks met een waarde op het hele uur. Dat betekent dat ook de gemaalafvoer op het hele uur bepaald moet worden. De berekening van de netto afvoerverandering op het kanaal gaat uit van een constante afvoer gedurende het gehele voorafgaande uur. Immers de waterstandsverandering is ten opzichte van het voorgaande uur.

Er wordt uitgegaan van de lateraal op het hele uur.

De lateralen zijn bekend uit een eerdere afleiding, namelijk voor de validatie van IJVD uit 2021. De reeksen voor de sluzen zijn aangepast. Door rekening te houden met de gemeten vervallen (zie paragraaf B.4) is de reeks verbeterd. Vooruitlopend op de herberekening van de lateralen, is de afvoer van de Bernhardsluizen gecorrigeerd door terug te rekenen naar een afvoer /m vervallen daarna het juiste verval te vermenigvuldigen. Uit de gecorrigeerde lozing van de Prins Bernhardsluizen is de afvoer door de Marijkesluizen (schutverliezen) herberekend.

De afvoer door het gemaal bedraagt in deze periode maximaal 36 m³/s en minimaal 0 m³/s. Grotere afvoeren zijn begrensd op 36 m³/s. Het restant is verdeeld over de voorgaande en volgende uur. Afvoeren kleiner dan 0 zijn vervangen door 0 m³/s. Het restant is genegeerd.

Een tijdje voor het openen van de sluzen na de hoogwatertop wordt gelijk water gemaakt (zie ook verderop). Dit gebeurt (vermoedelijk) door het openen van schuiven in de deuren; het gemaal staat inmiddels uit. Alhoewel het niet direct door het gemaal wordt gedaan, is besloten om de debieten die nodig zijn om het water te laten stijgen toch op te nemen. Dit in afwijking van de kalibratie/validatieberekeningen. Daarom staan er negatieve debieten in de reeks voor de lozing, en positieve debieten in de reeks voor de onttrekking.

Er zijn twee tijdseries gemaakt, één voor de onttrekking uit het Betuwepand, en één voor de lozing op de Lek. Deze zijn als .csv-bestand opgeleverd.

B.7.2 Bediening keerschuij en sluzen

Via RWS-MN is informatie ontvangen over de bediening van de keerschuij en de Marijkesluizen.

Hoogwater sluiten

6-1-2018	13:00	keerschuij gesloten
	16:00	waterstand (in kolk Pr. Marijkesluis) +5m20NAP en sluis in bedrijf genomen (betuwepand dicht)

Aanvullend direct opgestart met 4+2 pompen.

Gelijkwatermaken

13-1-2018 23:00 *gestart met gelijkwater maken*

14-1-2018 06:00 *sluizen geopend (open kolk)*

15-1-2018 ±10:00 *keerschuij geopend*

Hoogwater sluiten

25-1-2018 12:00 *keerschuij gesloten*

15:00 ± *waterstand (in kolk Pr. Marijkesluis) +5m20NAP en sluis in bedrijf genomen (betuwepand dicht)*

Aanvullend opgestart met 4+1 pomp

Gelijkwatermaken

1-2-2018 ?? *gelijkwatermaken*

13:00 *sluizen open voor vrije doorvaart (open kolk)*

2-2-2018 ±10:00 *keerschuij open*

Tevens is informatie ontvangen over de bediening van de pompen. Deze is nog niet verwerkt; dit is later zinvol om te vergelijken met de berekende afvoeren

Voor de kunstwerksturing zijn tijdstippen nodig. Voor de keerschuij Ravenswaaij zijn de bedieningsgegevens gebruikt aangezien dit niet uit de waterstandsmetingen is af te leiden (deze sluit eerder en wordt later geopend). De sluiting van de Marijkesluizen is afgeleid uit de waterstanden.

Het resultaat is (ook opgenomen in Bijlage A):

Keerschuij Ravenswaaij

6-1-2018 13:00	sluiten
15-1-2018 10:00	openen
25-1-2018 12:00	sluiten
2-2-2018 10:00	openen

Prinses Marijkesluizen

6-1-2018 15:00	sluiten
14-1-2018 06:00	openen
25-1-2018 14:00	sluiten
1-2-2018 13:00	openen

B.7.3

Opmerkingen

In werkelijkheid zijn de afvoeren door het gemaal groter omdat de afvoer van gemaal van Beuningen wordt onderschat (geen rekening gehouden met kwel). De afvoer van het gemaal van Beuningen wordt in deze periode zelfs negatief. De berekening is zo uitgevoerd dat de gemeten waterstanden zo goed mogelijk gevolgd worden, gegeven de beschikbare lateralen. In werkelijkheid zullen pompen aan- en uitgeschakeld worden en zal het afvoeroverloop grilliger zijn. De huidige berekening laat het gemaal een uur eerder aangaan dan in de informatie van RWS-MN blijkt. Het is niet bekend waarom. Ook de door RWS-MN genoemde waterstanden (5.20 m +NAP bereikt) klopt niet met de metingen.

Naschrift

Op basis van de validatieresultaten is opnieuw gekeken naar de berekening van het gemaaldebiet. De hierboven beschreven correctie van de schutverliezen door de Prins Bernhardsluizen en de Prinses Marijkesluizen blijkt niet juist te zijn. Uit de definitieve lateralen blijkt dat de totale bijdrage van de lateralen tussen 0.1 en 0.5 m³/s groter is dan in rekening is gebracht. Dat voert terug op iets hogere schutverliezen. Bij de berekening voor het gemaaldebiet is het lekverlies genegeerd dat voor beide sluisen 0.10 m³/s/m verval bedraagt. Dit verklaart de waterstandsstijging gedurende beide sluitingen. Elke cm waterstandsstijging bij Tiel-kanaal in een uur komt overeen met ongeveer 4.5 m³/s. In de eerste sluiting van 176 uur is de gesommeerde afvoerfout ongeveer 50 m³/s, en daarmee ongeveer 10 cm.

B.8 Referenties

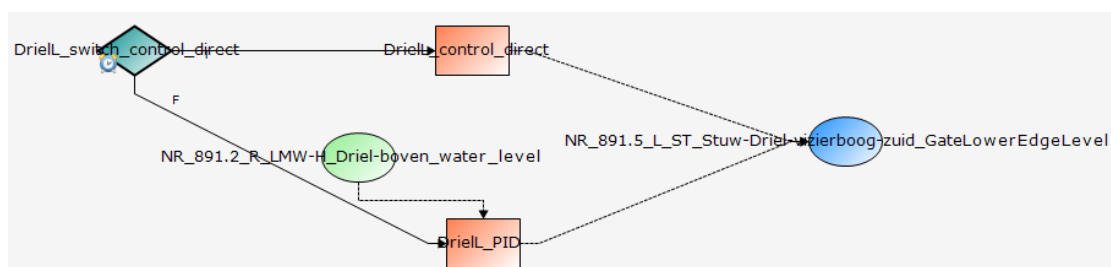
- Rura, 2018. Actualisatie beschrijving laterale toestroming Rijntakken. P180510R. Rura Arnhem en Acima. 3 oktober 2018.
 - Memo P180510R-1: Belangrijke beken Rijntakken
 - Memo P180510R-2: Overige lateralen Rijntakken
 - Memo P180510R-5: Schutdebieten
 - Memo P180510R-6: Afvoermetingen op kanalen
 - Memo P180510R-7: Afgesloten kanaalpanden
 - Memo P180510R-8: Afhandeling laterale rivieren
 - Memo P180510R-10: Afvoermetingen bij gemalen

C Sturing stuwen Driel, Amerongen en Hagestein

In Figuur C.1 is de D-RTC control group voor de zuidelijke vizierschuif van stuw Driel gegeven. De control groups voor de overige vizierschuiven van Driel, Amerongen en Hagestein zijn vergelijkbaar.

Het schema kan als volgt worden gelezen:

- De groenblauwe ruit geeft een **conditie** aan. In elke RTC-tijdstap wordt gecontroleerd of de gedefinieerde conditie waar of onwaar is. In dit geval bestaat de conditie uit een tijdserie met waarden 1 en 0 (waar en onwaar). Wanneer de conditie waar is (true, aangegeven met T in het schema) wordt de regel Driell_control_direct geactiveerd.
- De **regel** Driell_control_direct bestaat uit een tijdserie met een constante waarde voor de hoogte onderkant deur (GateLowerEdgeLevel) van de zuidelijke vizierboog van Driel. Hiermee kan de stuw geforceerd open worden gezet. In het geval van Driel is de constante waarde 12 m +NAP.
- Wanneer de conditie onwaar is (false, aangegeven met F in het schema) wordt de **regel** Driell_PID geactiveerd. Dit is een zogenaamde PID-regel, waarmee wordt getracht het opgegeven streefpeil bovenstreams van de stuw zo goed mogelijk te benaderen door de stuw verder open of dicht te zetten. In elke RTC-tijdstap wordt de waterstand uit het model (bij D-FLOW **uitvoerlocatie** Driel-boven, de groene ovaal) vergeleken met het streefpeil dat op dat moment geldt. Op basis van het verschil tussen deze waarden (de fout) wordt de stand van de stuw aangepast. Een meer uitgebreide uitleg over PID-controllers is gegeven in Kusters (2022). De PID-coëfficiënten zijn overgenomen uit het operationele model (zie Bijlage F in Kusters, 2022). Het streefpeil is in dit geval een tijdserie van gemeten waterstanden bij Driel-boven gedurende de validatieperiode.
- Met dit schema wordt de zuidelijke vizierboog van stuw Driel (RTC **uitvoerlocatie**, blauwe ovaal) aangestuurd.



Figuur C.1 D-RTC control group voor de zuidelijke vizierschuif van stuw Driel.

D Validatieresultaten D-HYDRO

D.1 Waterstanden LMW-stations

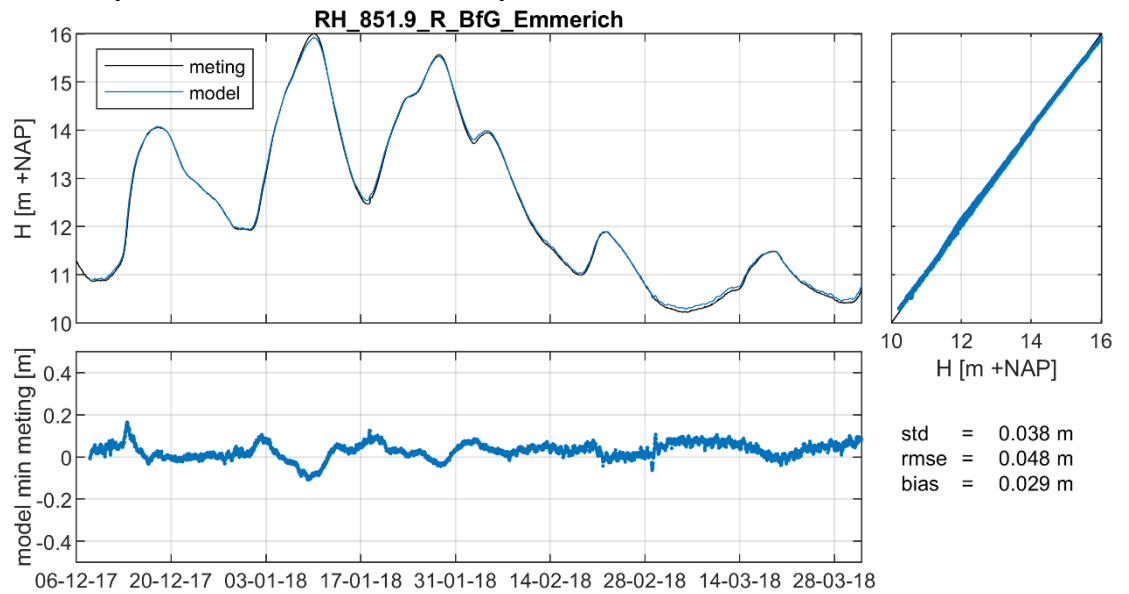
D.1.1 Topstanden

Tabel D.1 Verschil tussen gemeten en berekende topstand voor alle LMW-stations.

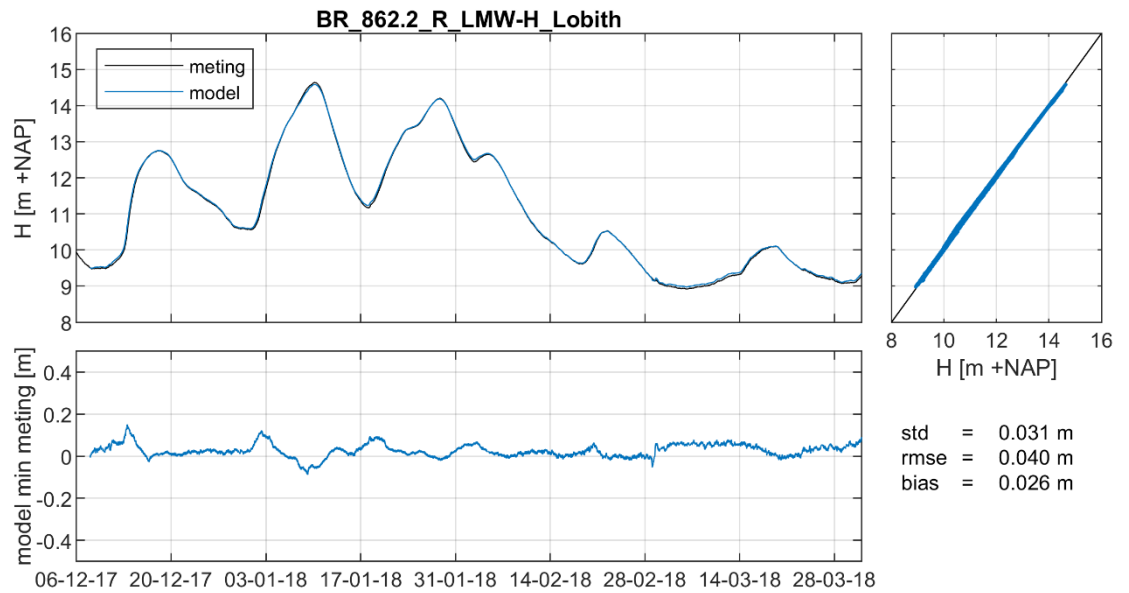
station	tijdstip piek (gemeten)	topstand model [m +NAP]	topstand meting [m +NAP]	model min meting [m]	Δt model min meting [uur]
RH_851.9_R_BfG_Emmerich	10 jan 2018 01:30	15.92	16.01	-0.09	2
BR_862.2_R_LMW-H_Lobith	10 jan 2018 03:50	14.58	14.64	-0.06	1
BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven	10 jan 2018 03:30	14.38	14.45	-0.07	2
BR_867.2_L_LMW-H_Pann-kop	10 jan 2018 02:50	13.92	13.95	-0.03	4
WL_884.9_L_LMW-H_Nijmegen-haven	10 jan 2018 04:40	11.88	11.89	-0.01	6
WL_901.4_R_LMW-H_Dodewaard	10 jan 2018 11:20	10.13	10.16	-0.03	3
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal-g6	10 jan 2018 10:40	8.77	8.86	-0.09	8
WL_926.1_L_LMW-H_Sint-Andries-Waal	10 jan 2018 08:00	7.15	7.21	-0.06	14
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	10 jan 2018 13:00	5.99	6.03	-0.04	17
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	11 jan 2018 01:40	3.31	3.41	-0.10	3
BO_961.0_C_LMW-H_Hardinxveld-RT	11 jan 2018 02:20	2.09	2.09	0.00	1
PK_869.4_R_LMW-H_Gr-Rivier-Pann-ben	13 jan 2018 01:10	11.24	11.77	-0.53	nvt
PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden	18 dec 2017 08:00	11.75	11.85	-0.10	-5
PK_876.4_L_LMW-H_Looveer-g6	10 jan 2018 10:30	12.68	12.7	-0.02	-1
PK_878.5_R_LMW-H_IJsselkop	10 jan 2018 15:10	12.36	12.41	-0.05	-5
NR_891.2_R_LMW-H_Driel-boven	10 jan 2018 14:30	10.82	10.82	0.00	4
NR_891.7_R_LMW-H_Driel-beneden	10 jan 2018 13:20	10.76	10.78	-0.02	5
NR_908.1_L_LMW-H_Grebbe	10 jan 2018 20:00	8.76	8.78	-0.02	7
NR_922.0_R_LMW-H_Amerongen-boven	11 jan 2018 03:50	6.89	6.83	0.06	4
NR_922.5_R_LMW-H_Amerongen-ben	11 jan 2018 04:40	6.75	6.77	-0.02	3
AR_70.8_L_LMW-H_Tiel-Kanaal	14 jan 2018 04:30	5.48	5.21	0.27	2
LE_939.8_L_LMW-H_Culemborg-brug	11 jan 2018 04:40	4.66	4.66	0.00	3
LE_946.6_R_LMW-H_Hagestein-boven	11 jan 2018 02:30	3.81	3.75	0.06	3
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	11 jan 2018 14:50	3.69	3.68	0.01	-10
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	03 jan 2018 17:00	2.36	2.4	-0.04	0
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-ad-Lek	03 jan 2018 16:20	2.23	2.23	0.00	0
IJ_879.1_R_LMW-H_HPleij-hwgeul	10 jan 2018 11:10	12.01	12.02	-0.01	1
IJ_879.6_R_LMW-H_Pleij-IJssel	10 jan 2018 13:40	12.23	12.24	-0.01	-3
IJ_881.1_R_LMW-H_Westervoort-IJsseld	10 jan 2018 11:20	12.00	12.03	-0.03	1
IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg	10 jan 2018 15:10	10.77	10.75	0.02	1
IJ_903.0_R_LMW-H_Doesburg-brug	10 jan 2018 21:50	9.71	9.69	0.02	-1
IJ_929.3_L_LMW-H_Zutphen-noord	11 jan 2018 09:30	7.38	7.42	-0.04	2
IJ_931.2_R_LMW-H_Eefde-beneden	11 jan 2018 09:30	7.18	7.21	-0.03	4
IJ_945.0_R_LMW-H_Deventer	11 jan 2018 06:00	5.88	5.86	0.02	9
IJ_957.1_R_LMW-H_Olst	11 jan 2018 10:00	4.99	4.98	0.01	7
IJ_965.2_R_LMW-H_Wijhe	11 jan 2018 13:50	4.12	4.17	-0.05	7
IJ_980.8_R_LMW-H_Katerveer	11 jan 2018 19:00	2.53	2.5	0.03	6
IJ_994.5_L_LMW-H_Kampen-bhaven	18 jan 2018 13:40	0.80	1.38	-0.58	1
IJ_1001.3_L_LMW-H_Keteldiep	18 jan 2018 13:20	0.70	1.24	-0.54	1
KM_LMW-H_Ramspolbrug-RT	18 jan 2018 13:00	0.66	1.12	-0.46	1
KM_LMW-H_Ketelhaven	18 jan 2018 12:40	0.65	0.88	-0.23	2
KM_LMW-H_Kammerhoek	03 jan 2018 16:50	0.59	0.59	0.00	0
VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord	18 jan 2018 13:20	0.69	1.28	-0.59	1

D.1.2

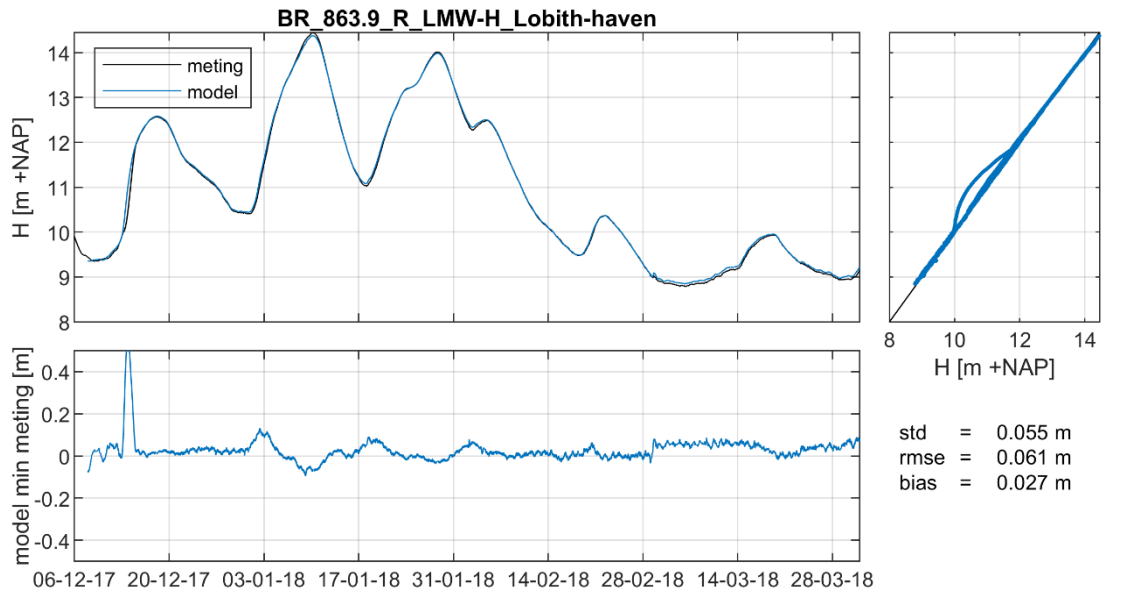
Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018



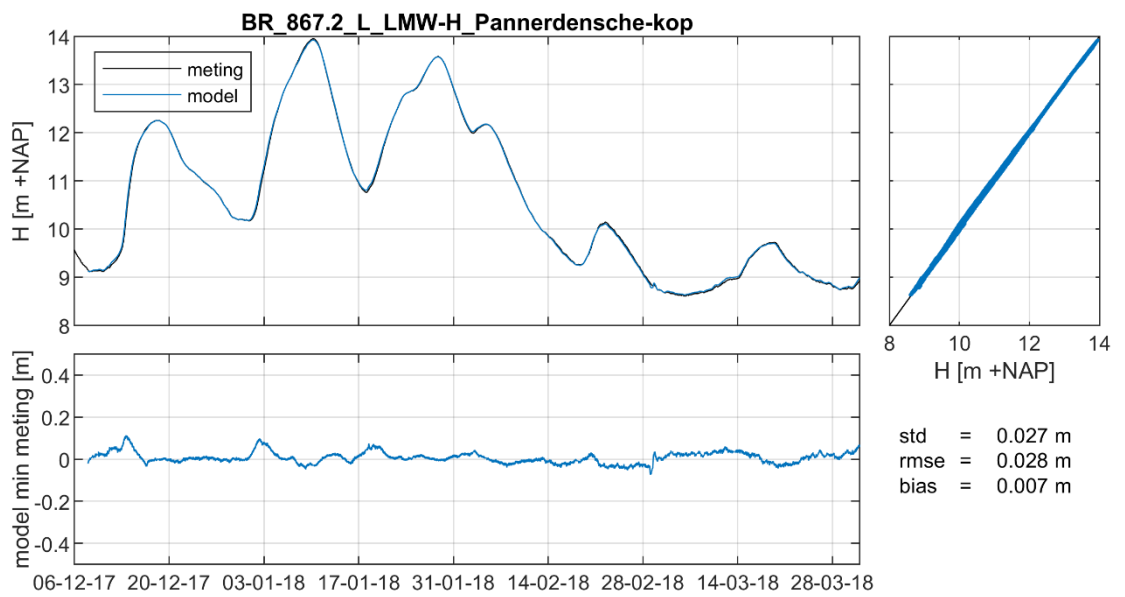
Figuur D.1 Emmerich.



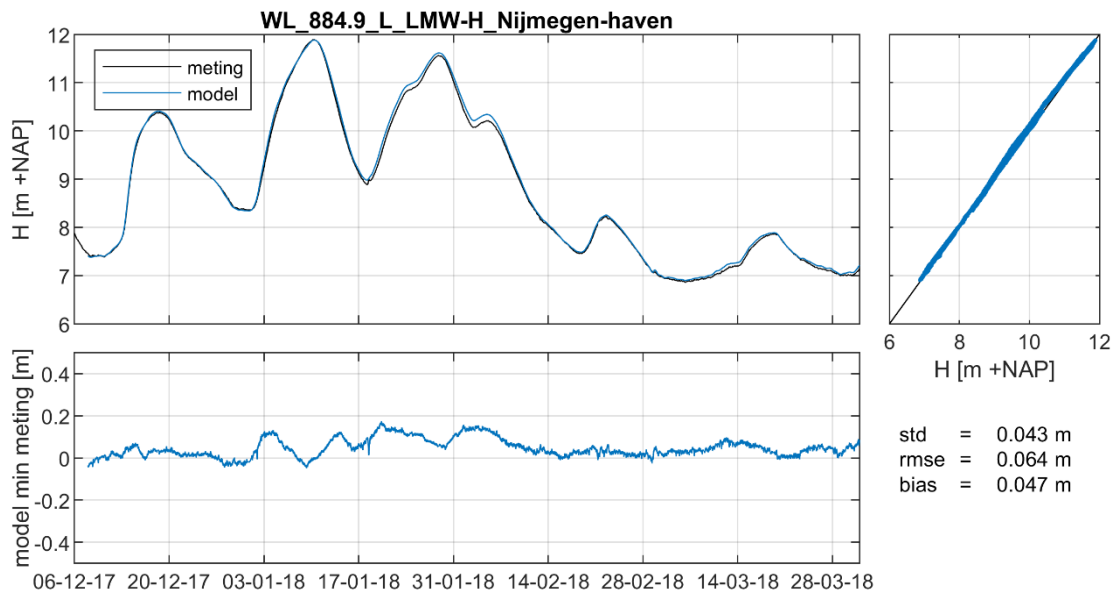
Figuur D.2 Lobith.



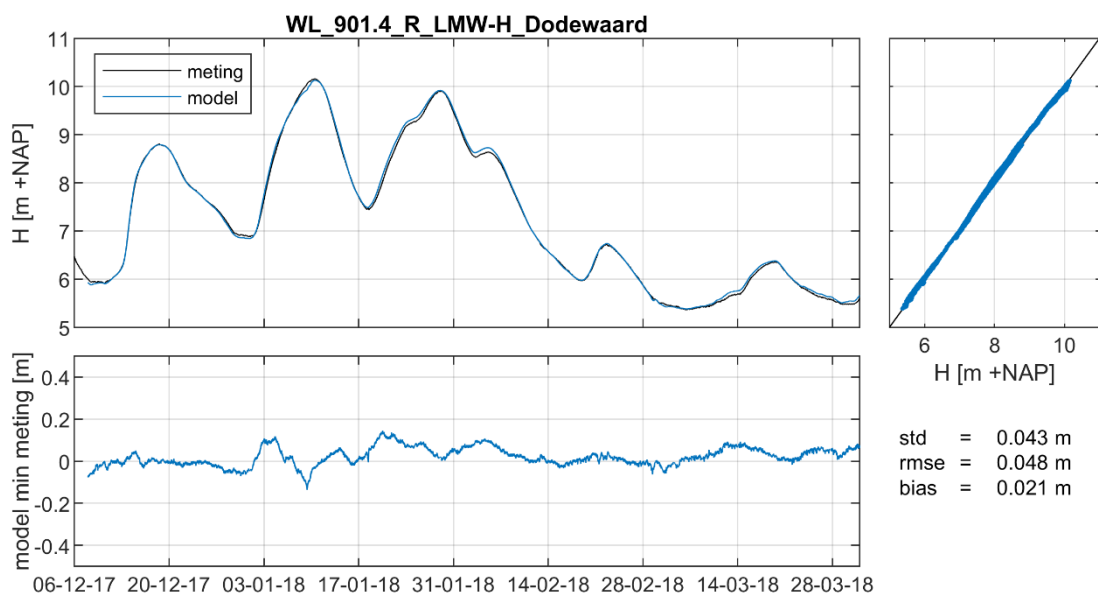
Figuur D.3 Lobith-haven.



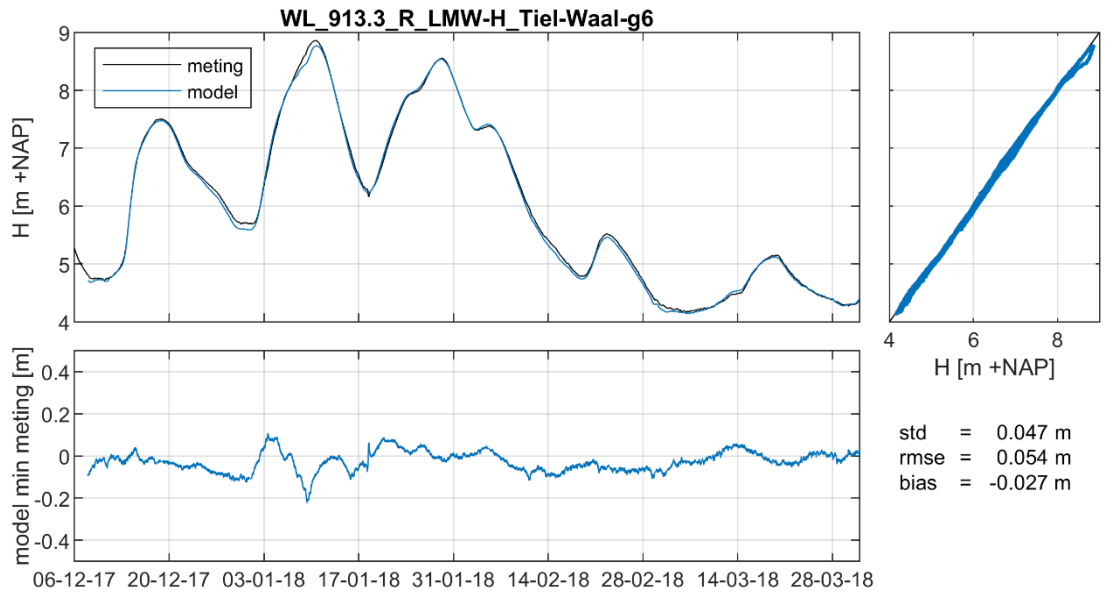
Figuur D.4 Pannerdensche Kop.



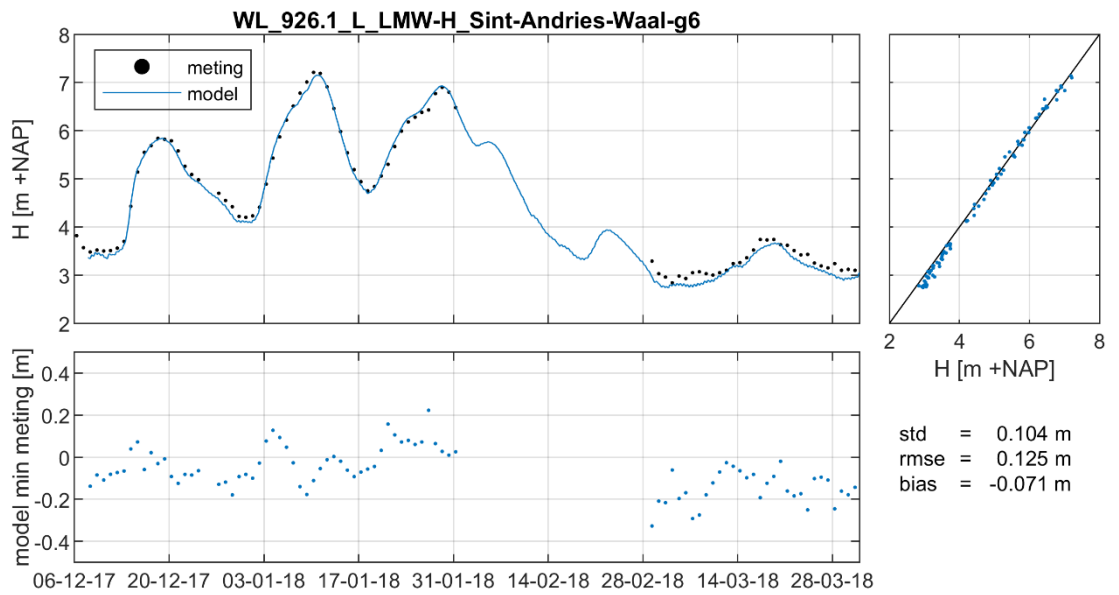
Figuur D.5 Nijmegen-haven.



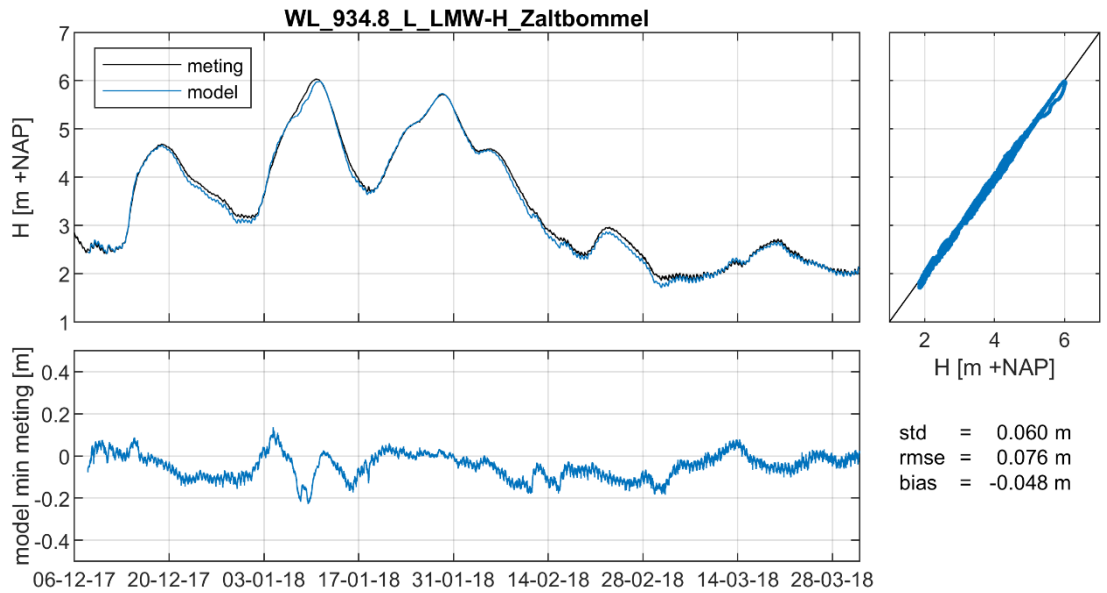
Figuur D.6 Dodewaard.



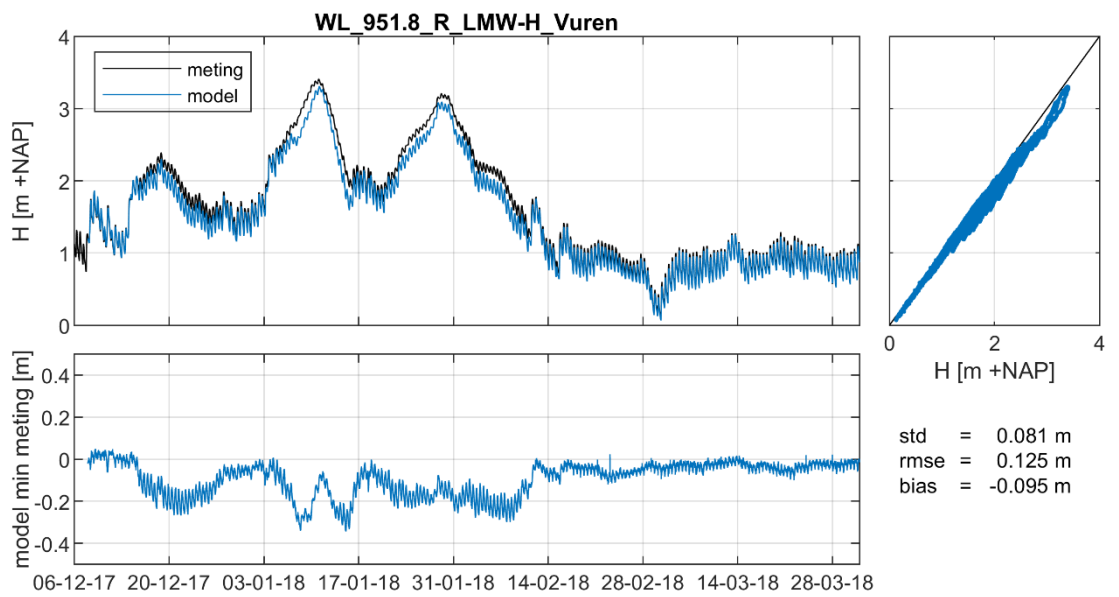
Figuur D.7 Tiel-Waal.



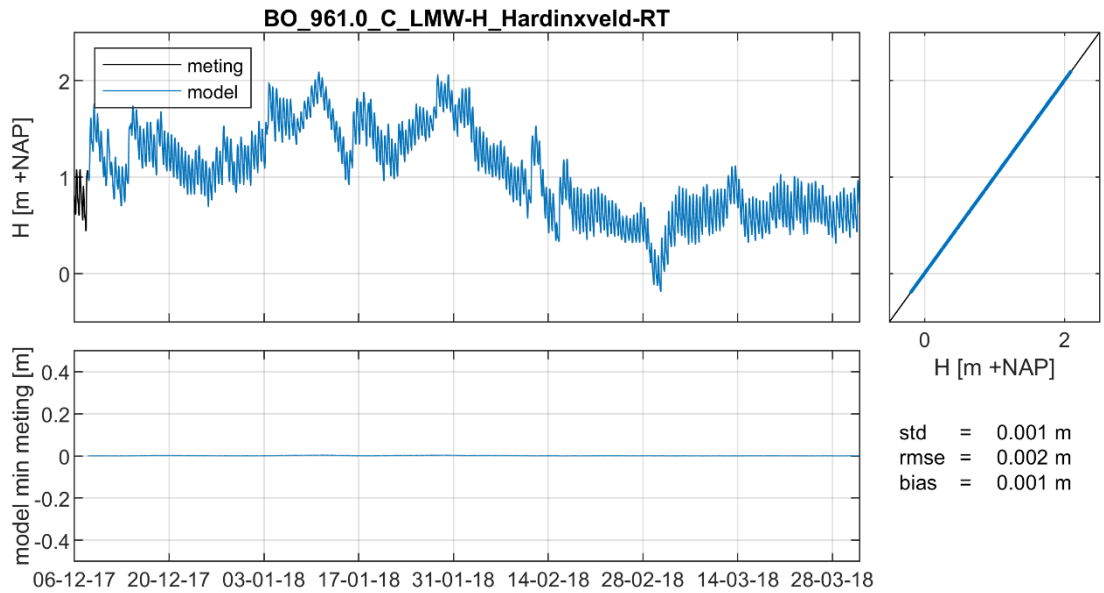
Figuur D.8 Sint-Andries Waal.



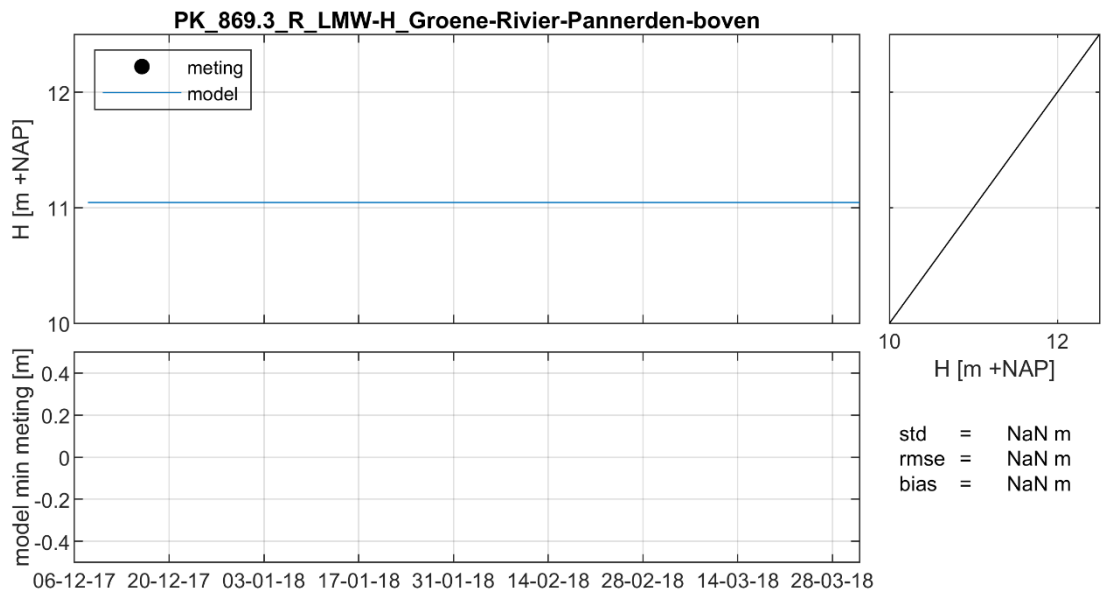
Figuur D.9 Zaltbommel.



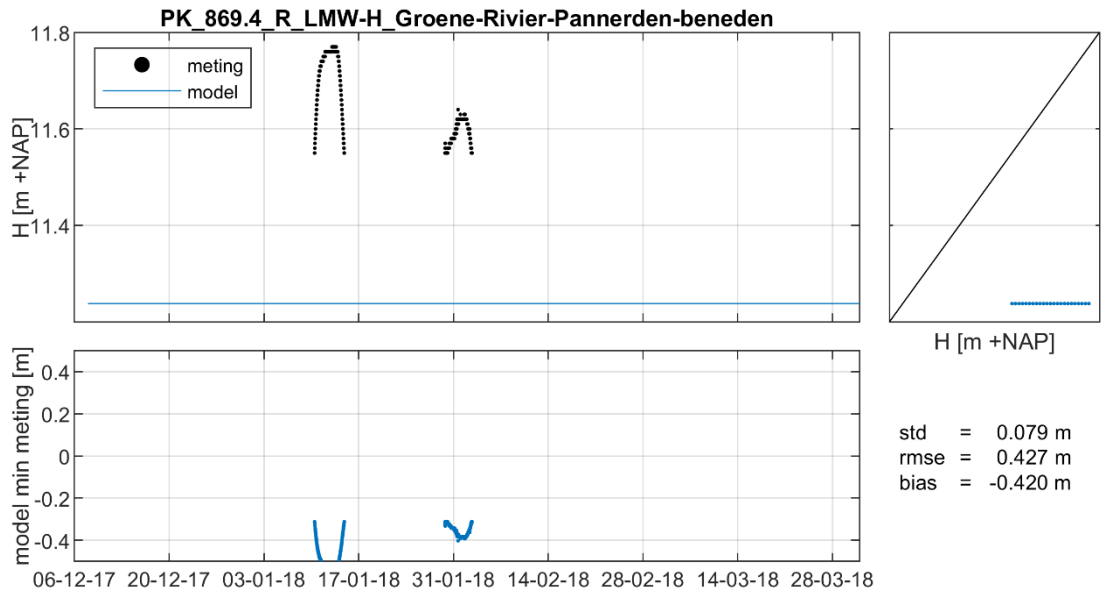
Figuur D.10 Vuren.



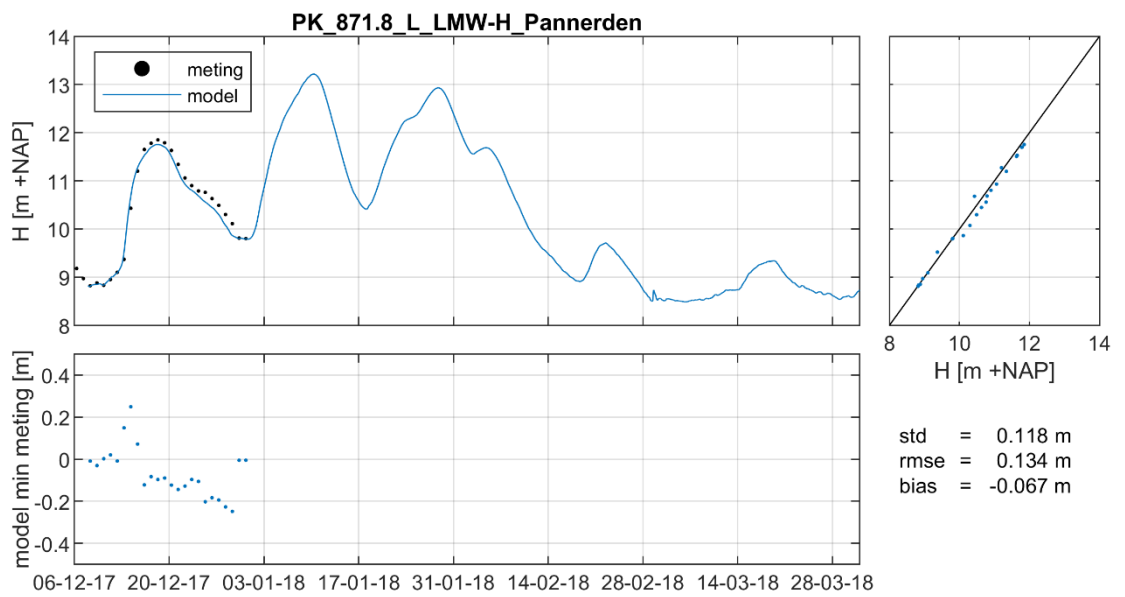
Figuur D.11 Hardinxveld.



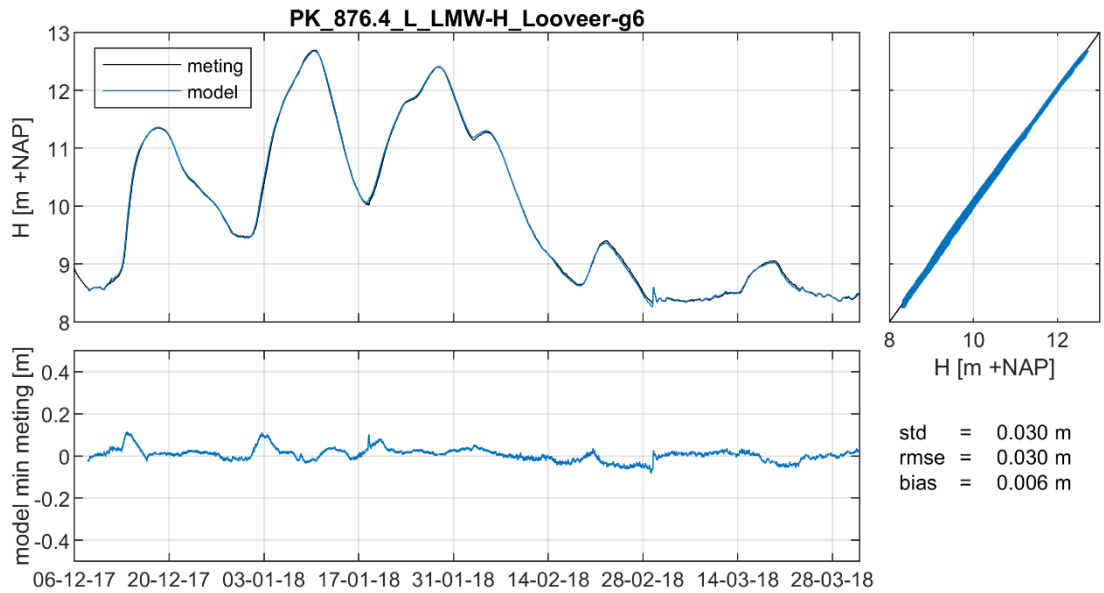
Figuur D.12 Groene Rivier Pannerden boven.



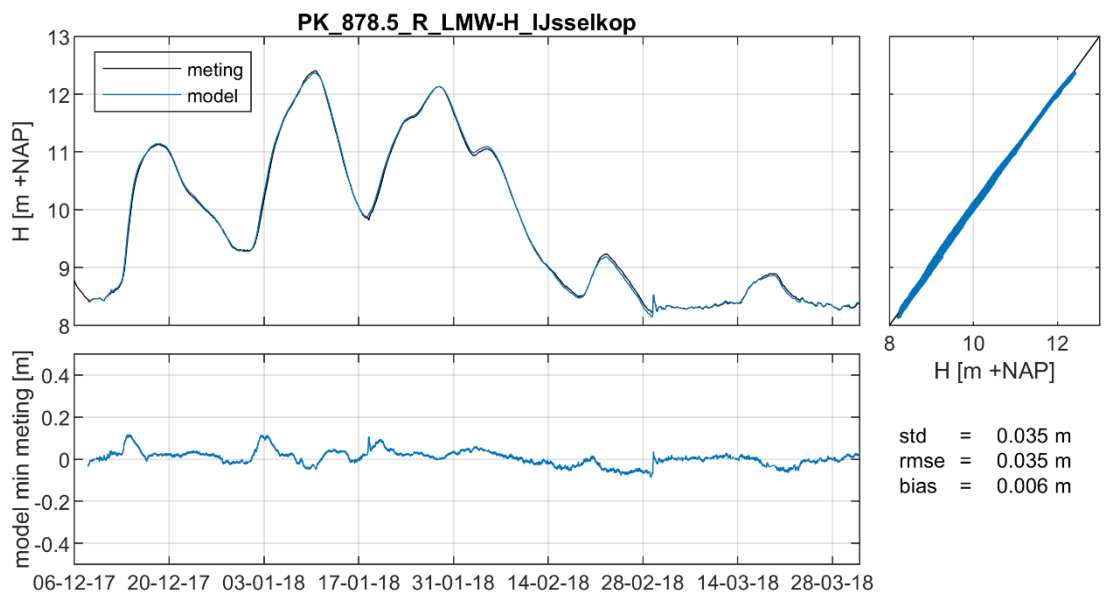
Figuur D.13 Groene Rivier Pannerden beneden.



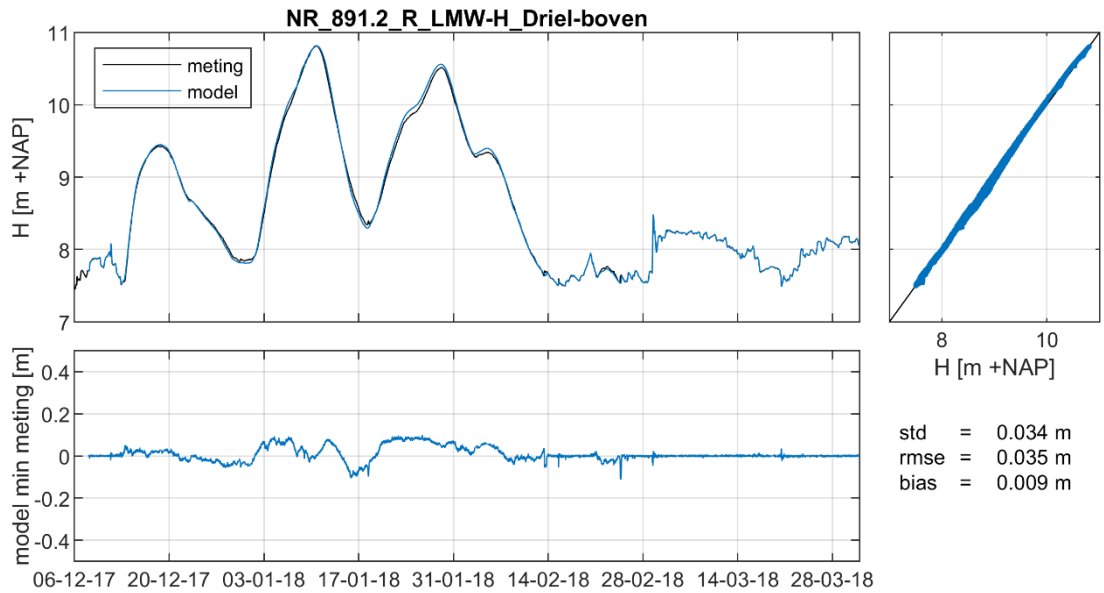
Figuur D.14 Pannerden.



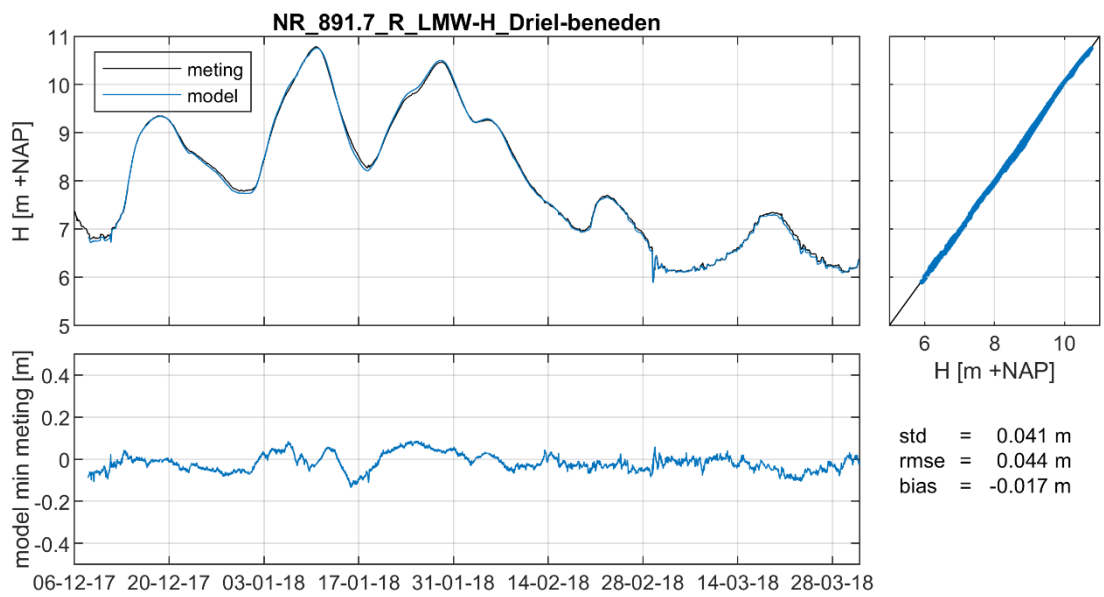
Figuur D.15 Looveer.



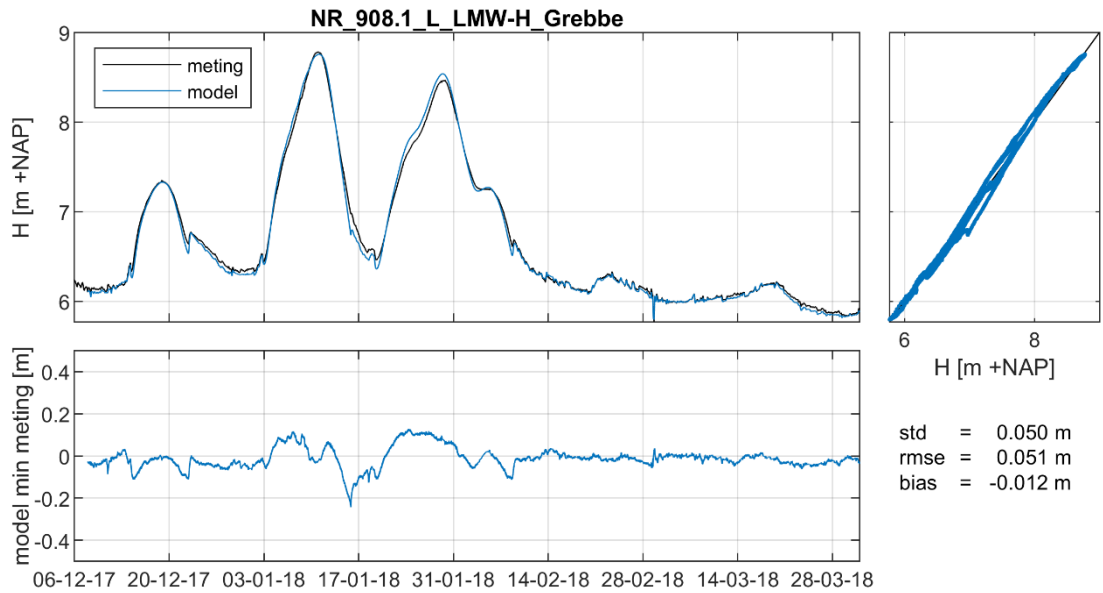
Figuur D.16 IJsselkop.



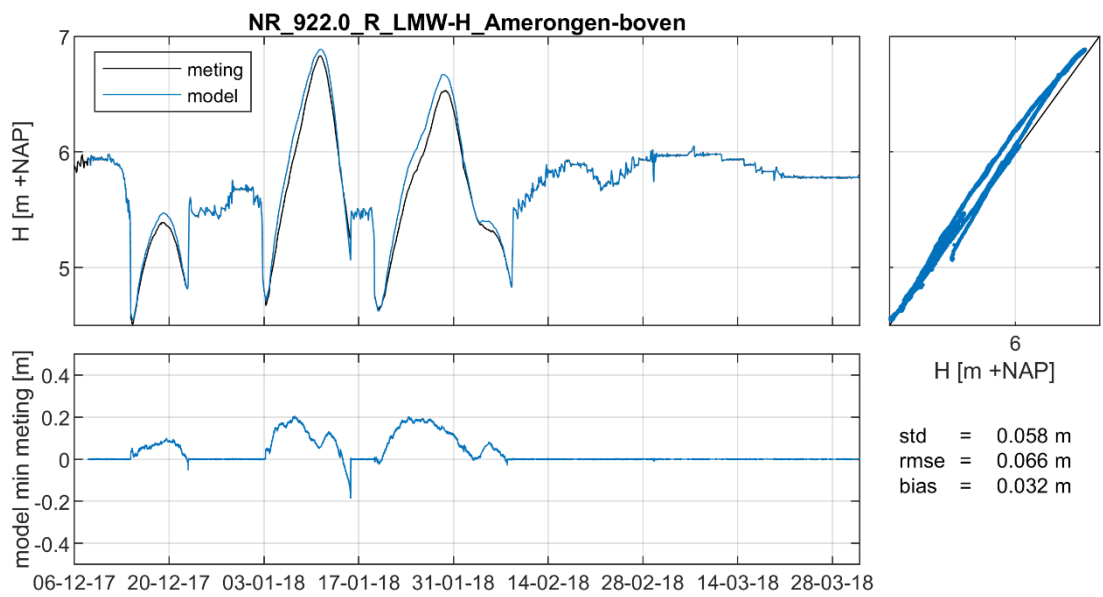
Figuur D.17 Driel-boven.



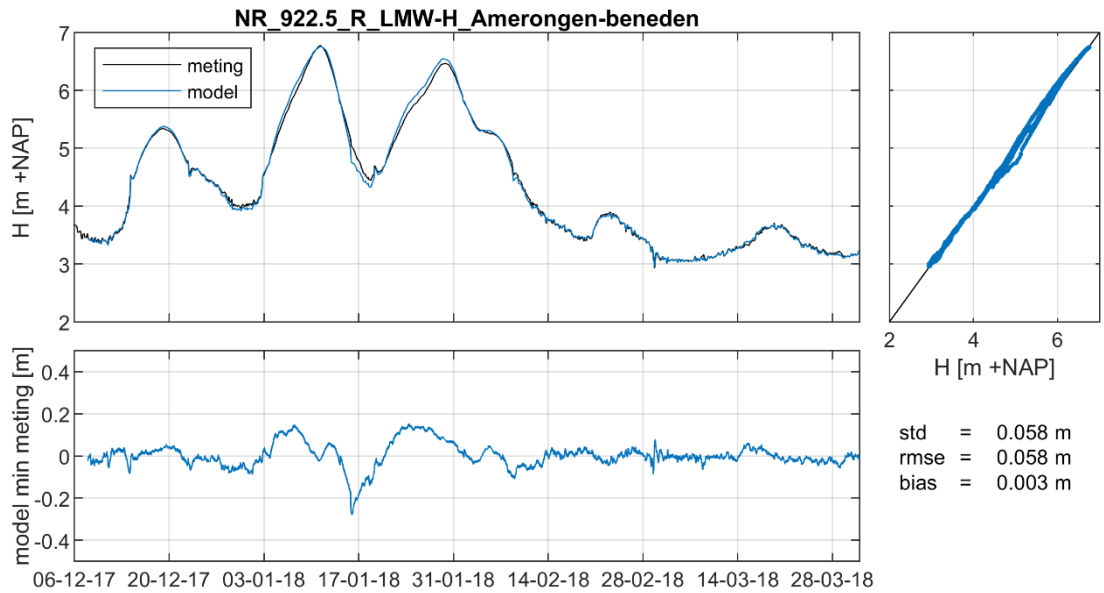
Figuur D.18 Driel-beneden.



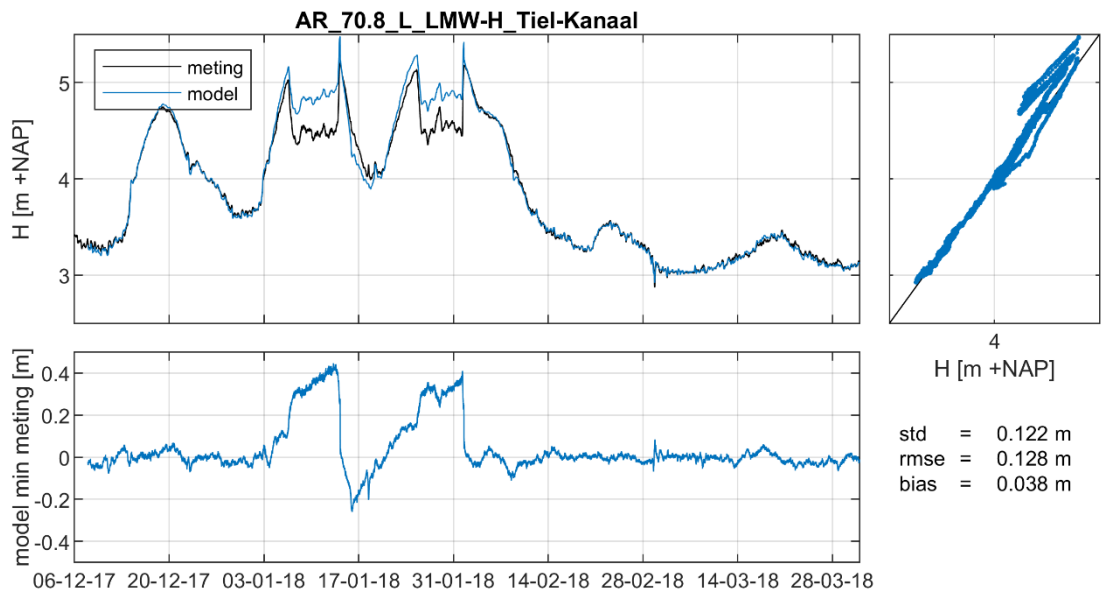
Figuur D.19 Grebbe.



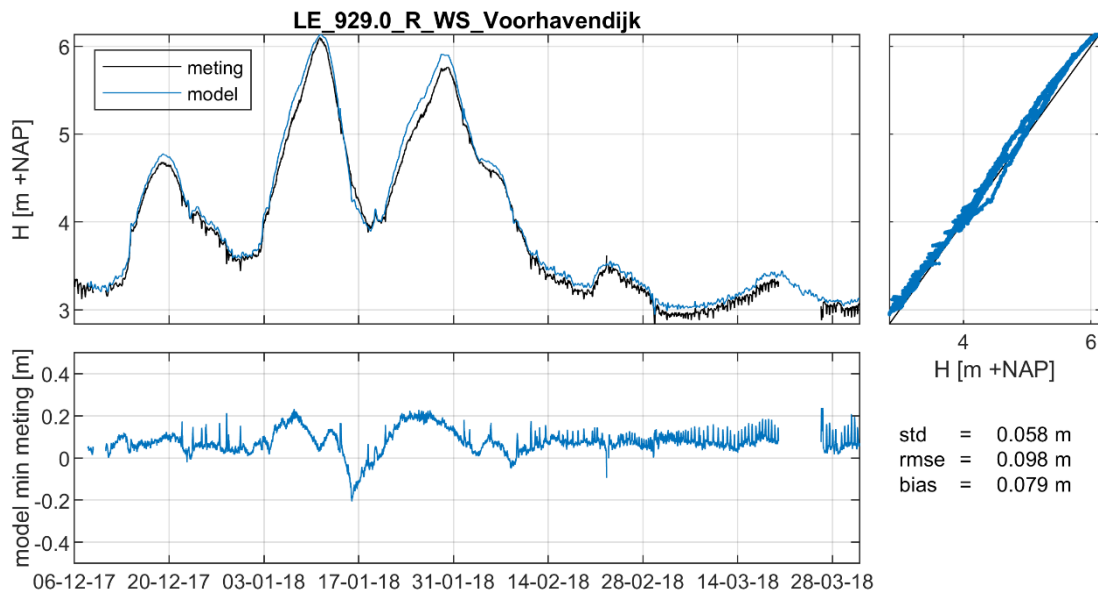
Figuur D.20 Amerongen-boven.



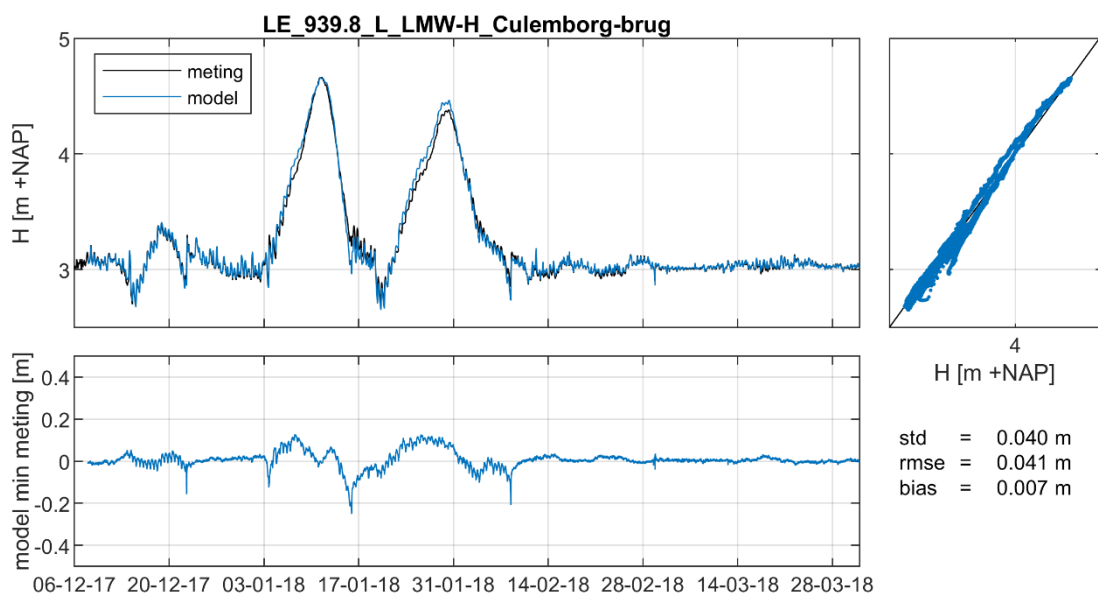
Figuur D.21 Amerongen-beneden.



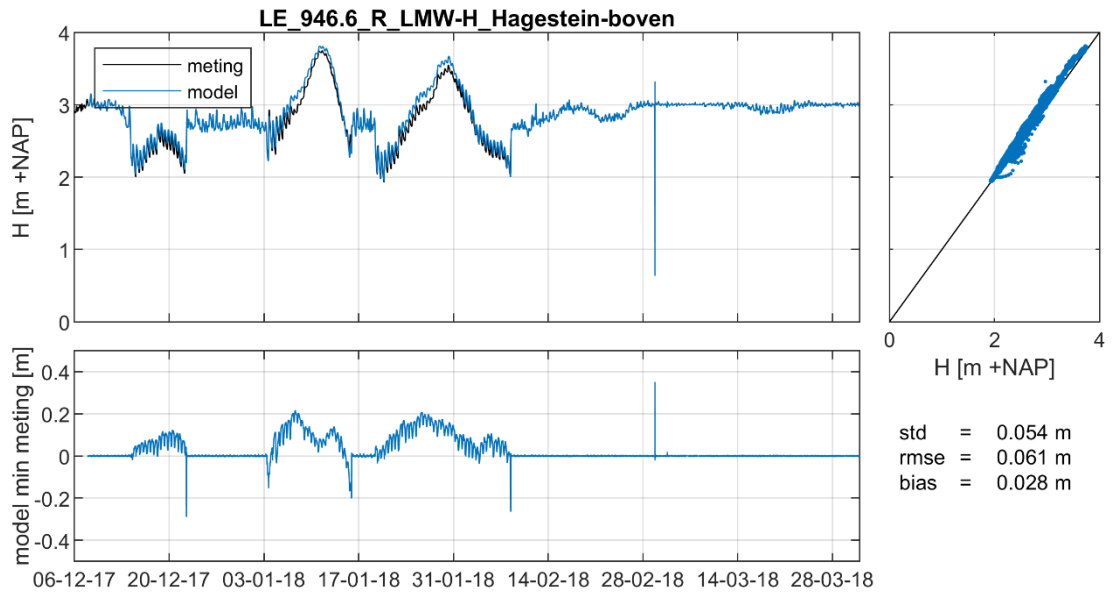
Figuur D.22 Tiel-kanaal.



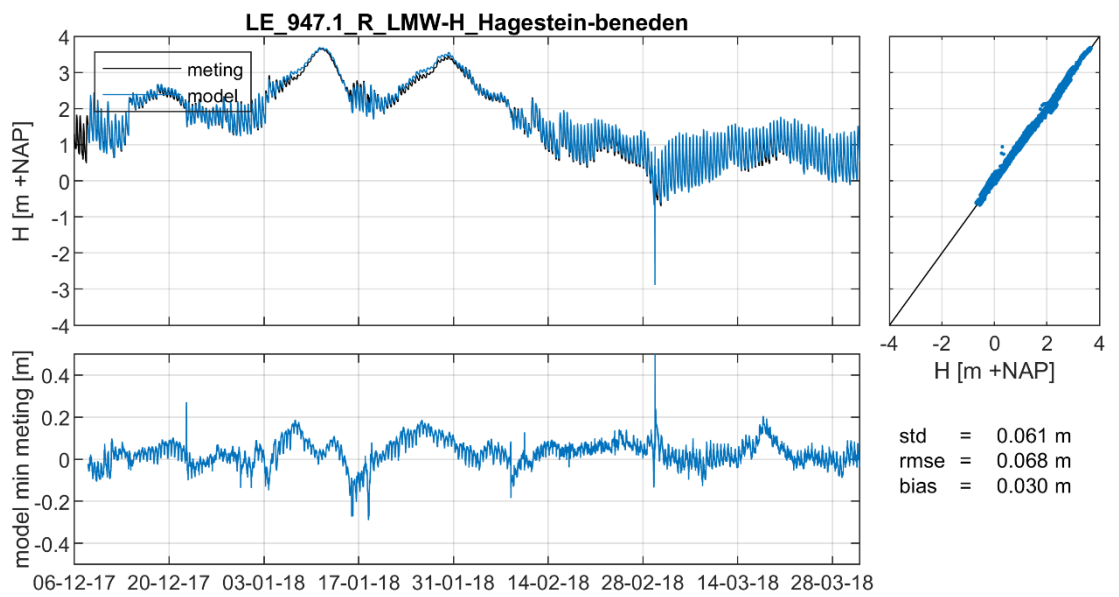
Figuur D.23 Voorhavendijk (HDSR).



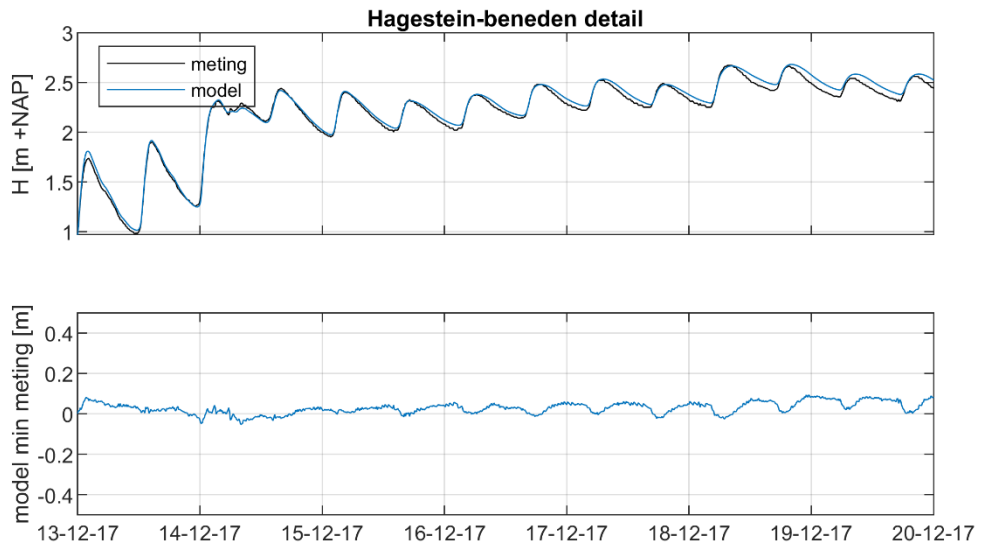
Figuur D.24 Culemborg-brug.



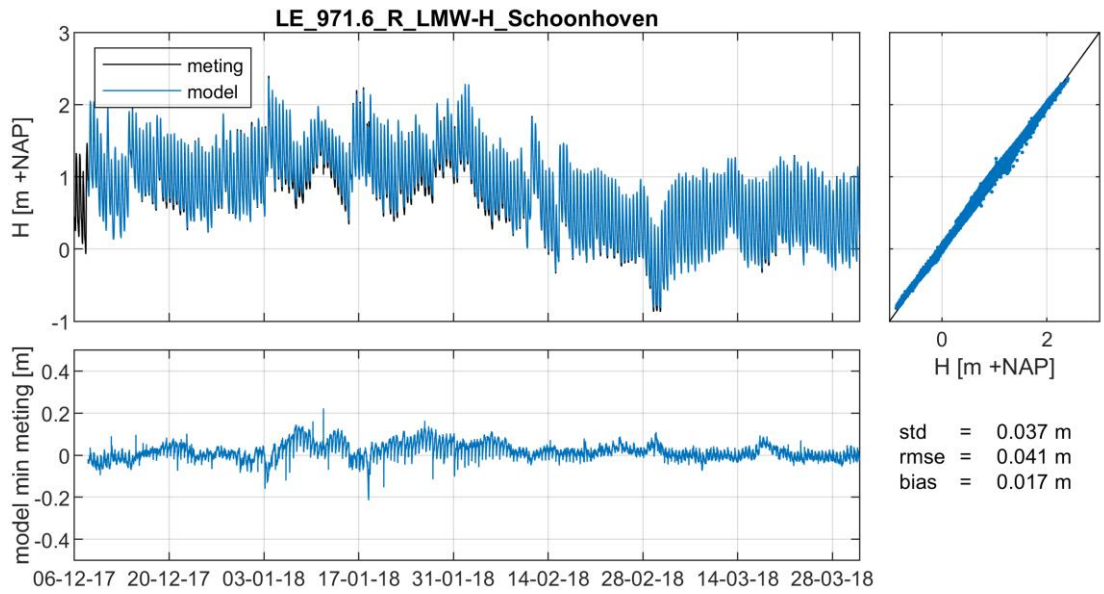
Figuur D.25 Hagestein-boven.



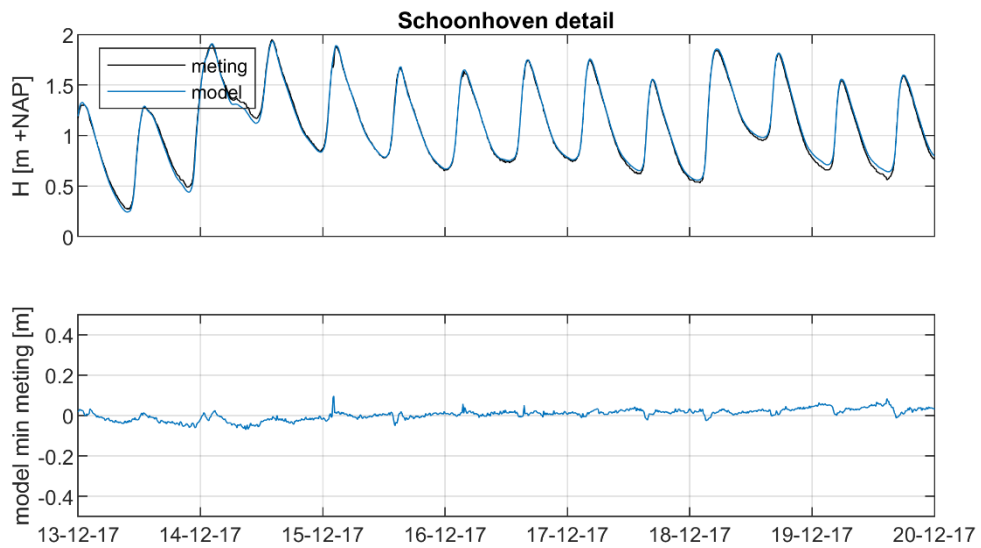
Figuur D.26 Hagestein-beneden.



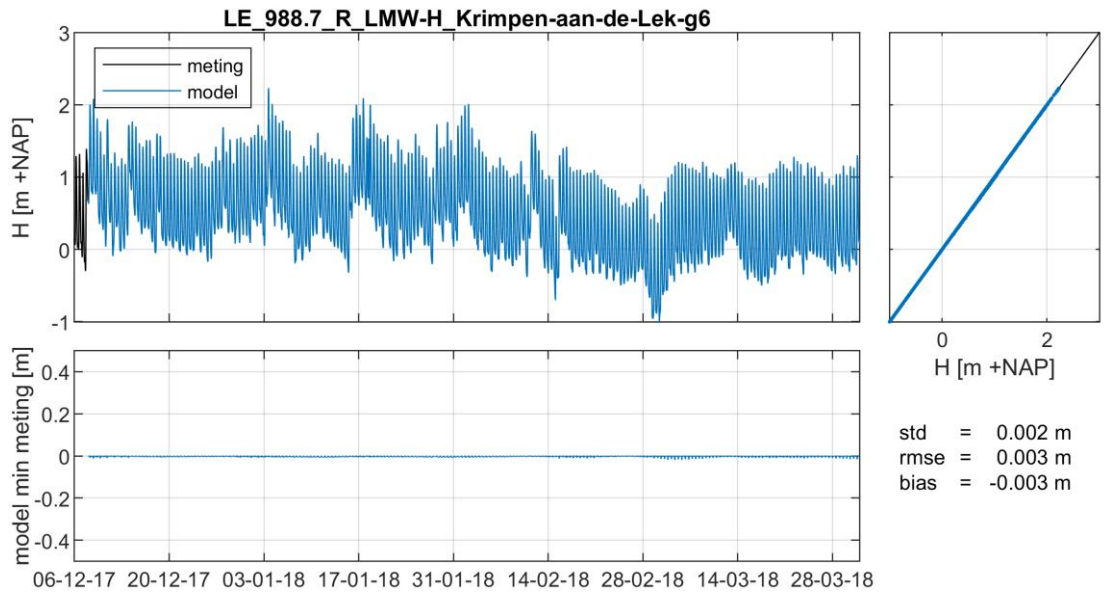
Figuur D.27 Hagestein-beneden (detail).



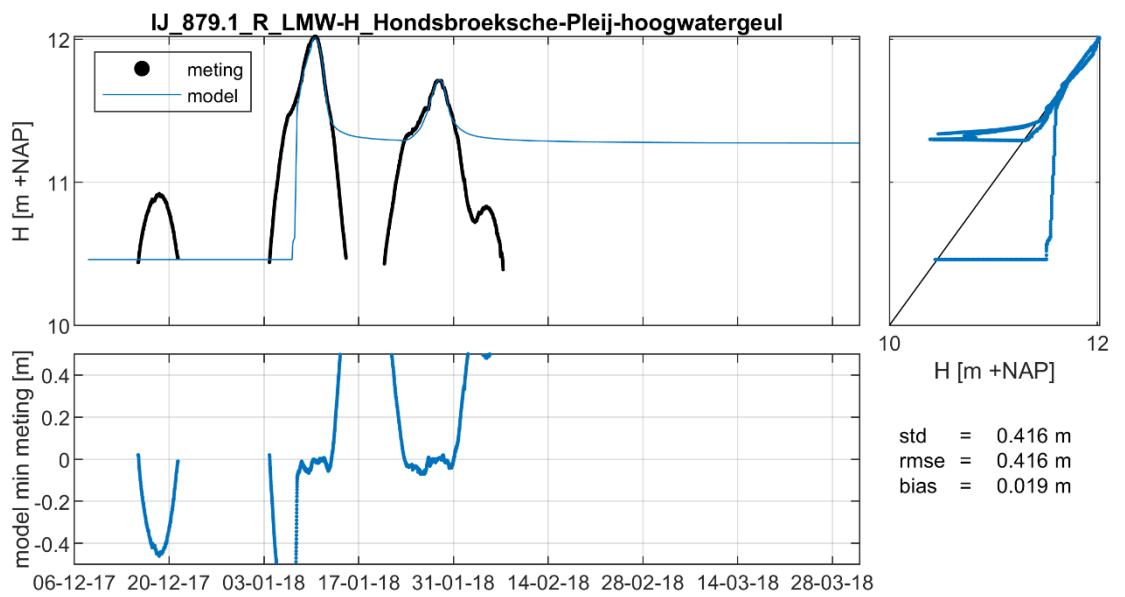
Figuur D.28 Schoonhoven.



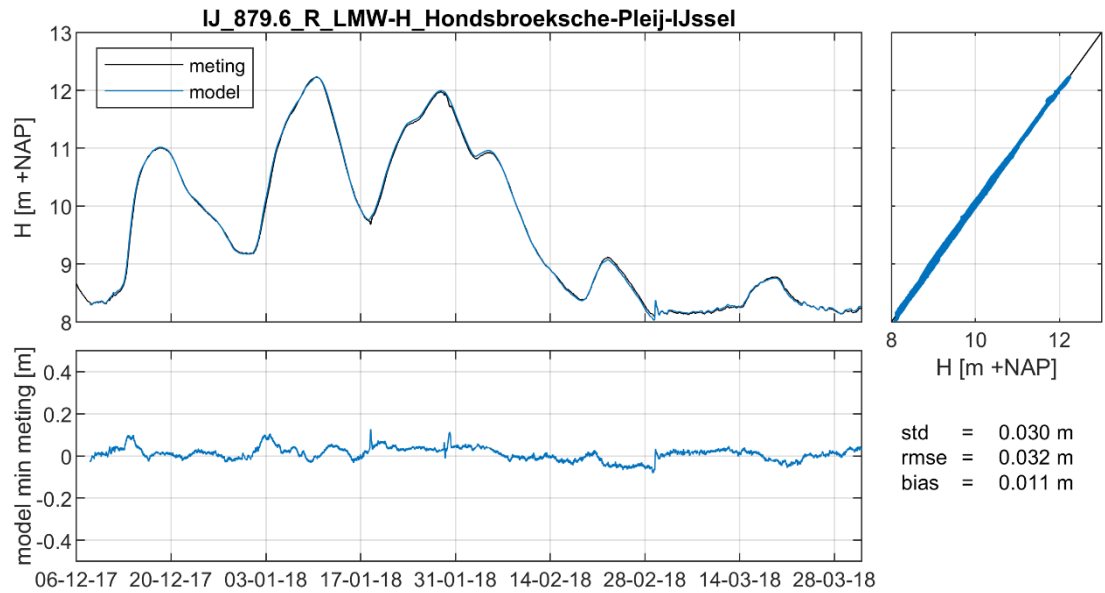
Figuur D.29 Schoonhoven (detail).



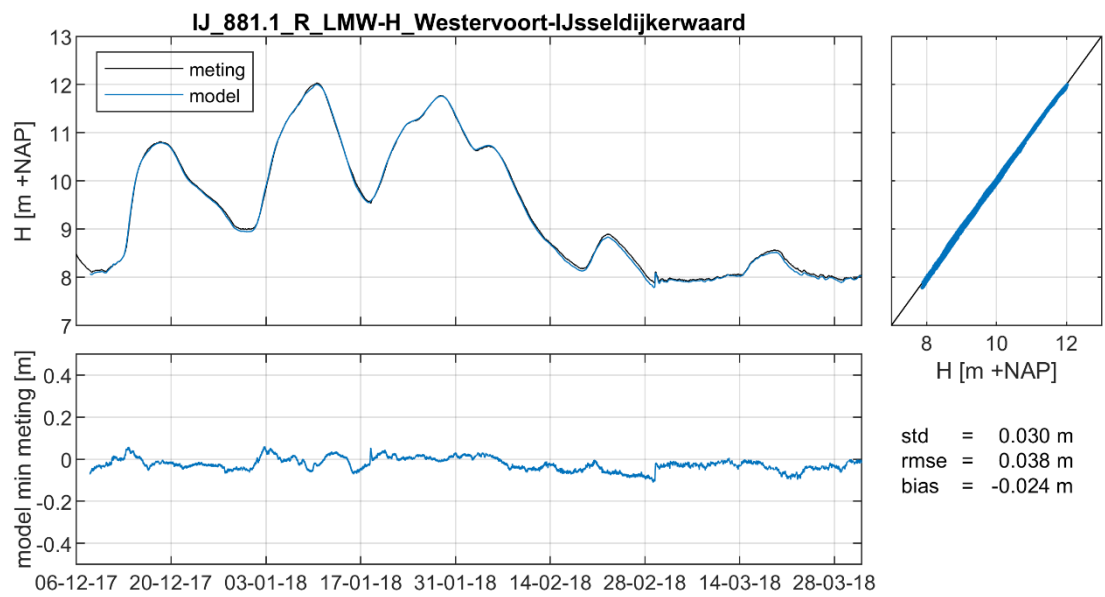
Figuur D.30 Krimpen aan de Lek.



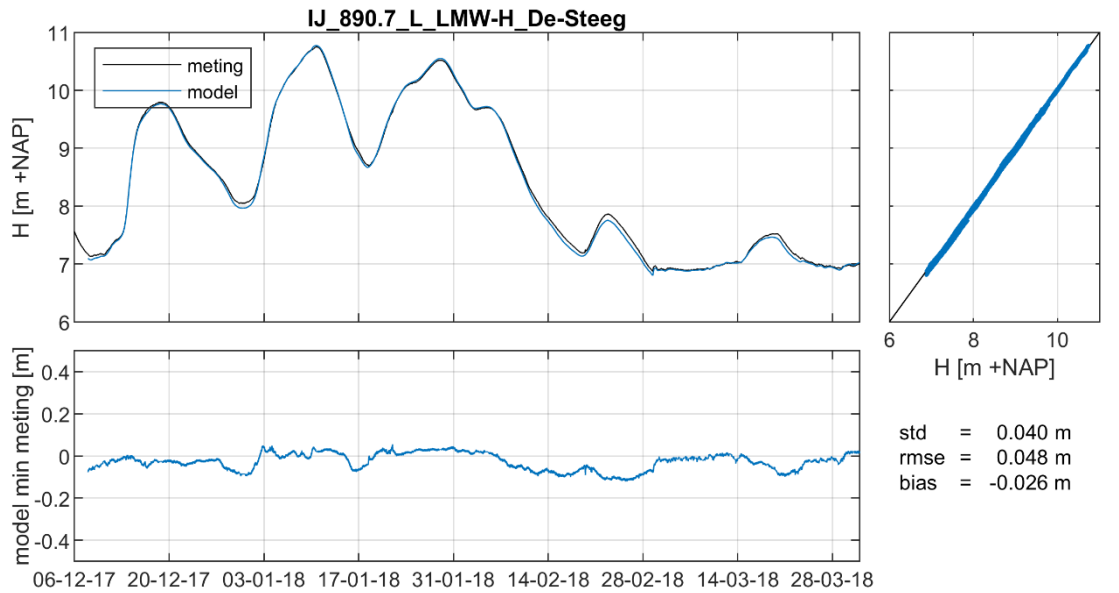
Figuur D.31 Hondsbroeksche Pleij hoogwatergeul.



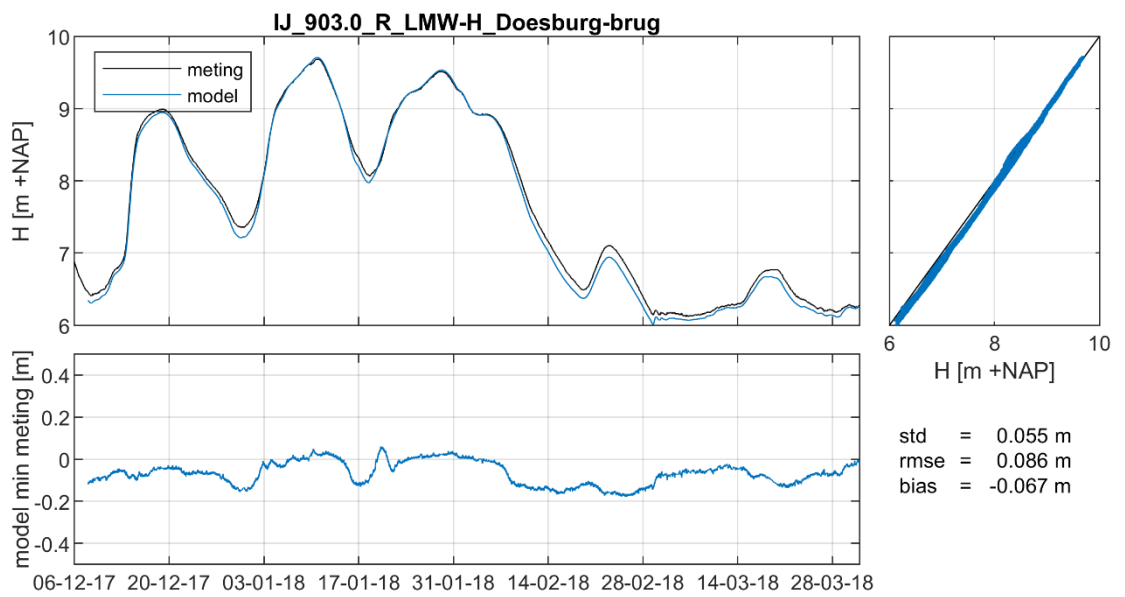
Figuur D.32 Hondsbroeksche Pleij IJssel.



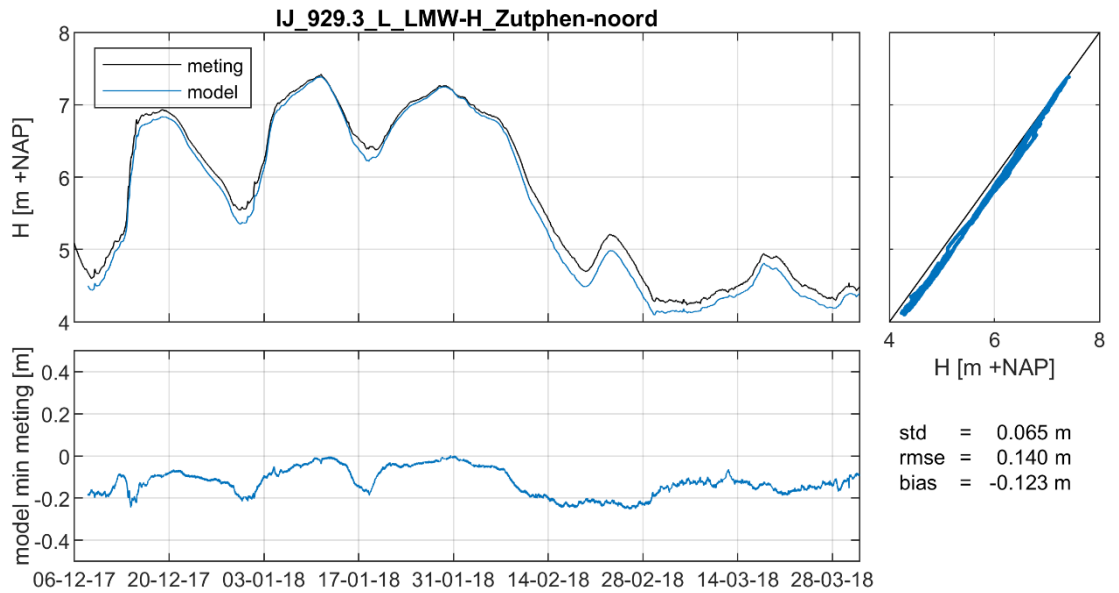
Figuur D.33 Westervoort-IJsseldijkerwaard.



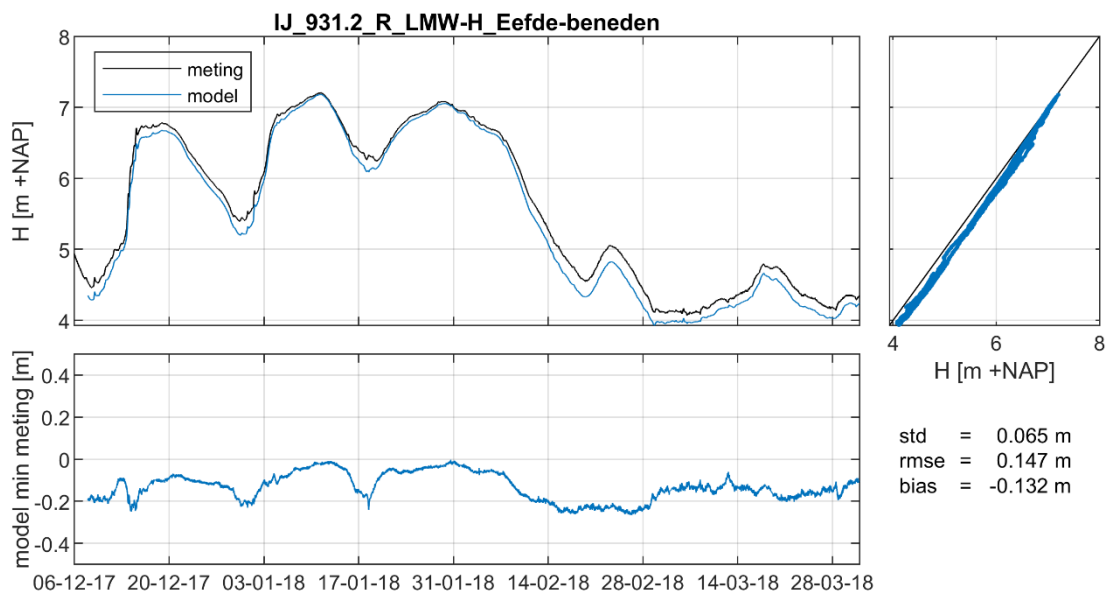
Figuur D.34 De Steeg.



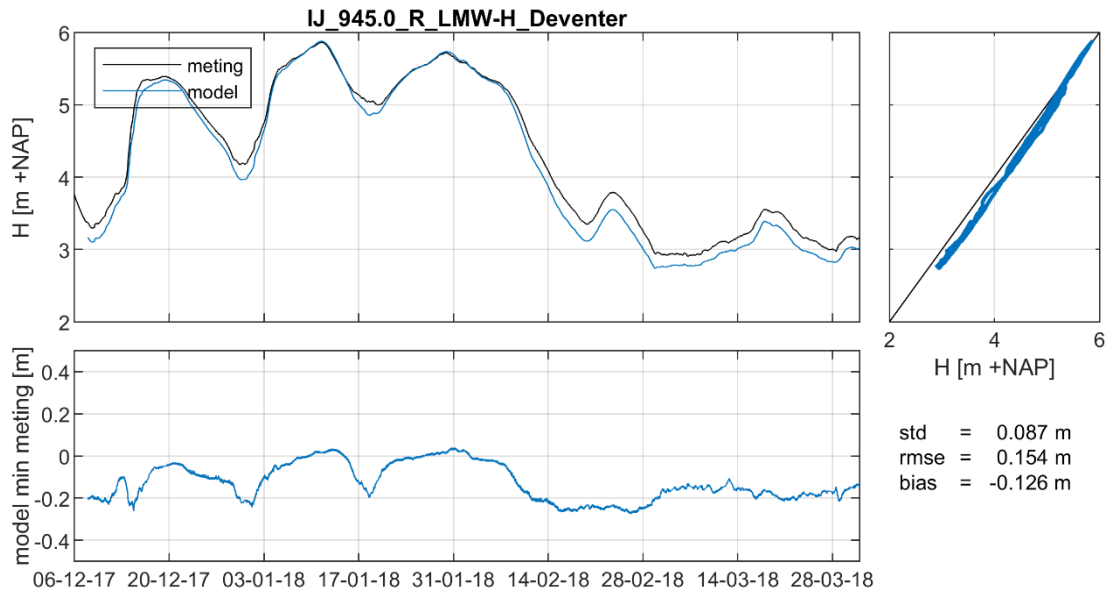
Figuur D.35 Doesburg-brug.



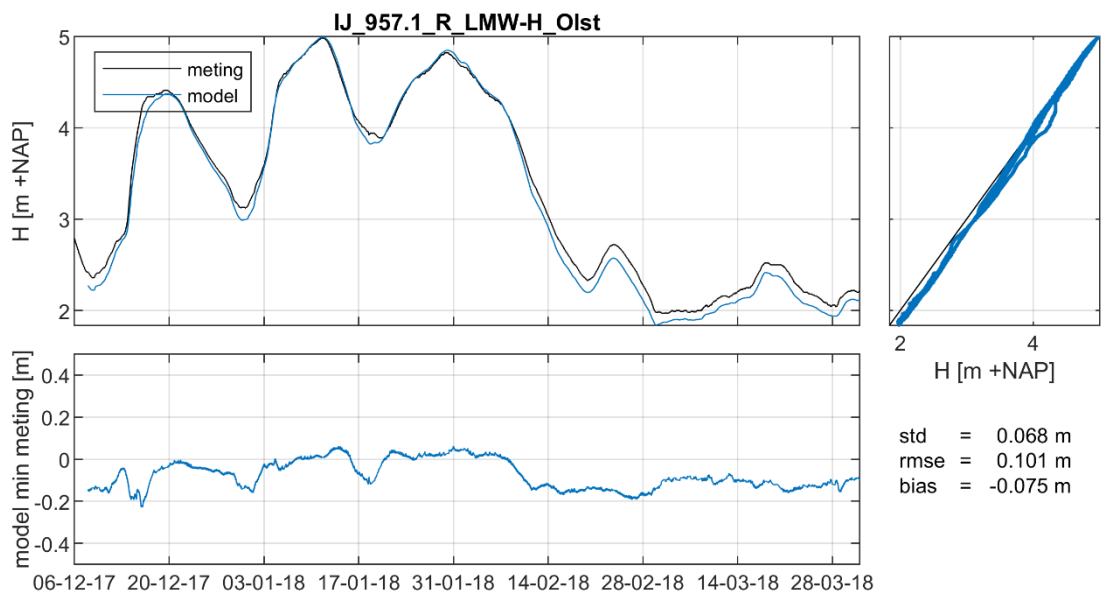
Figuur D.36 Zutphen-noord.



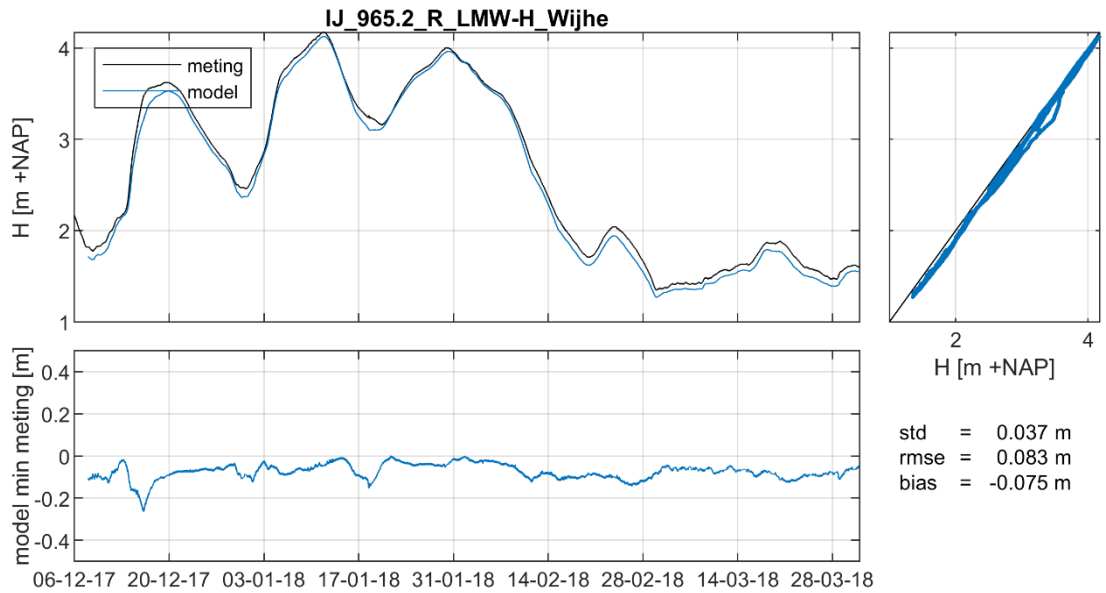
Figuur D.37 Eefde-beneden.



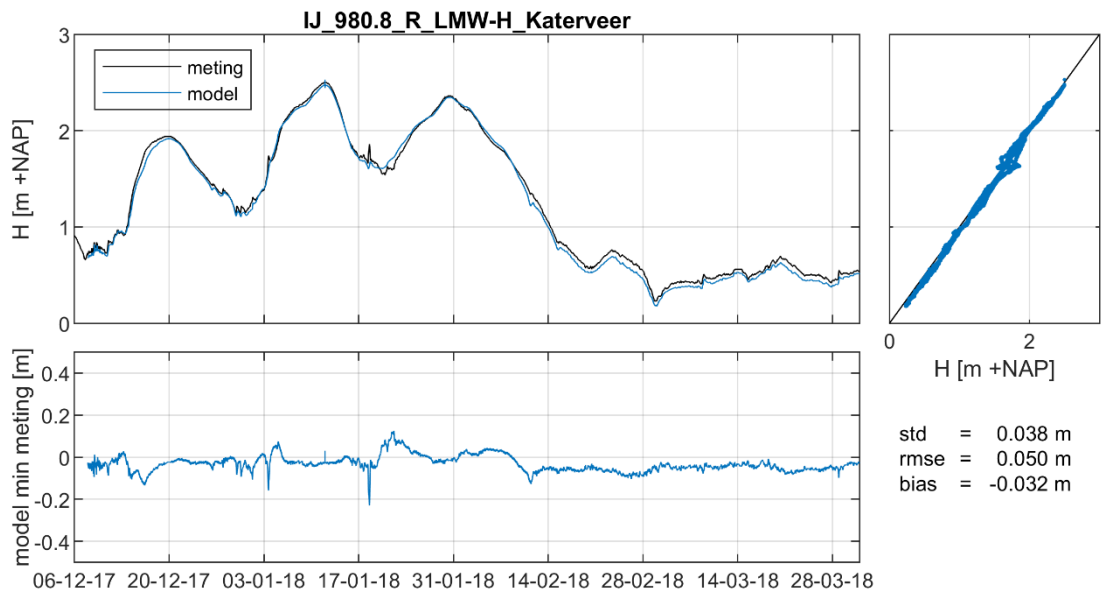
Figuur D.38 Deventer.



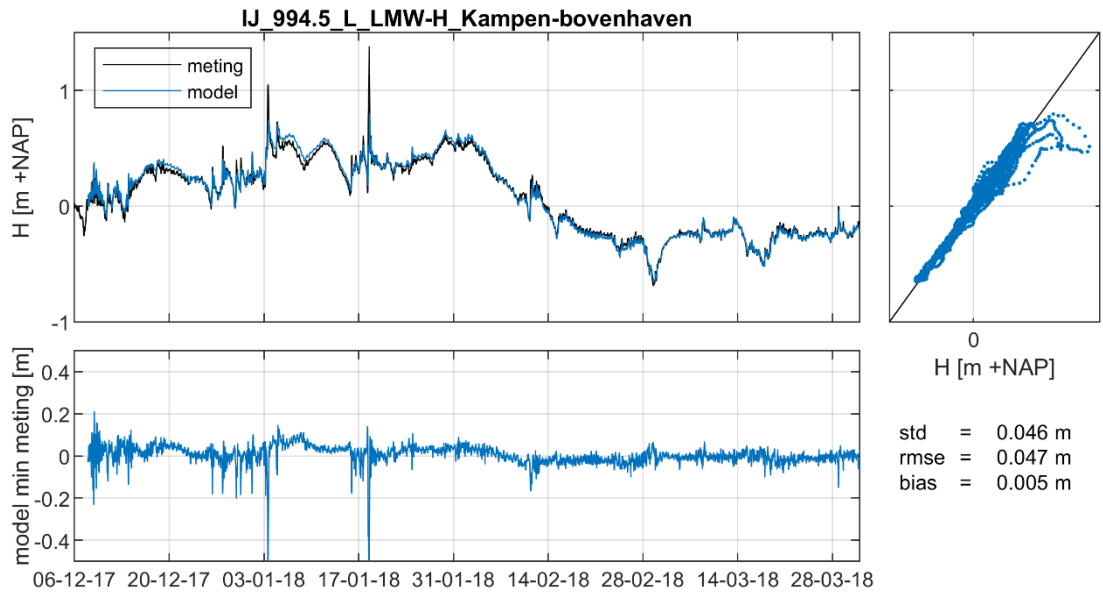
Figuur D.39 Olst.



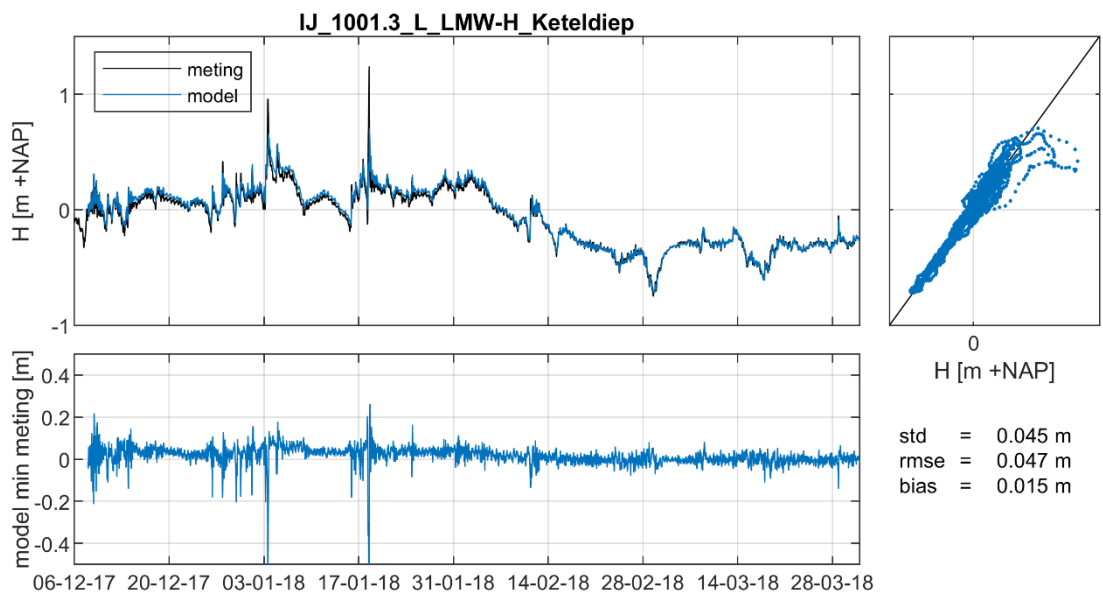
Figuur D.40 Wijhe.



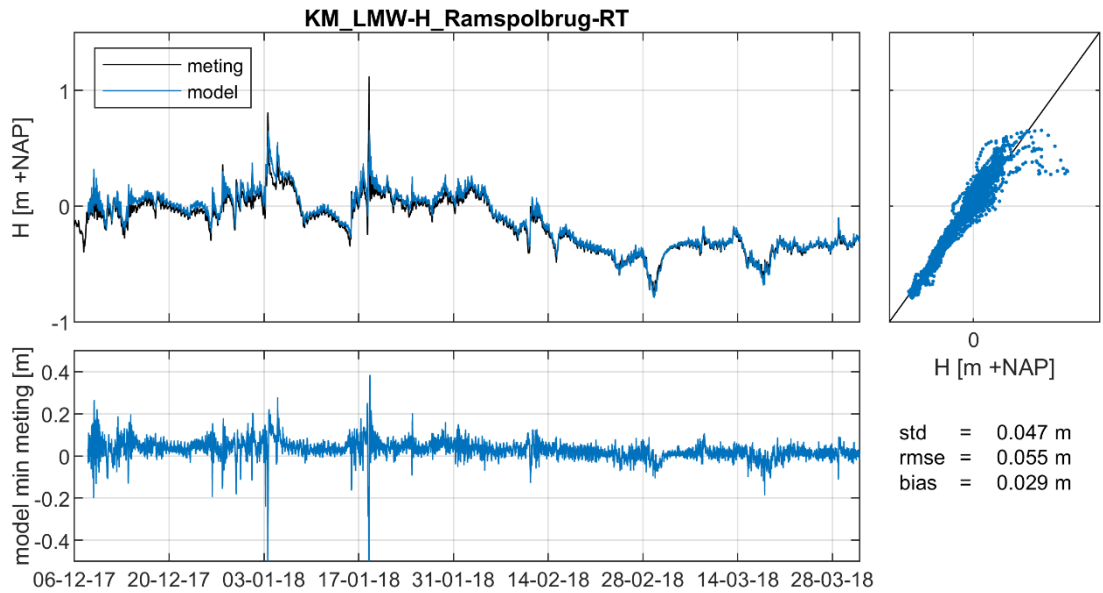
Figuur D.41 Katerveer.



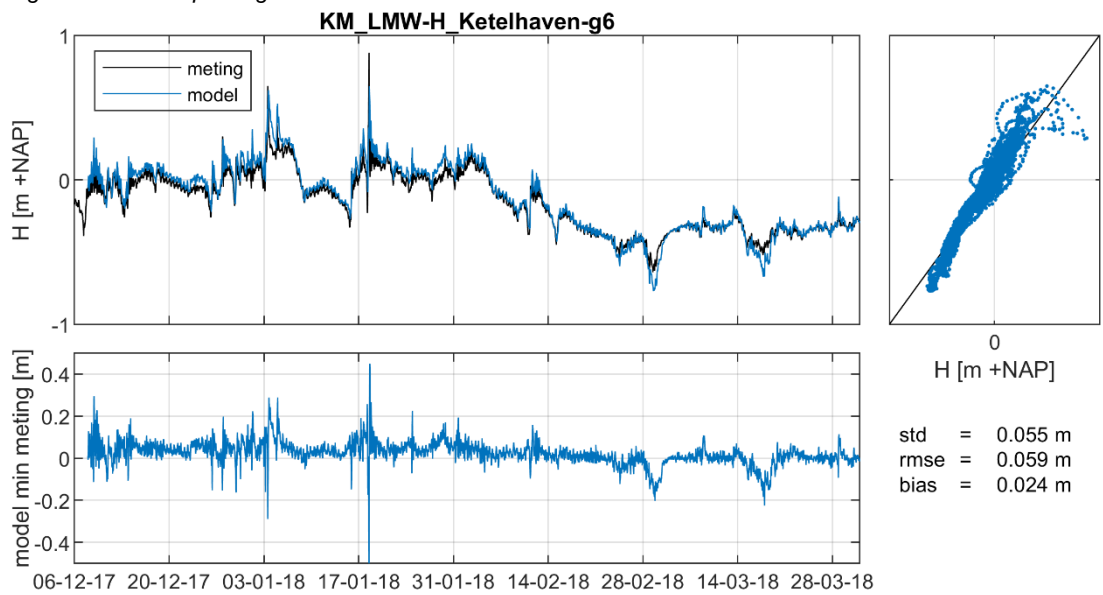
Figuur D.42 Kampen-bovenhaven.



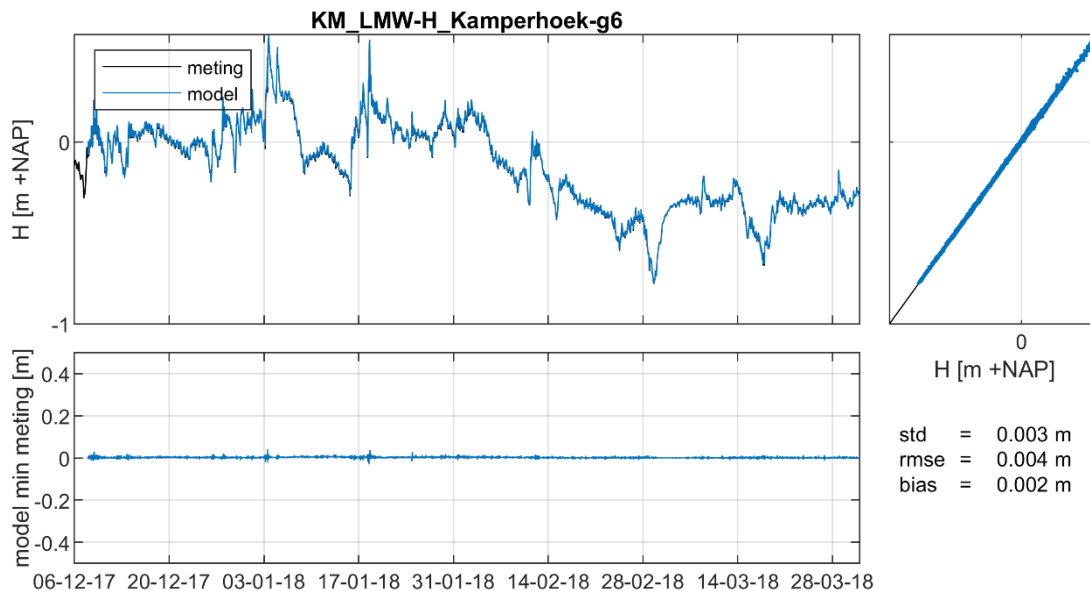
Figuur D.43 Keteldiep.



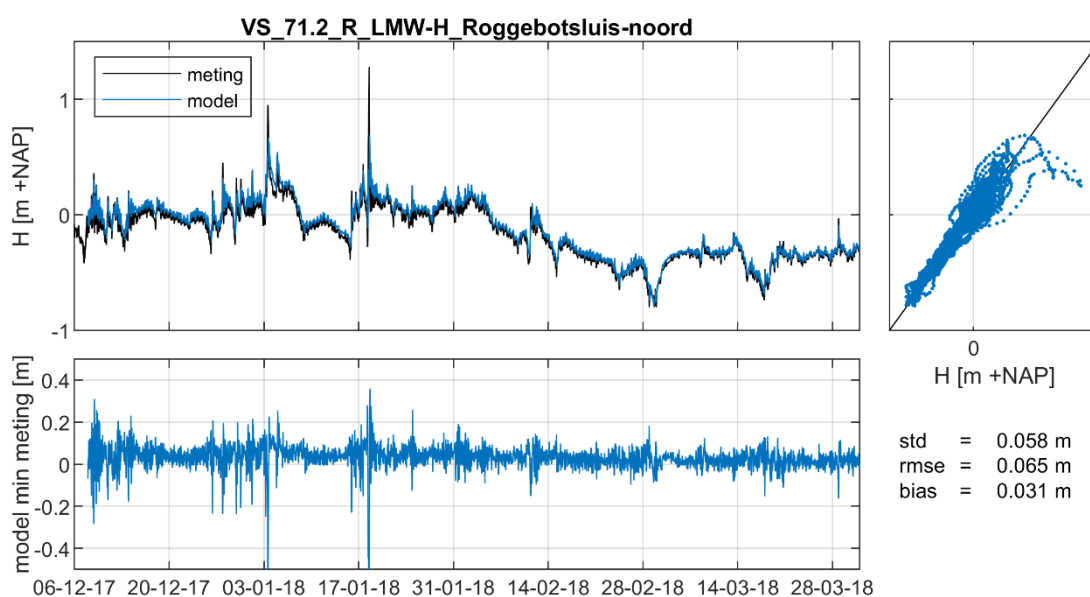
Figuur D.44 Ramspolbrug.



Figuur D.45 Ketelhaven.



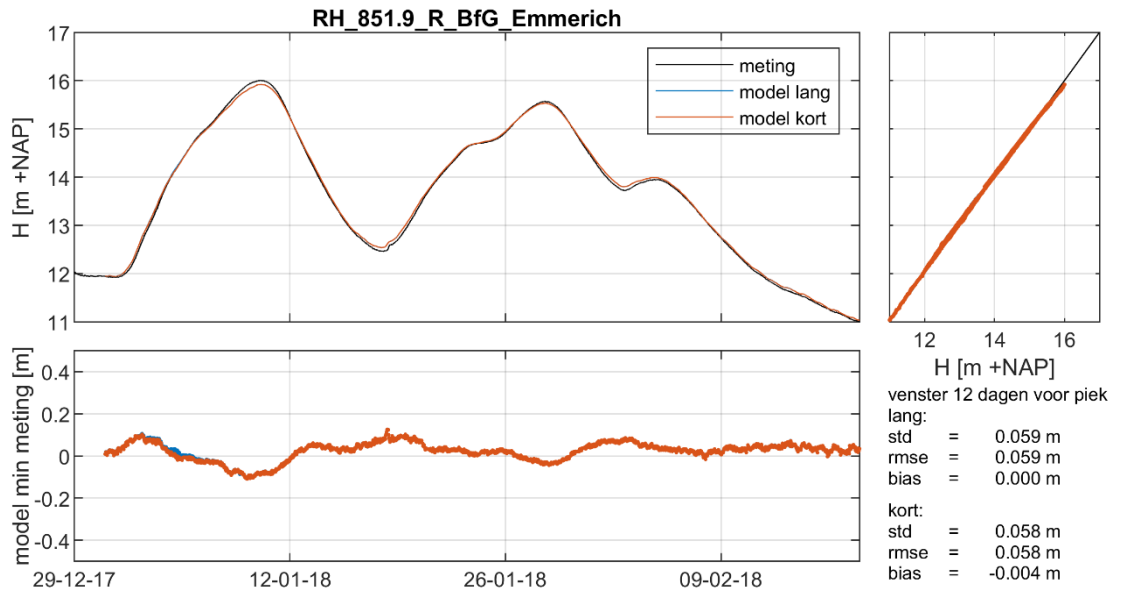
Figuur D.46 Kamperhoek.



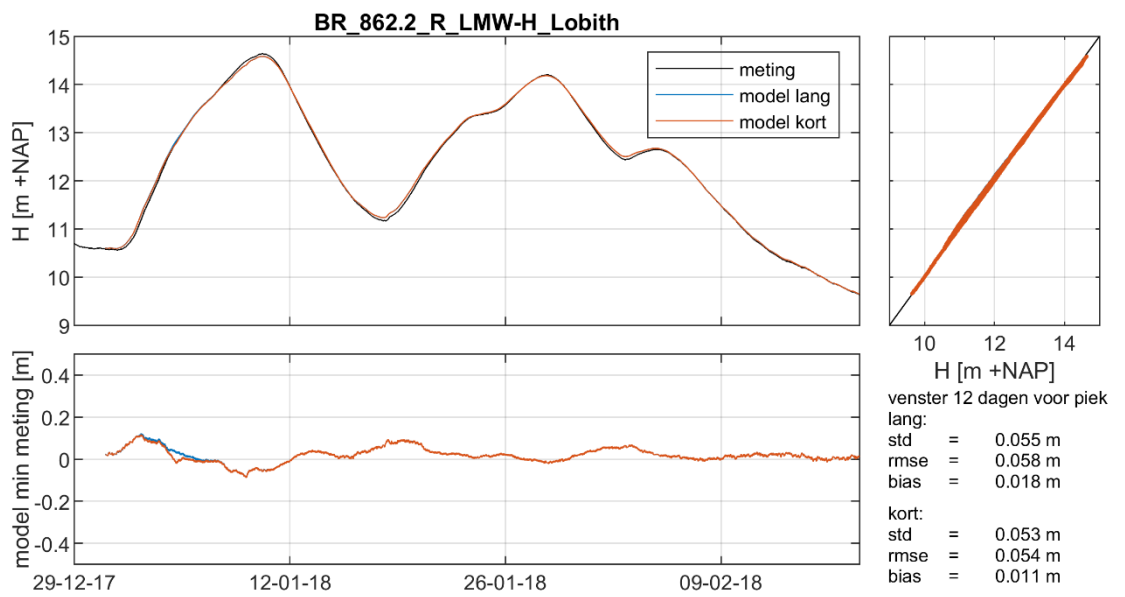
Figuur D.47 Roggebotsluis-noord.

D.1.3 Vergelijking validaties periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018

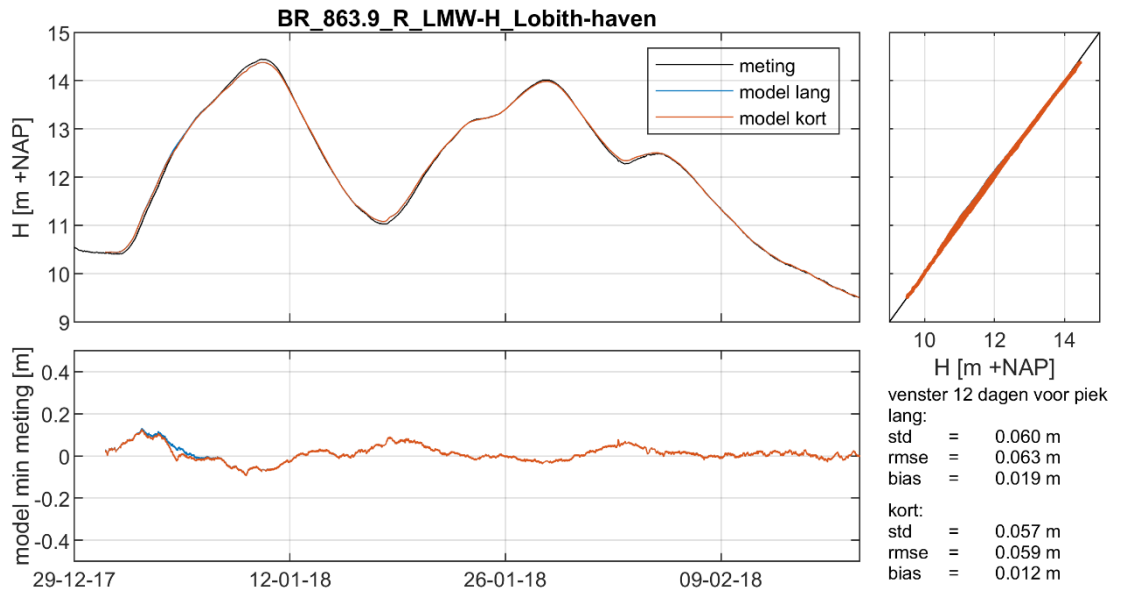
In onderstaande figuren zijn resultaten weergegeven voor de periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018. Per figuur zijn de resultaten van twee verschillende D-HYDRO-berekeningen weergegeven. De blauwe lijnen zijn de resultaten van de lange validatieberekening (periode 8 december 2017 tot 1 april 2018), inclusief de eerste hoogwaterpiek van december 2017 (in de figuren is dus slechts een deel van de periode zichtbaar). De rode lijnen zijn het resultaat van de korte berekening voor de periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018. Het verschil tussen de twee lijnen laat het effect van het wel of niet meenemen van de hoogwaterpiek van december 2017 in het model zien. Rechtsonder in elke figuur zijn voor beide berekeningen statistieken opgenomen voor een periode van 12 dagen voorafgaand aan de gemeten piekwaterstand op het betreffende station.



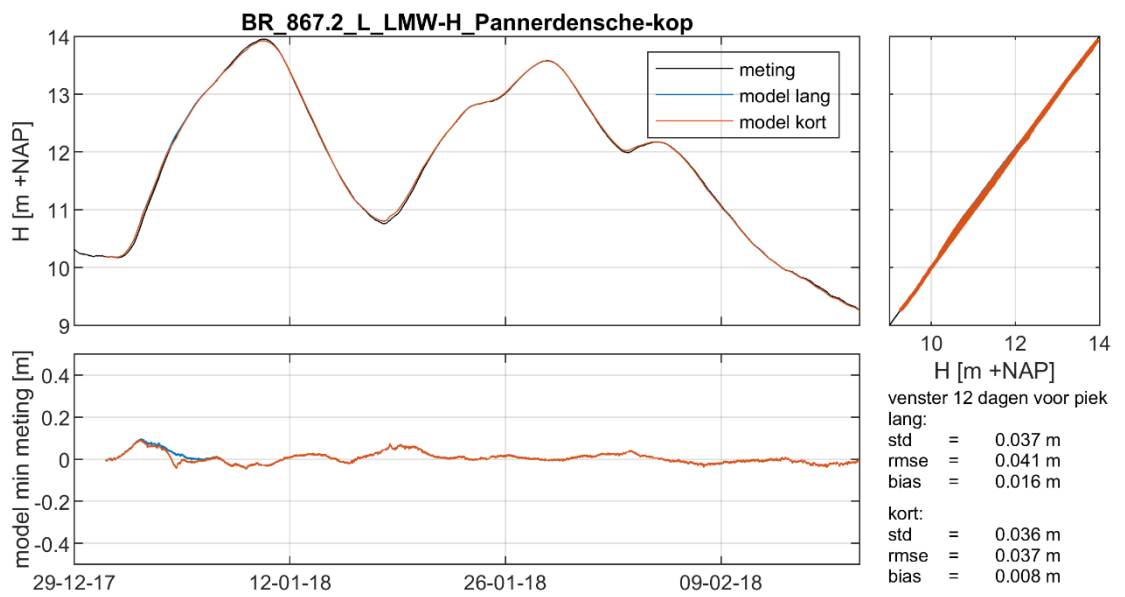
Figuur D.48 Emmerich.



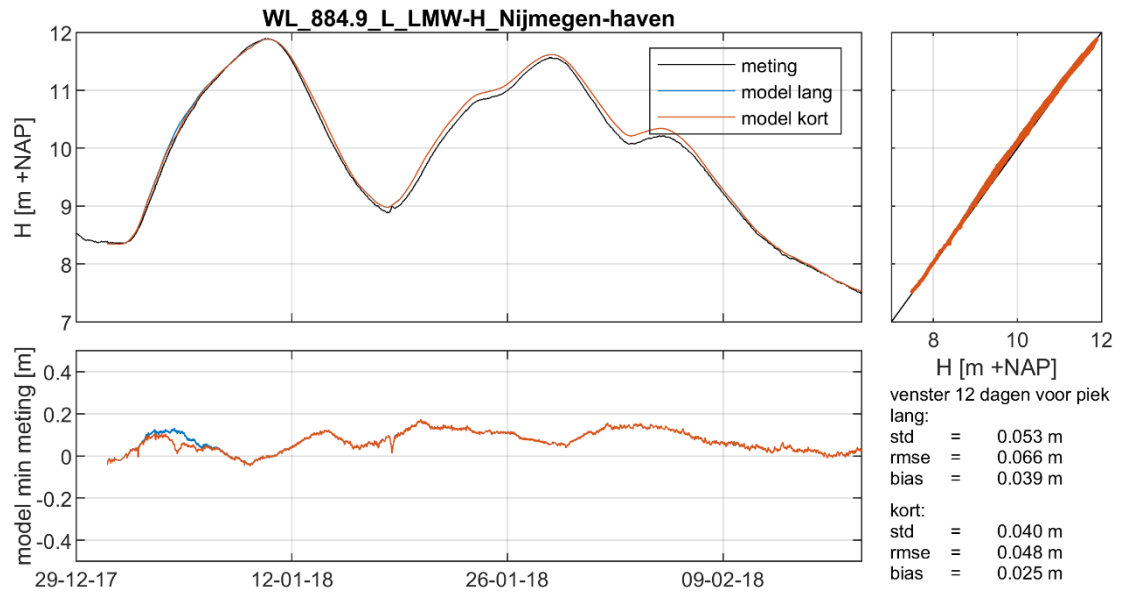
Figuur D.49 Lobith.



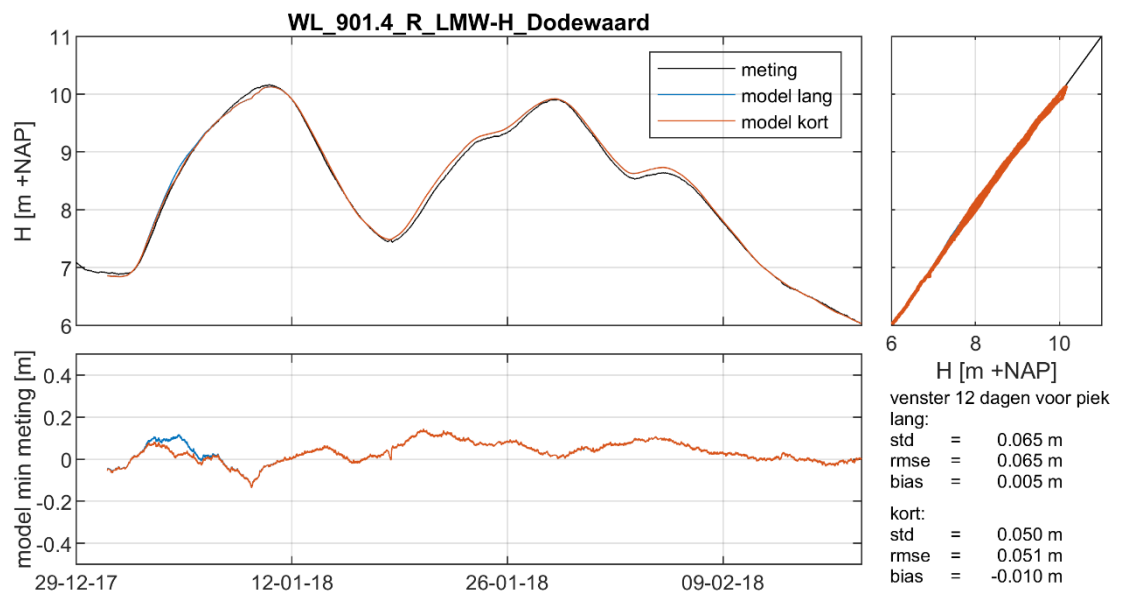
Figuur D.50 Lobith-haven.



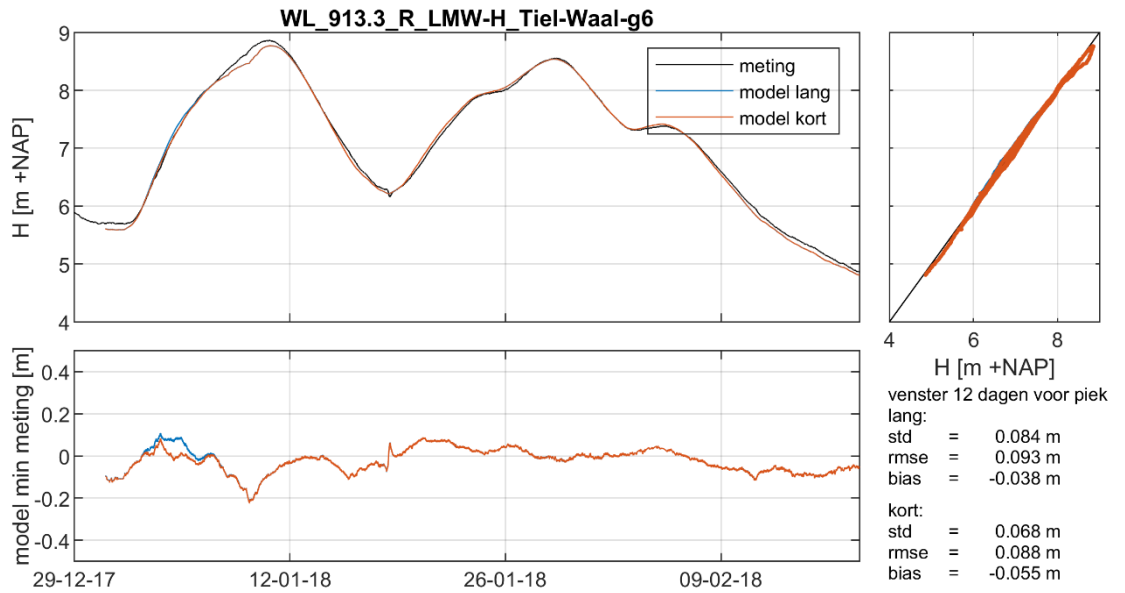
Figuur D.51 Pannerdensche Kop.



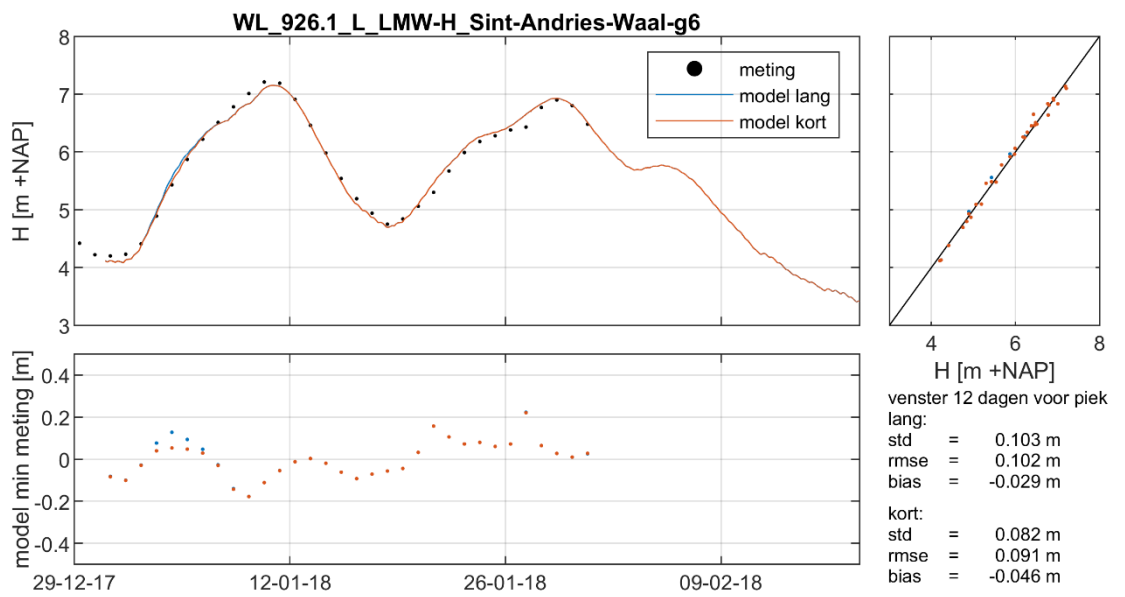
Figuur D.52 Nijmegen-haven.



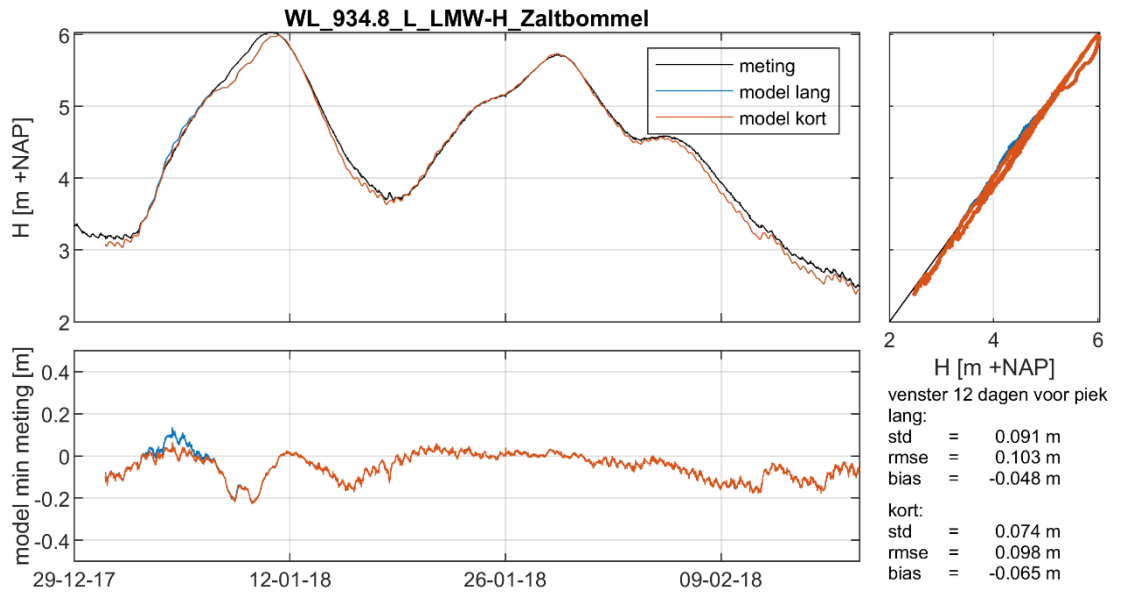
Figuur D.53 Dodewaard.



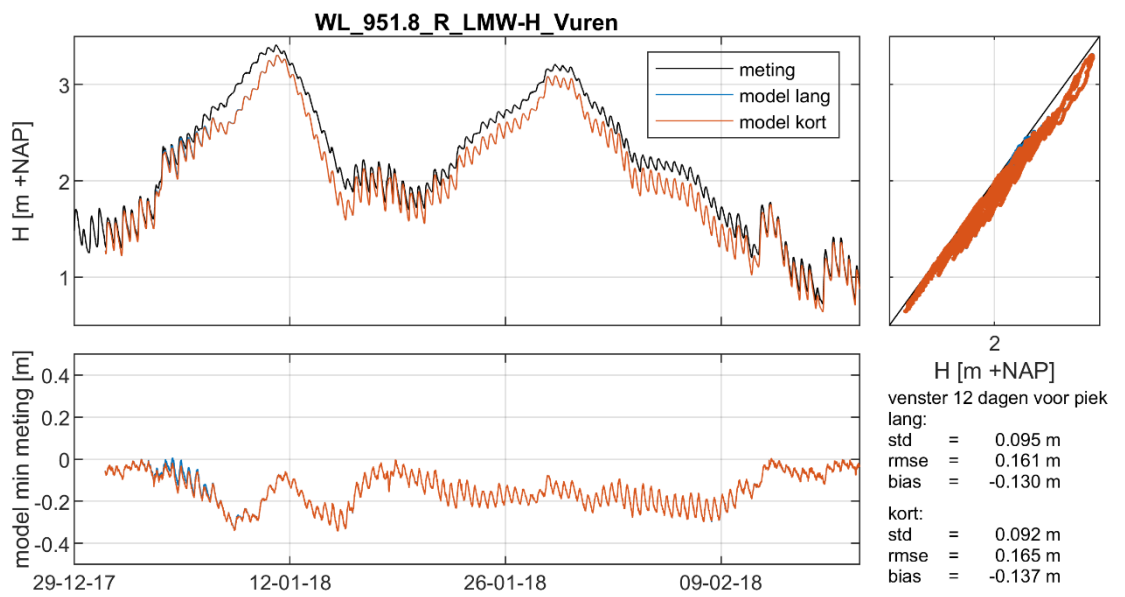
Figuur D.54 Tiel-Waal.



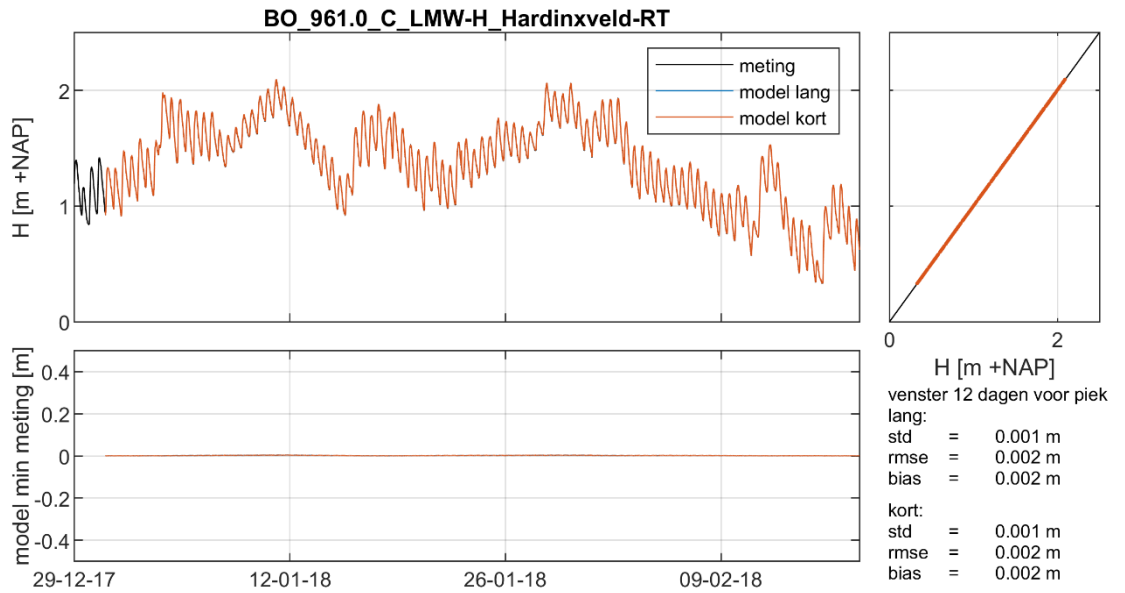
Figuur D.55 Sint-Andries Waal.



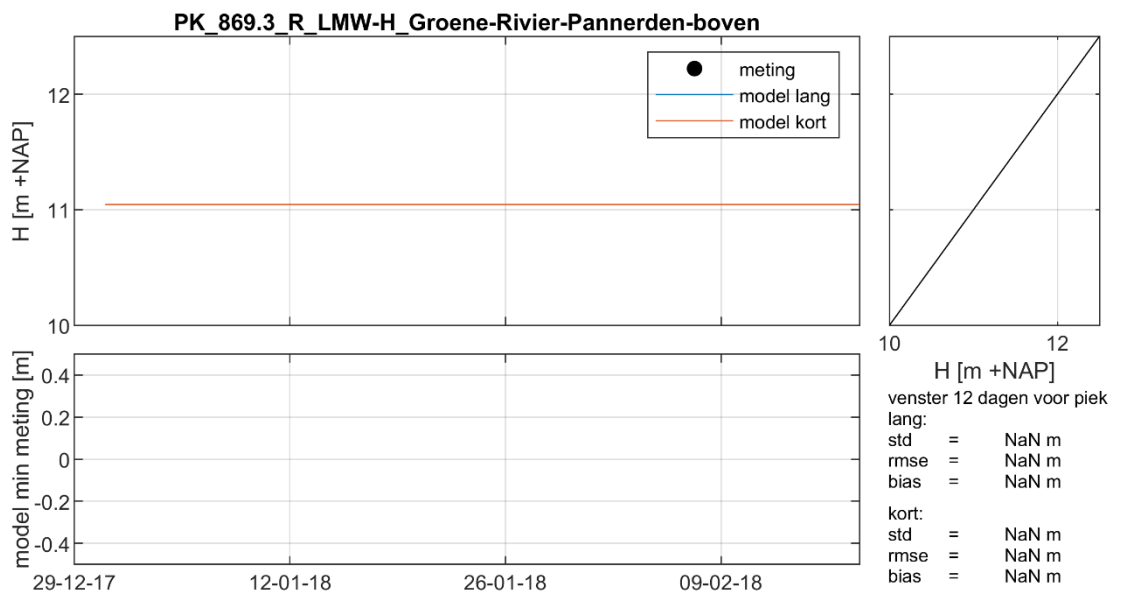
Figuur D.56 Zaltbommel.



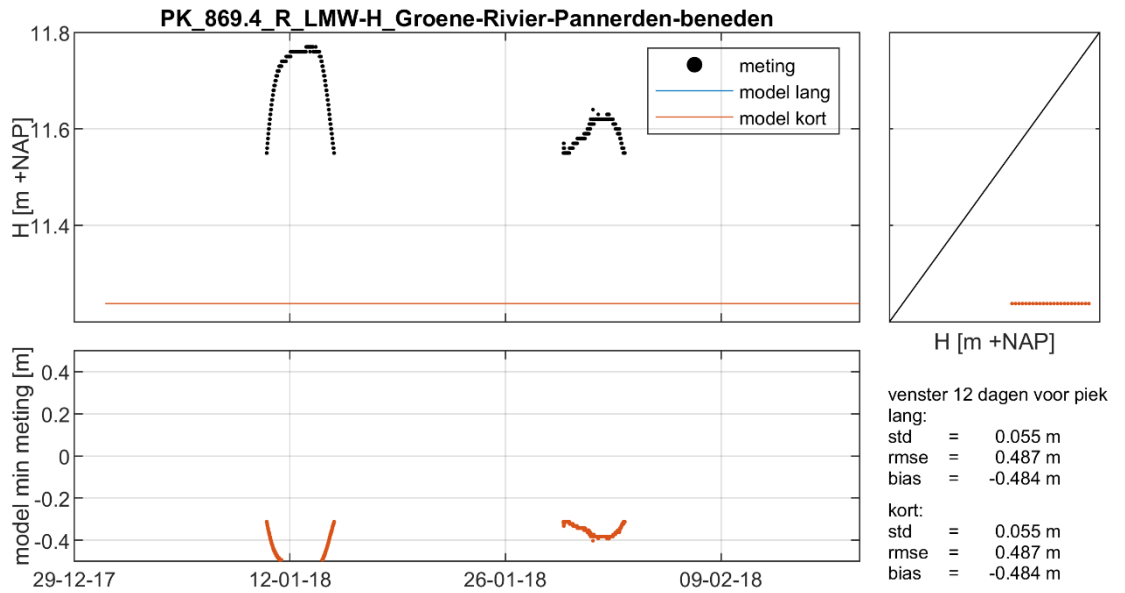
Figuur D.57 Vuren.



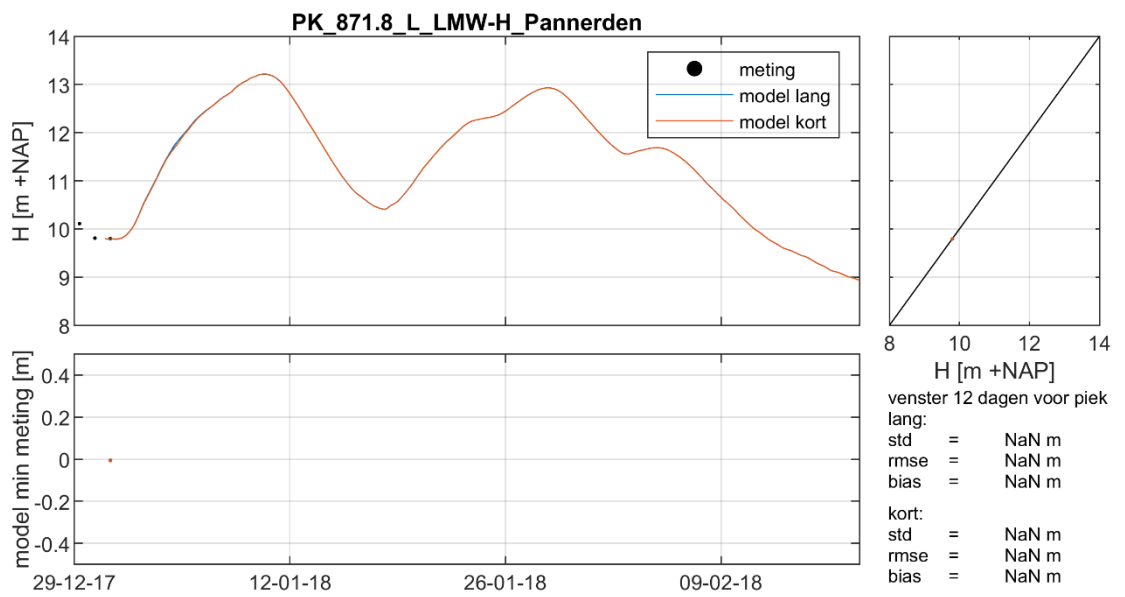
Figuur D.58 Hardinxveld.



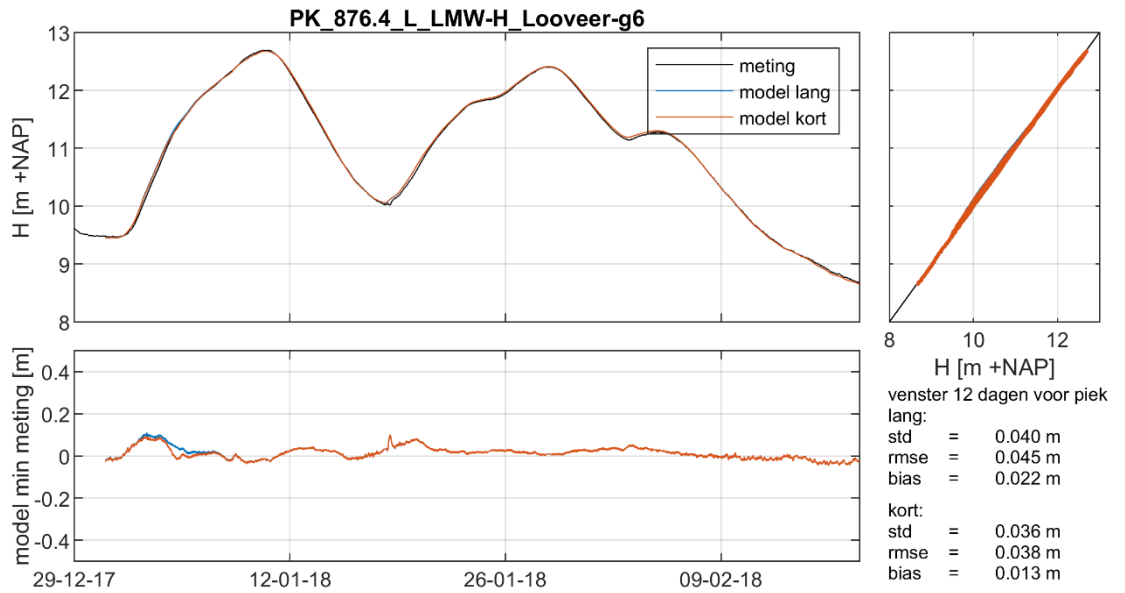
Figuur D.59 Groene Rivier Pannerden boven.



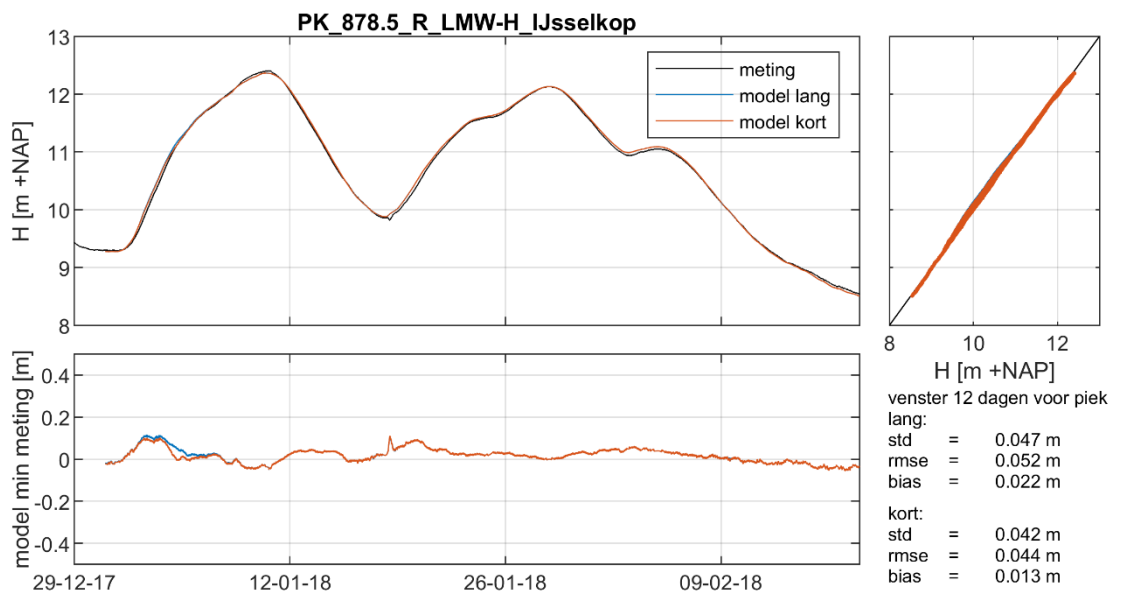
Figuur D.60 Groene Rivier Pannerden beneden.



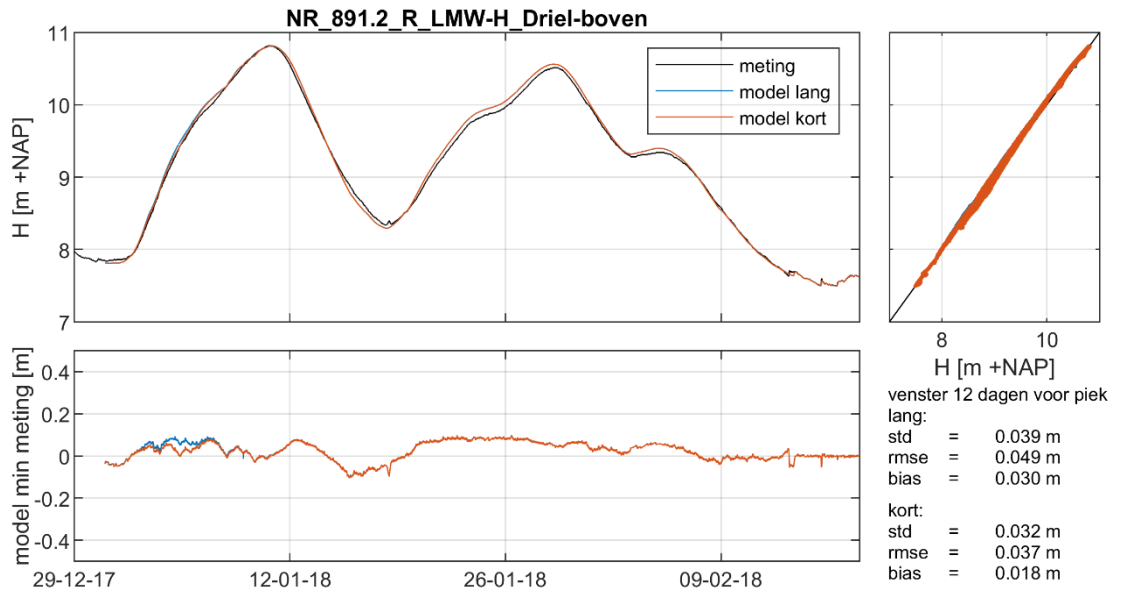
Figuur D.61 Pannerden.



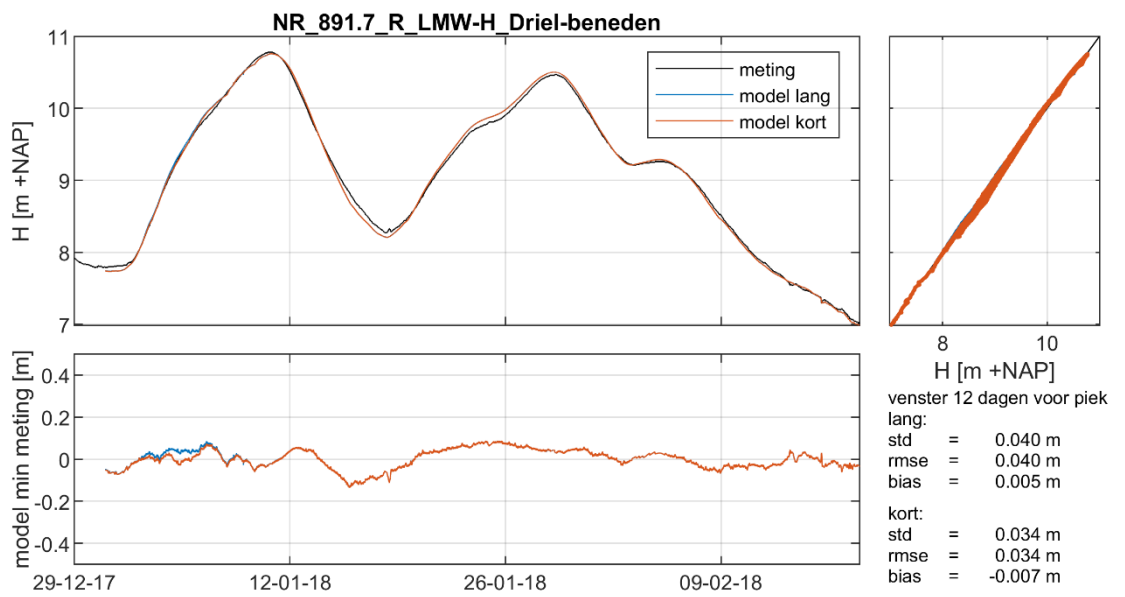
Figuur D.62 Looweer.



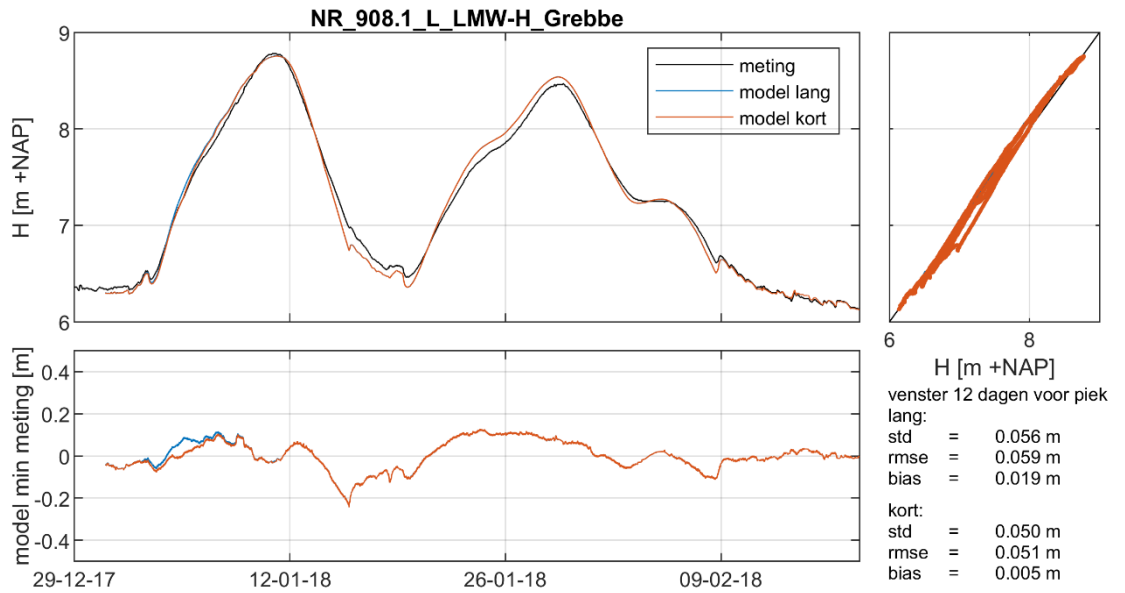
Figuur D.63 IJsselkop.



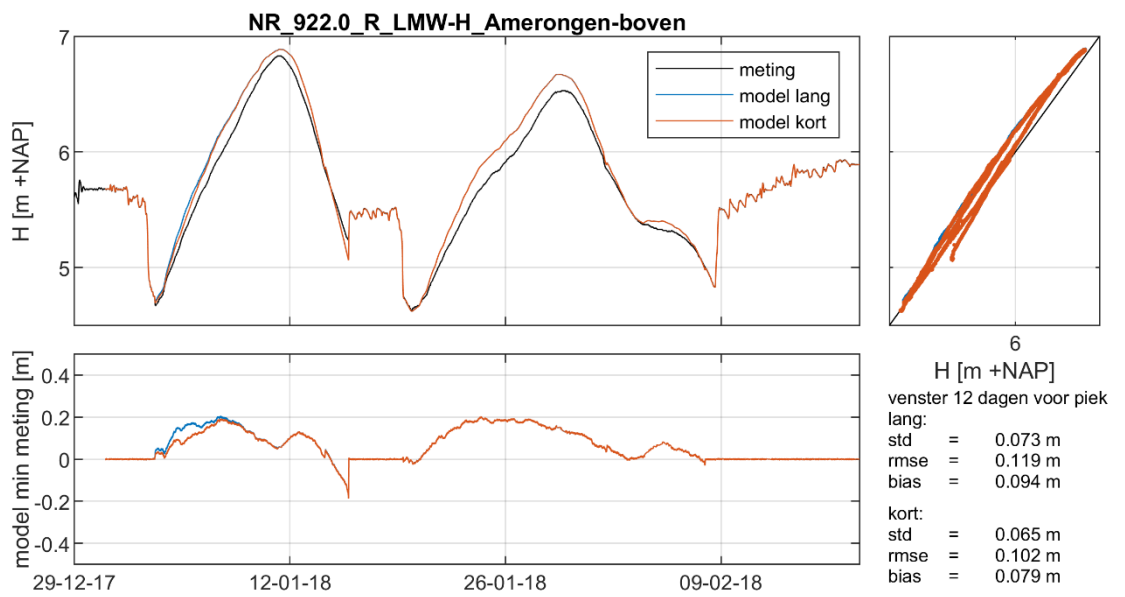
Figuur D.64 Driel-boven.



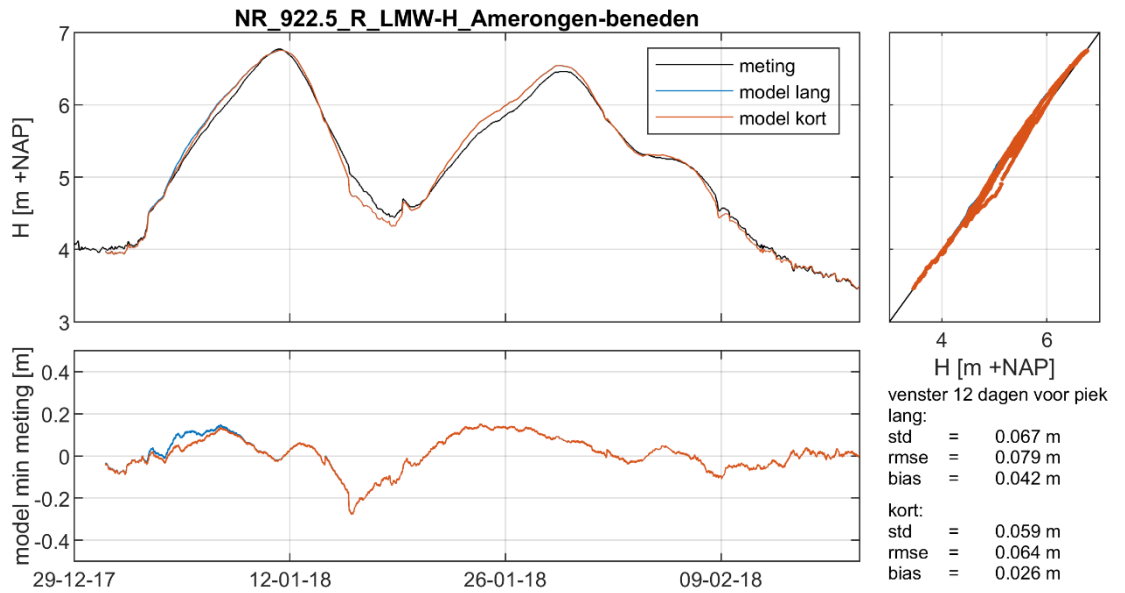
Figuur D.65 Driel-beneden.



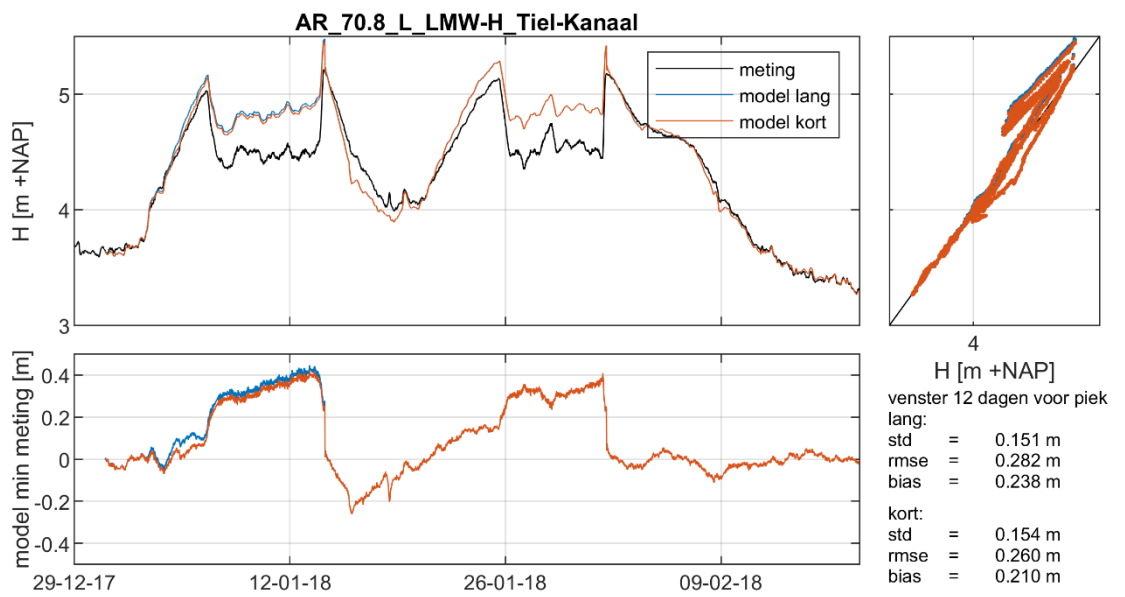
Figuur D.66 Grebbe.



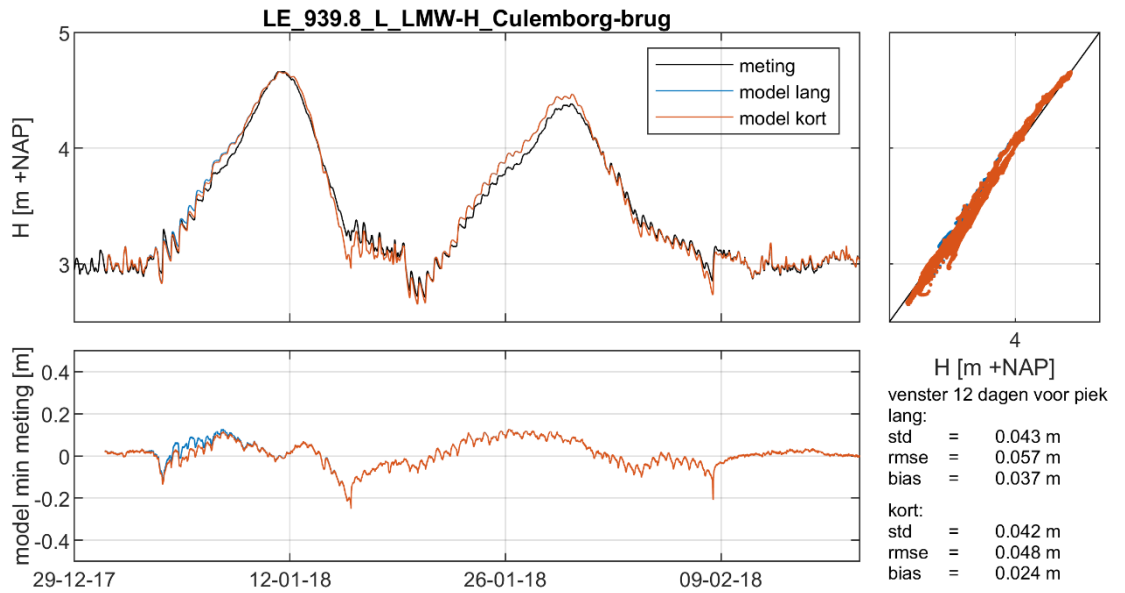
Figuur D.67 Amerongen-boven.



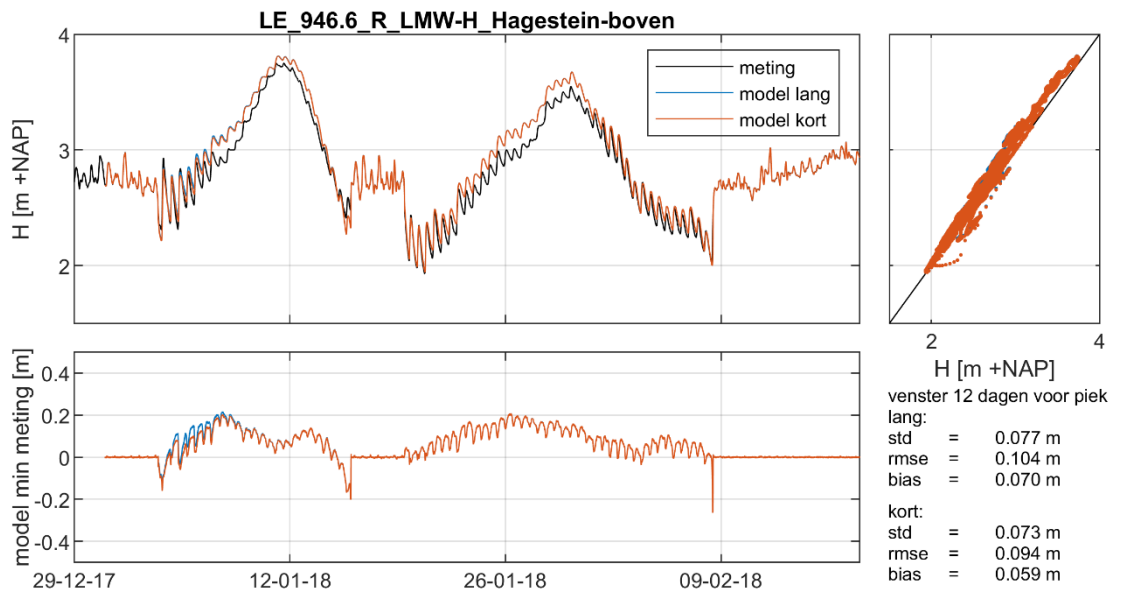
Figuur D.68 Amerongen-beneden.



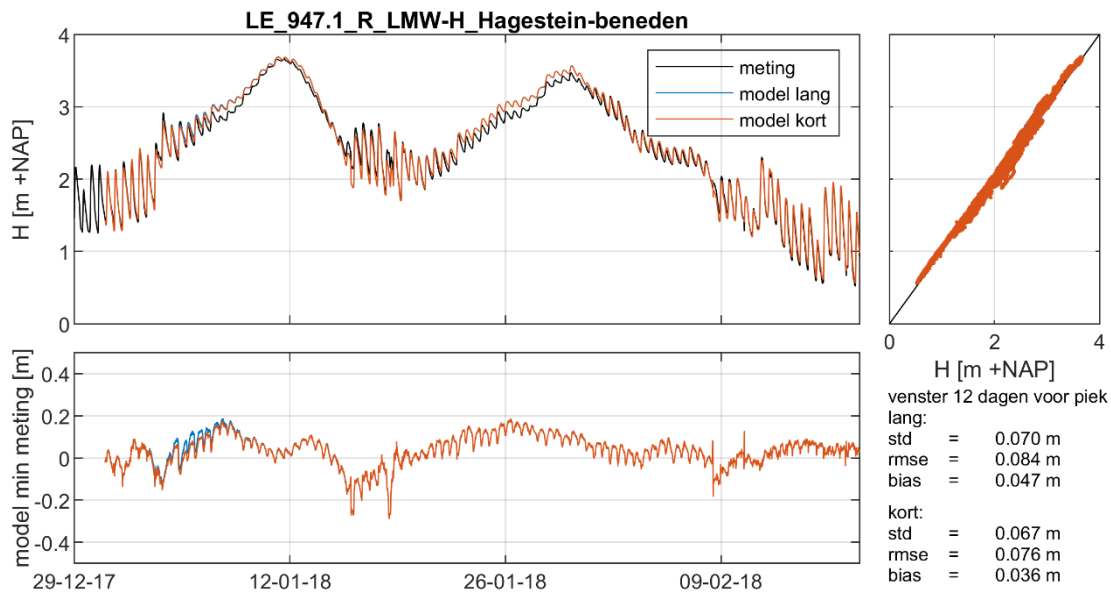
Figuur D.69 Tiel-kanaal.



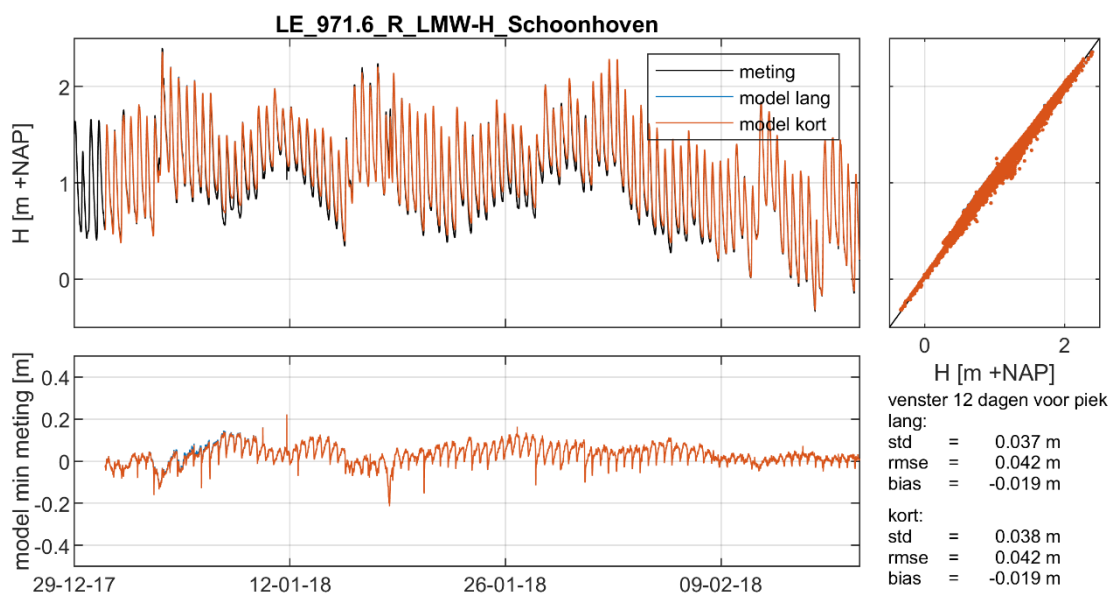
Figuur D.70 Culemborg-brug.



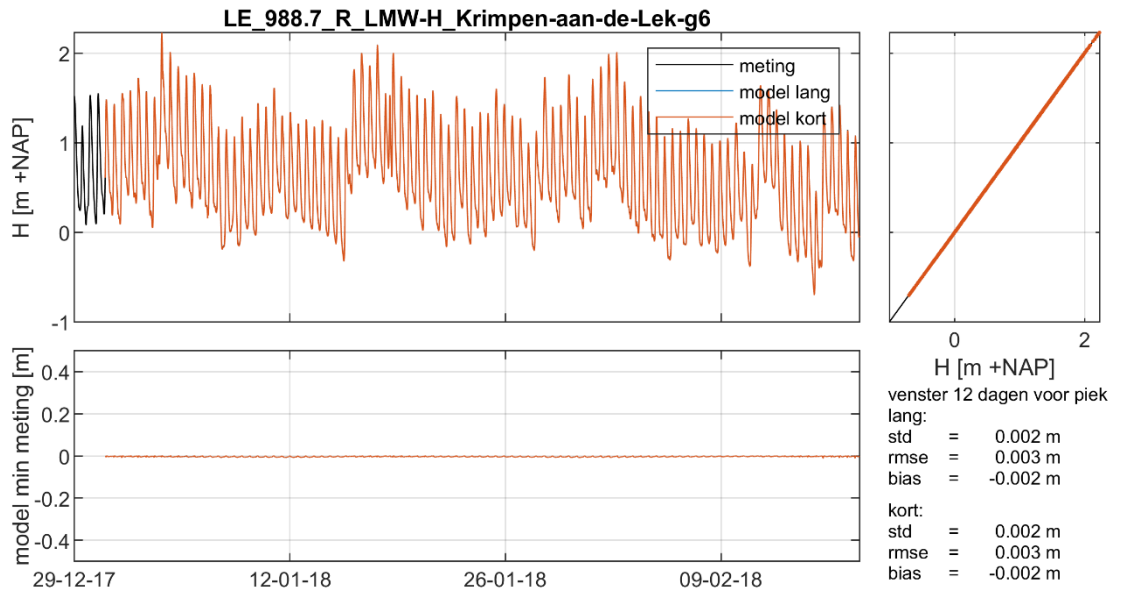
Figuur D.71 Hagestein-boven.



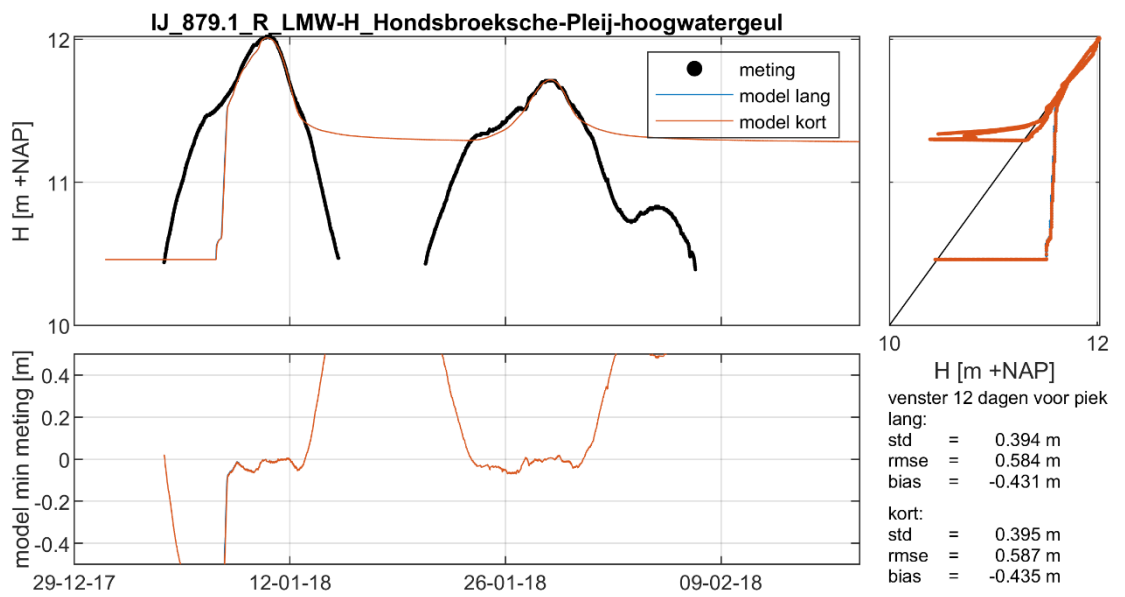
Figuur D.72 Hagestein-beneden.



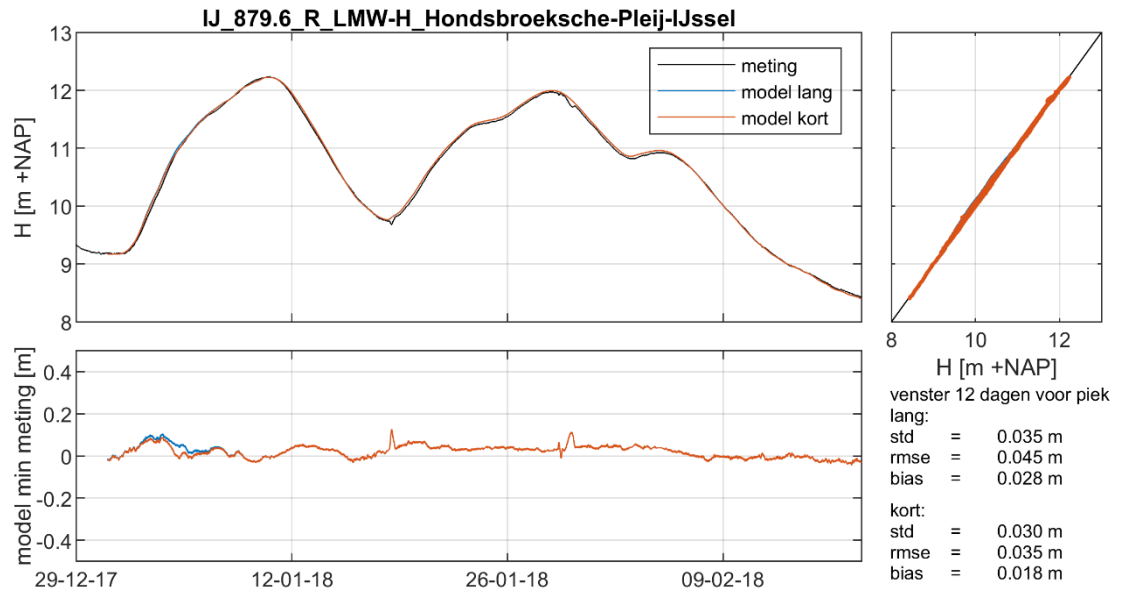
Figuur D.73 Schoonhoven.



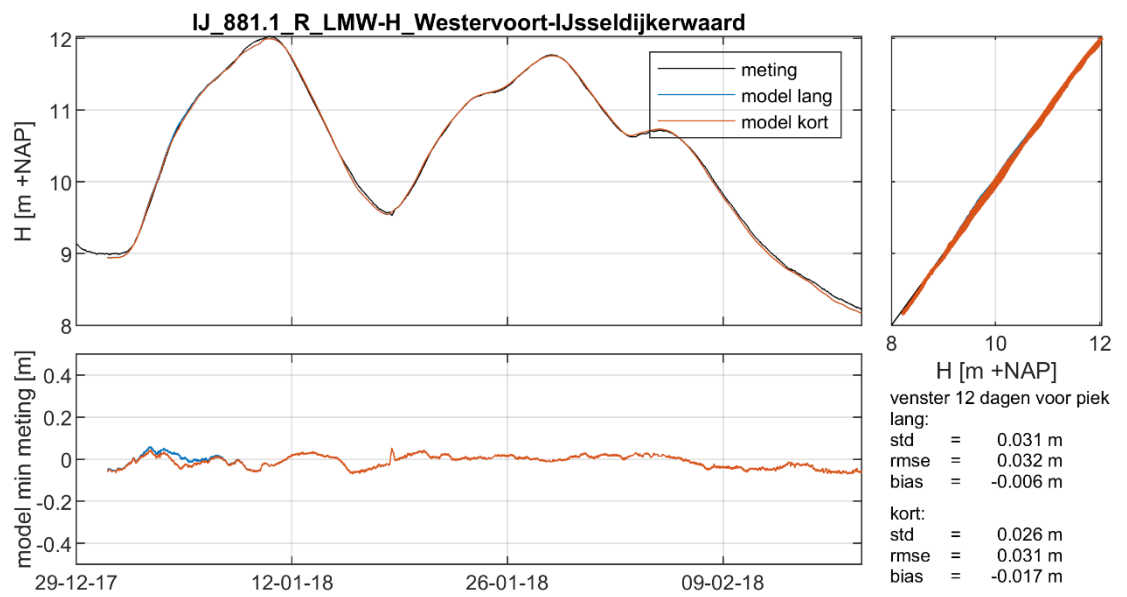
Figuur D.74 Krimpen aan de Lek.



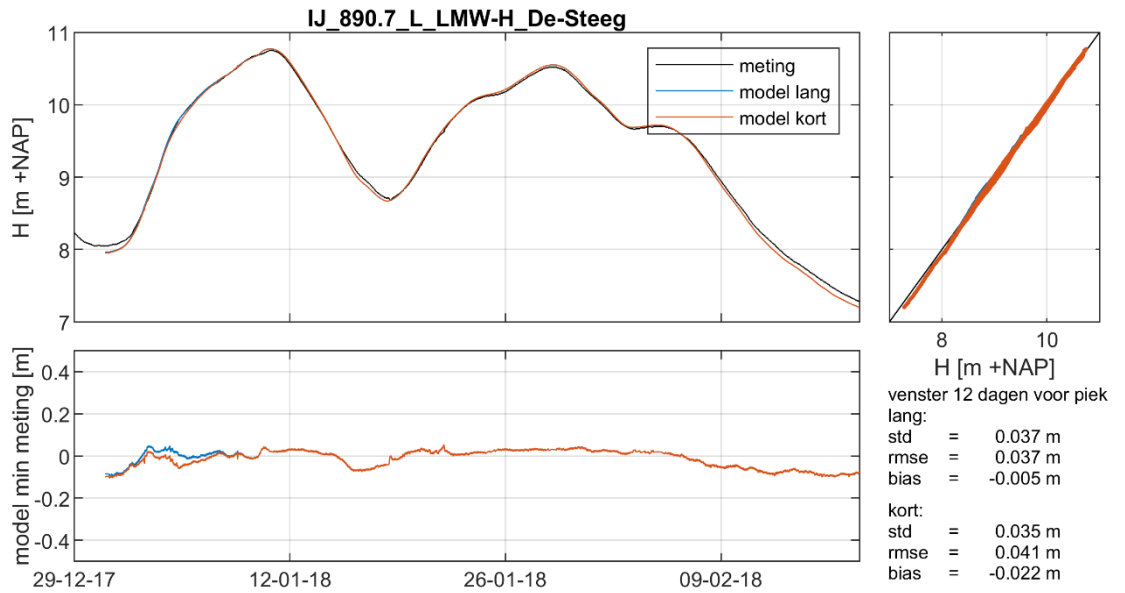
Figuur D.75 Hondsbroeksche Pleij hoogwatergeul.



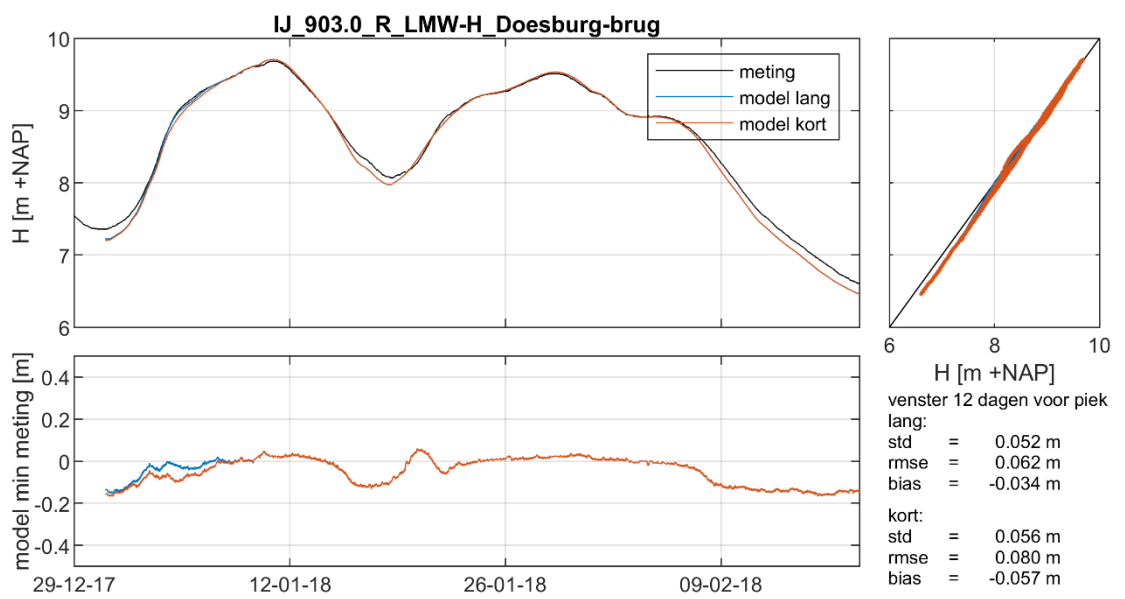
Figuur D.76 Hondsbroeksche Pleij IJssel.



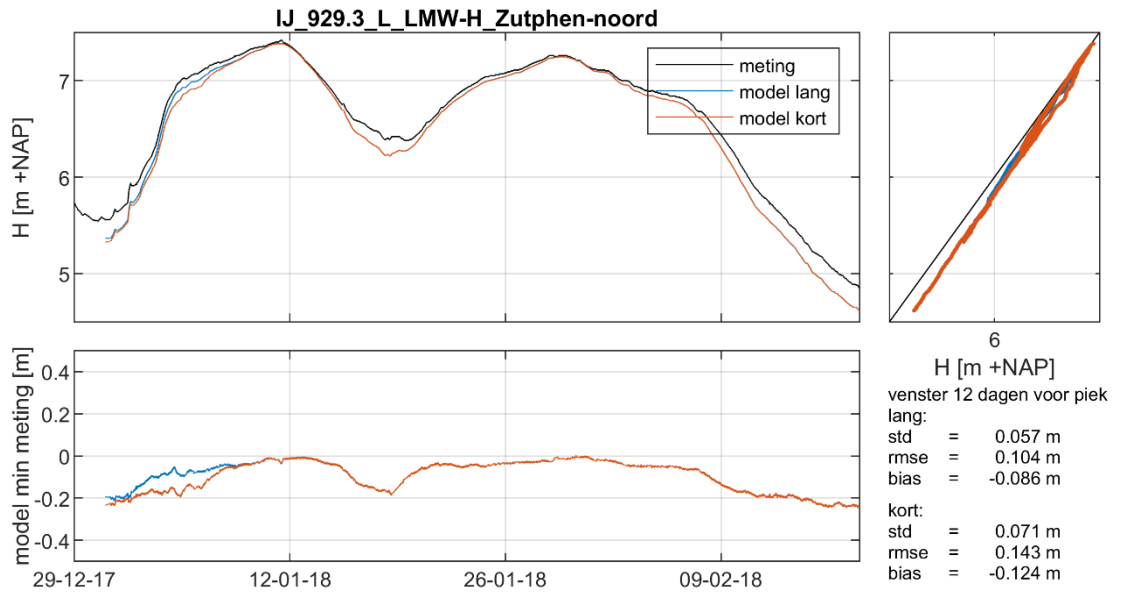
Figuur D.77 Westervoort-IJsseldijkerwaard.



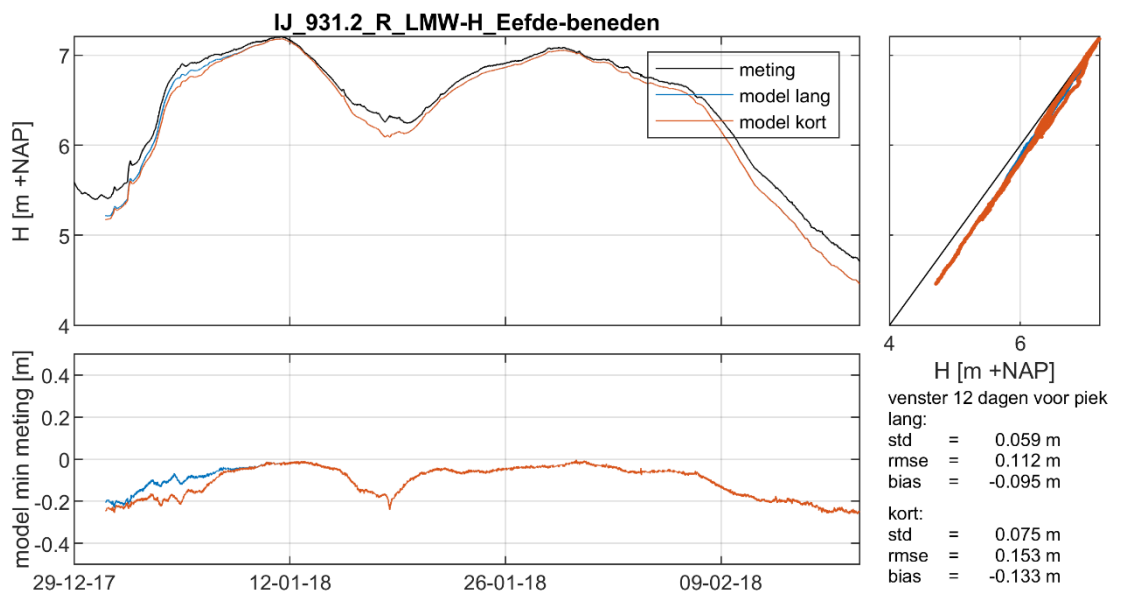
Figuur D.78 De Steeg.



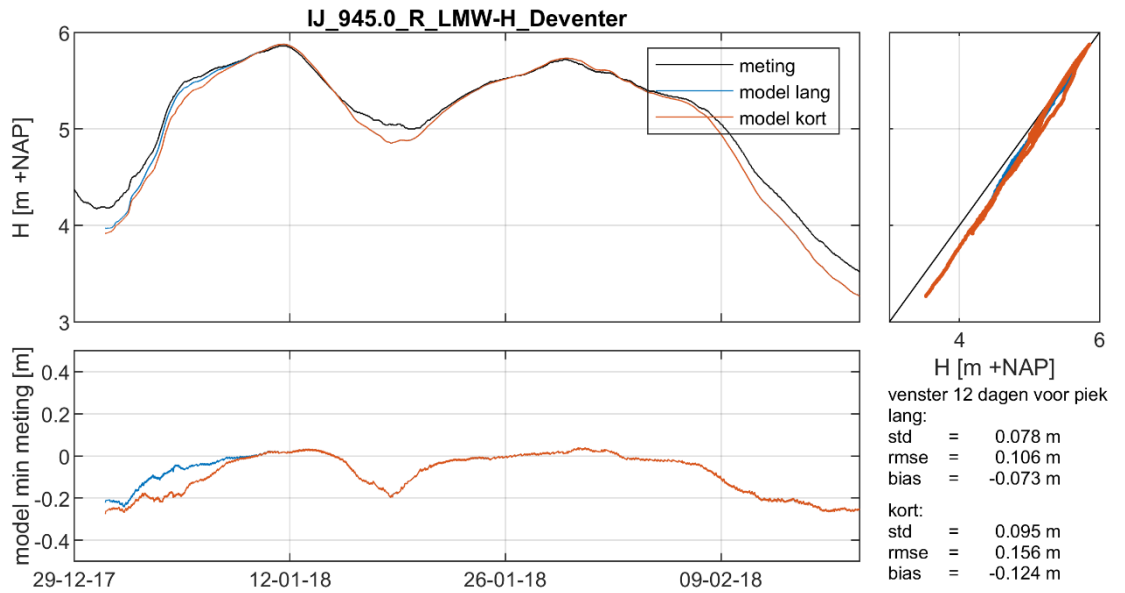
Figuur D.79 Doesburg-brug.



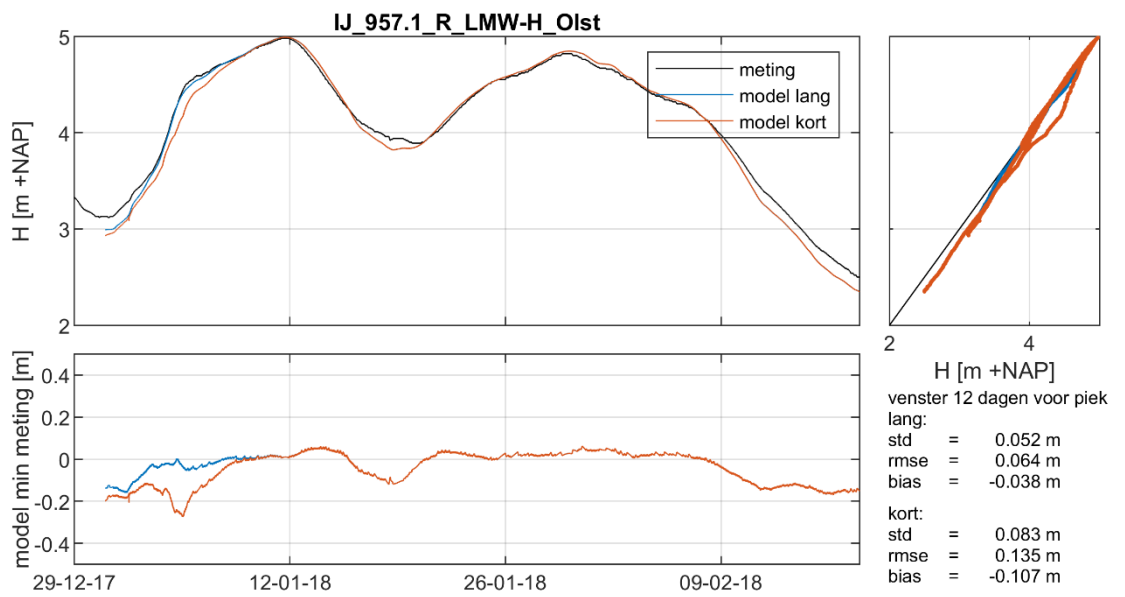
Figuur D.80 Zutphen-noord.



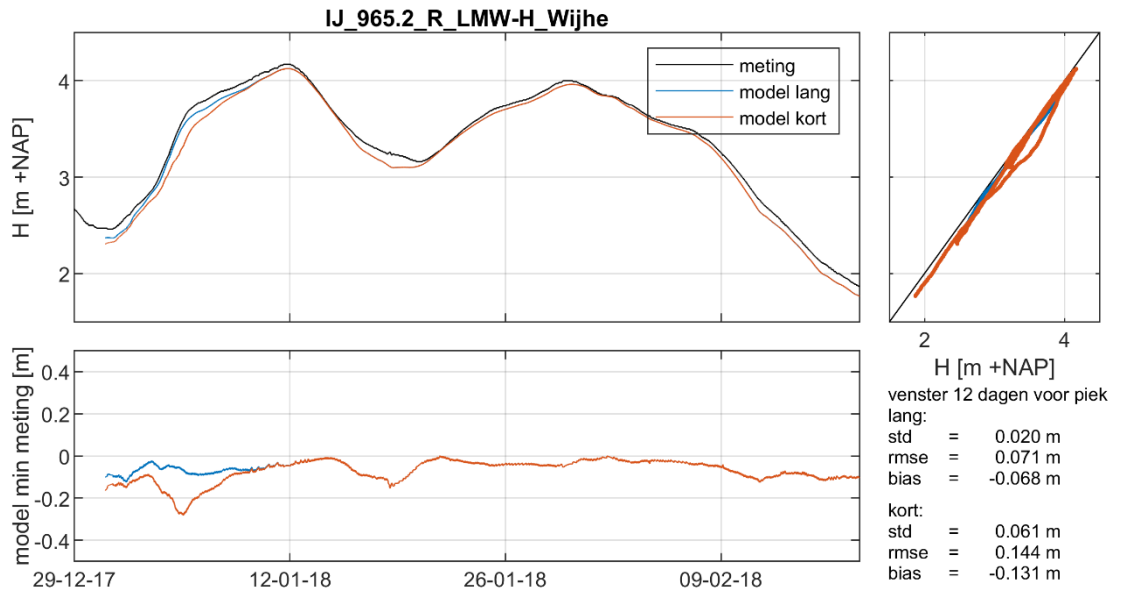
Figuur D.81 Eefde-beneden.



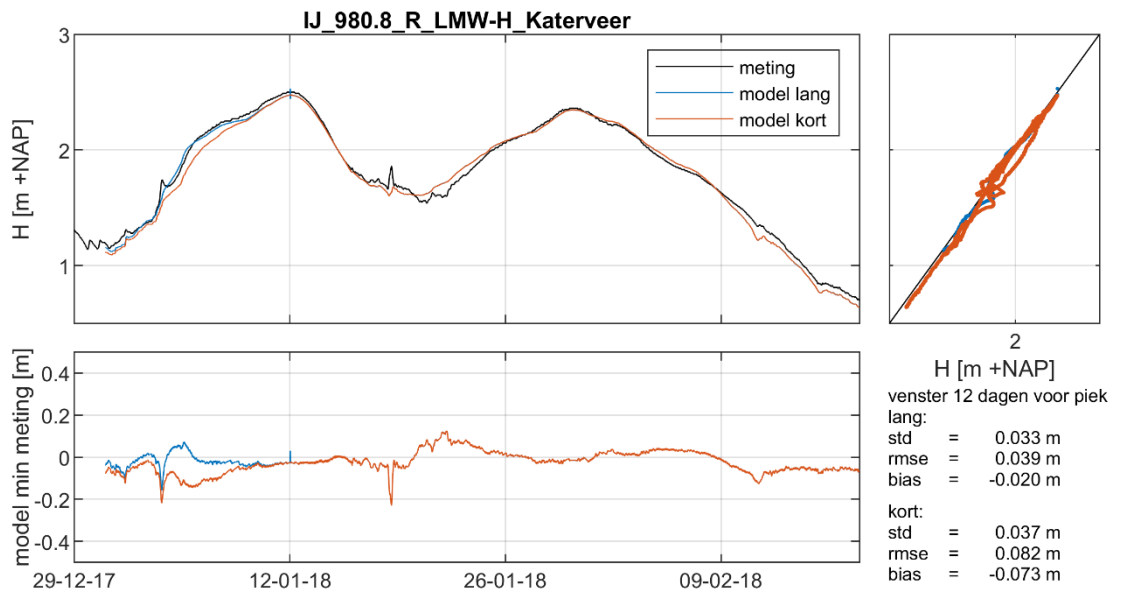
Figuur D.82 Deventer.



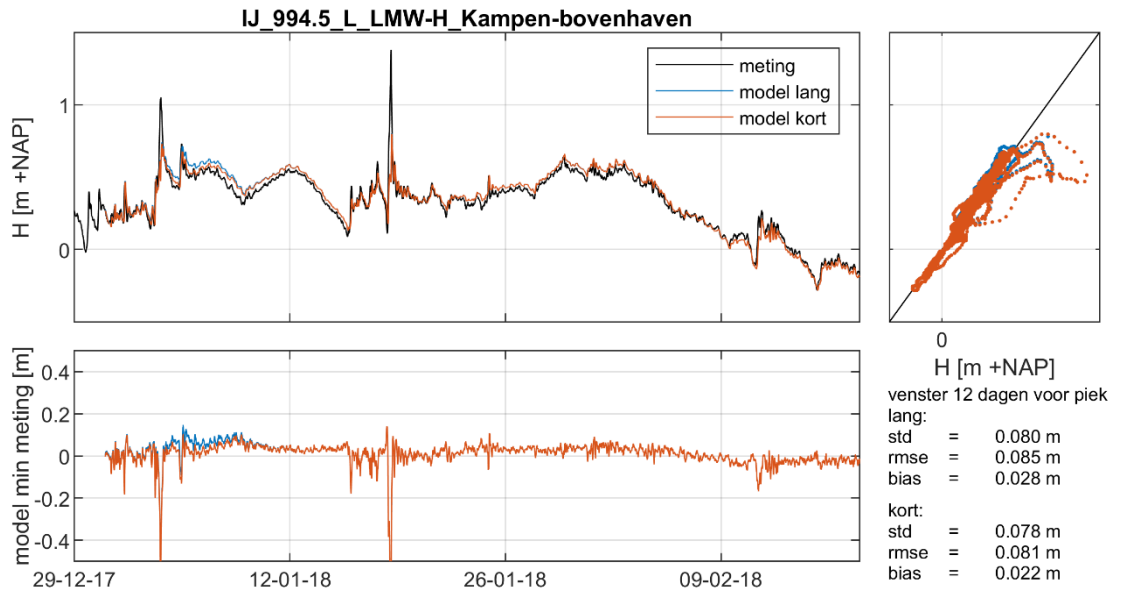
Figuur D.83 Olst.



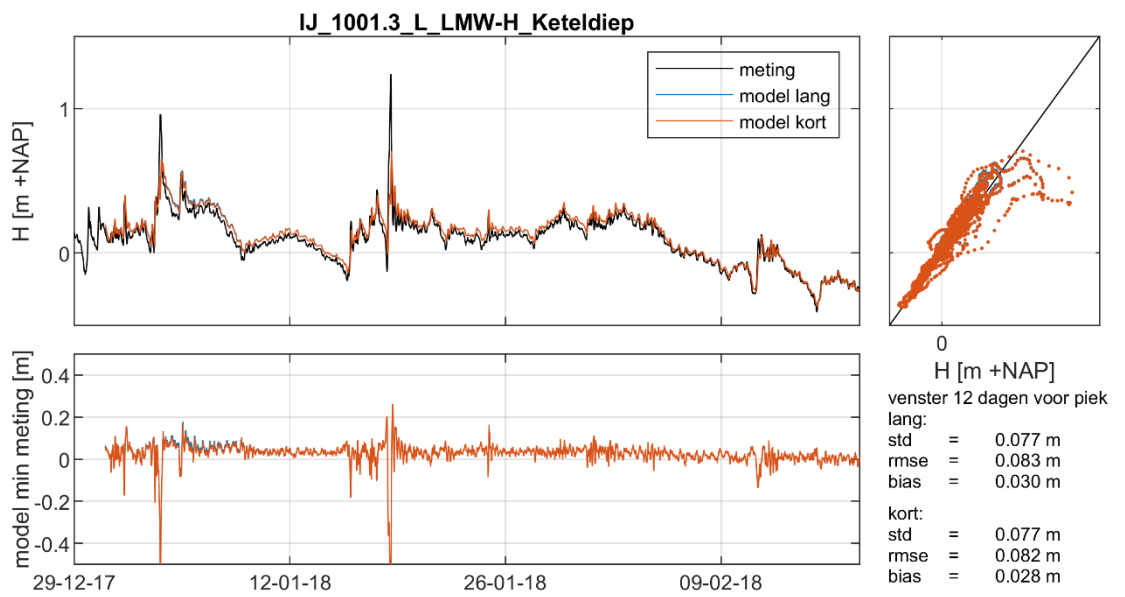
Figuur D.84 Wijhe.



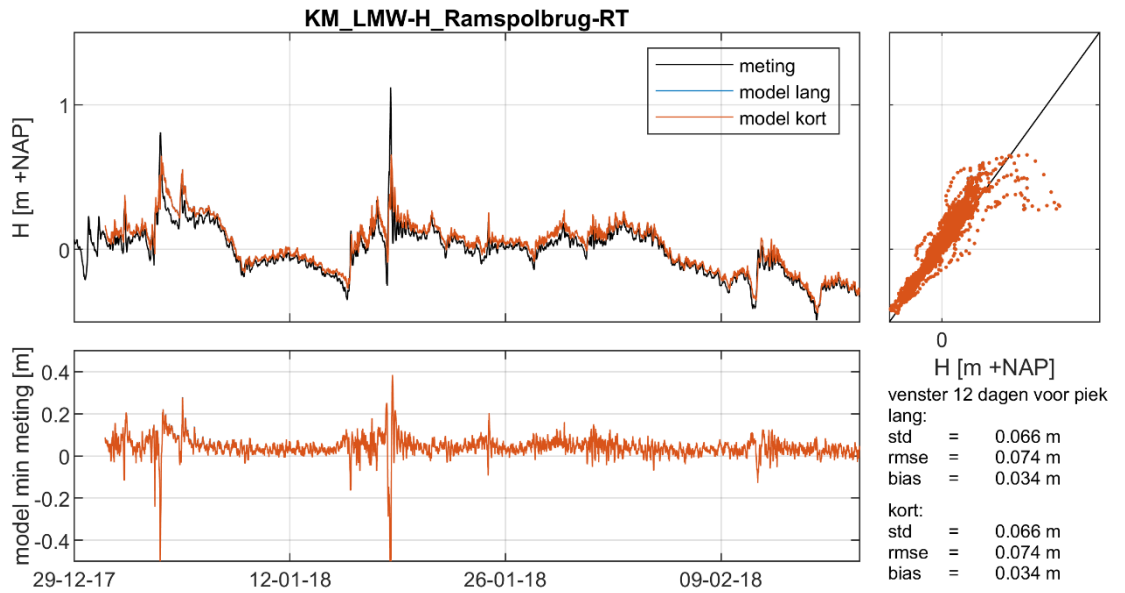
Figuur D.85 Katerveer.



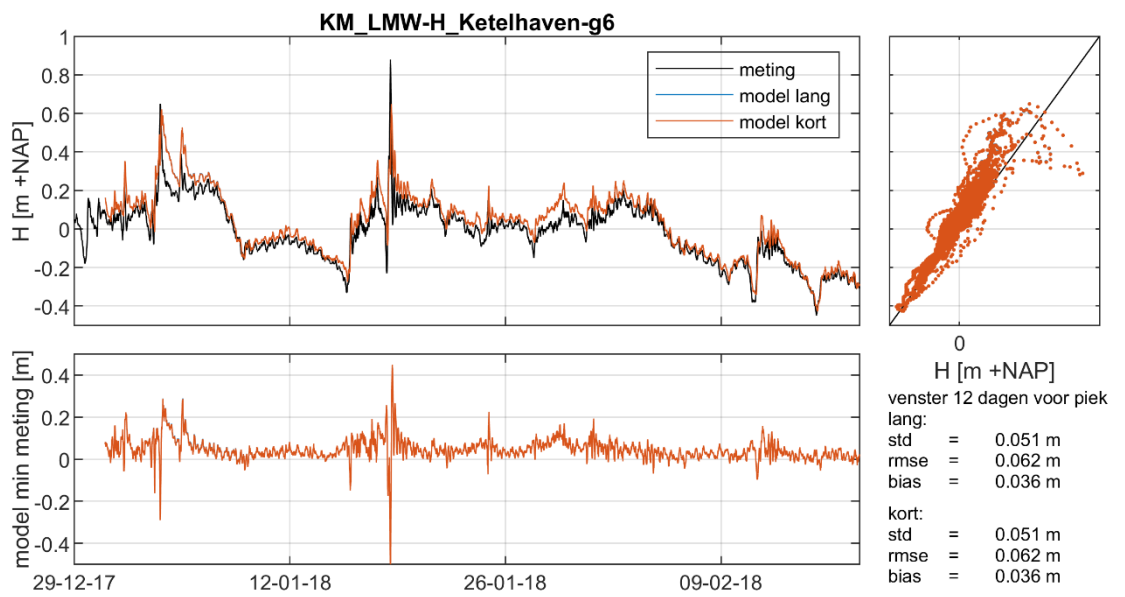
Figuur D.86 Kampen-bovenhaven.



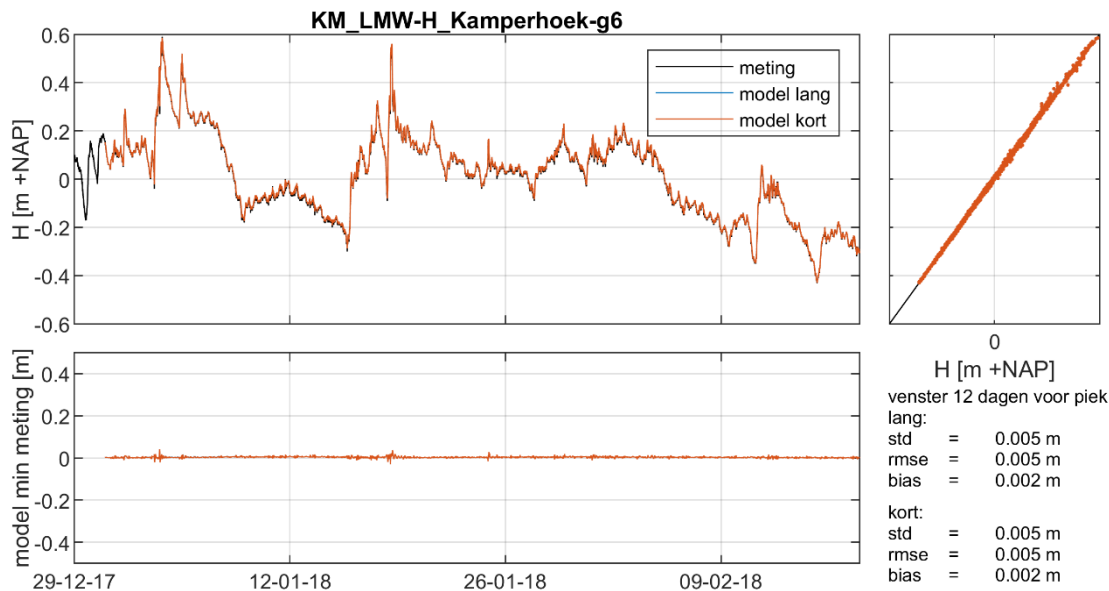
Figuur D.87 Keteldiep.



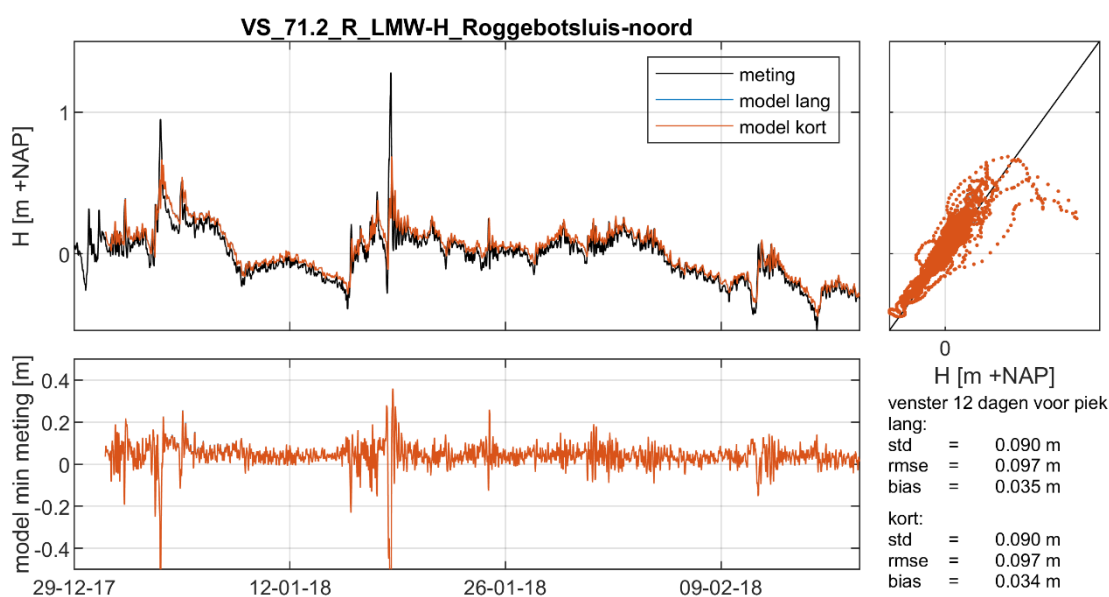
Figuur D.88 Ramspolbrug.



Figuur D.89 Ketelhaven.



Figuur D.90 Kamperhoek.

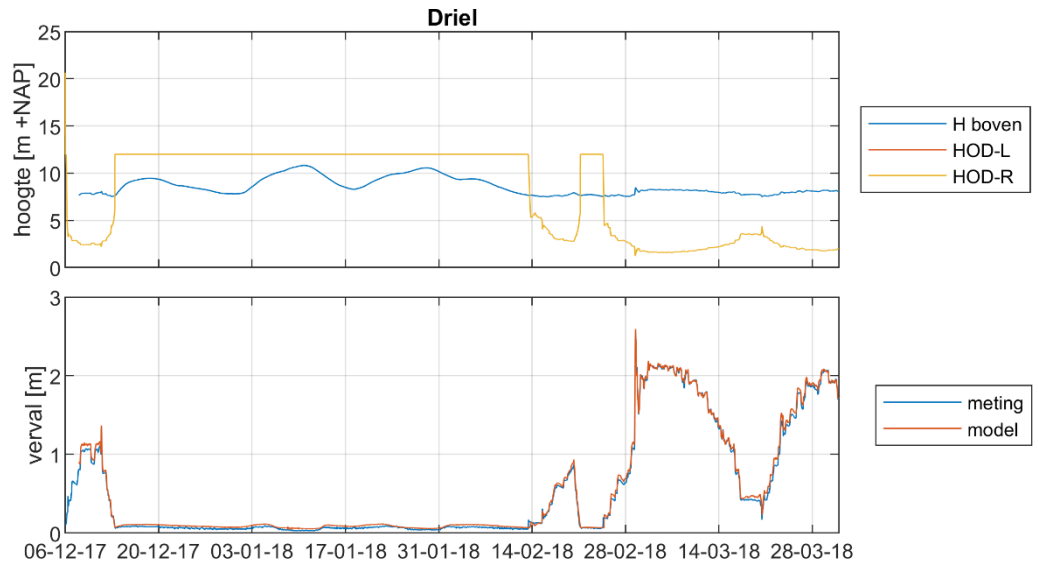


Figuur D.91 Roggebotsluis-noord.

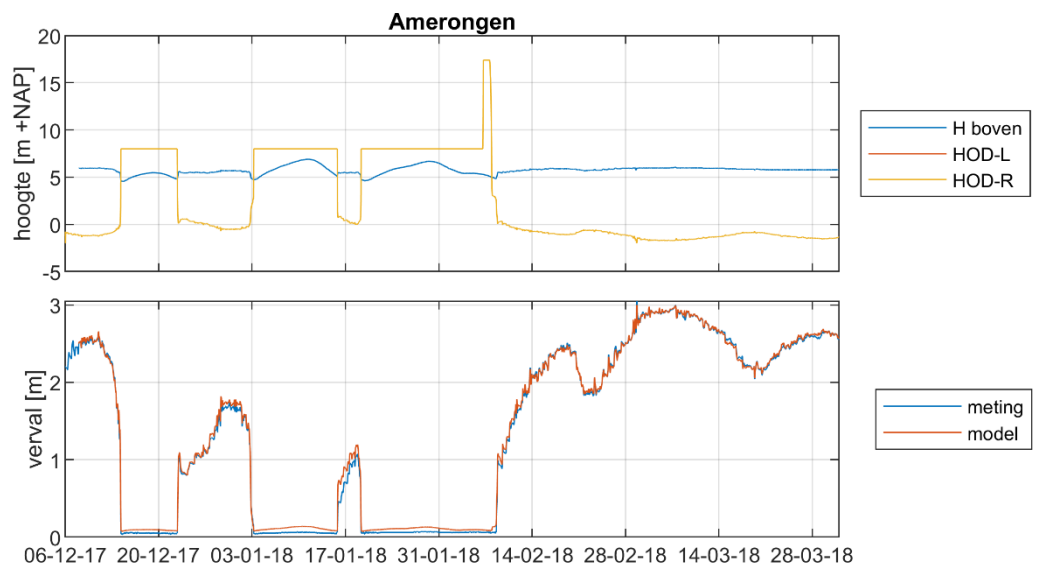
D.2 Verval stuwen

In volledig gestreken situatie is het verval over de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein enkele centimeters te groot. Dit bleek ook al uit de waterstandsvalidatie (paragraaf 3.2.2) en is eerder gerapporteerd in Kusters et al. (2022). In D-HYDRO is het op dit moment echter nog niet mogelijk om het verval over de stuwen te kalibreren door de afvoercoëfficiënten aan te passen.

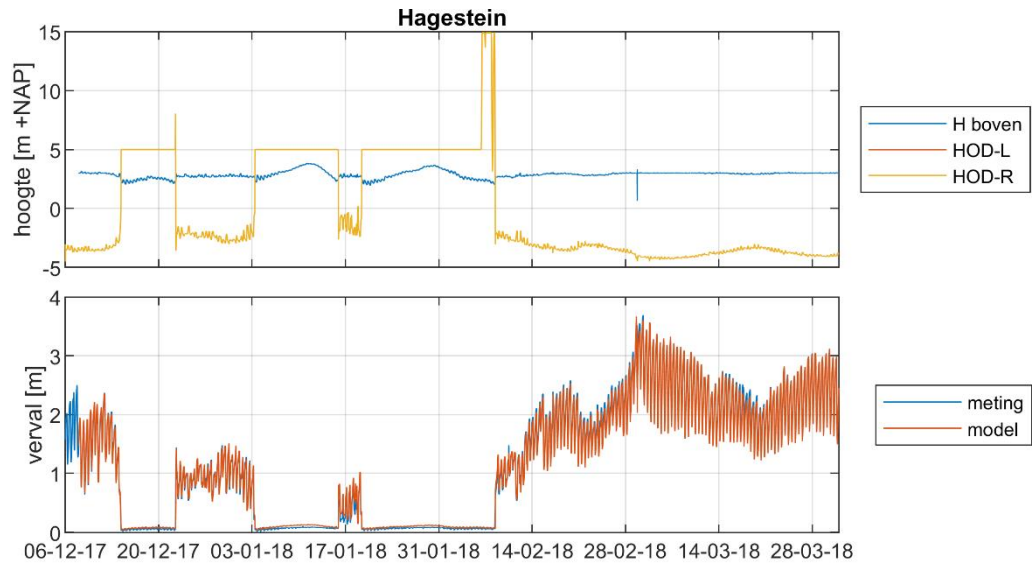
In de sturing treedt een opvallend detail op tijdens de kleinere piek direct na het derde hoogwater (in de periode 3 tot 7 februari). In paragraaf 3.2.2 zagen we dat de waterstanden bij Amerongen-boven en Hagestein-boven hier te hoog zijn in het model. Uit het gemeten verval over de stuwen blijkt dat de stuwen Amerongen en Hagestein vanaf 6 februari in werking zijn. Tot dat moment staan ze dan ook geforceerd open in het model. Nadat de sturing op waterstanden is geactiveerd blijven de stuwen in het model echter nog tot 7 februari 16:00 (Amerongen) en 22:00 (Hagestein) openstaan vanwege de te hoge waterstanden.



Figuur D.92 boven: waterstand Driel-boven en hoogte onderkant deur Driel, onder: verval over stuw Driel in meting en model.



Figuur D.93 boven: waterstand Amerongen-boven en hoogte onderkant deur Amerongen, onder: verval over stuw Amerongen in meting en model.



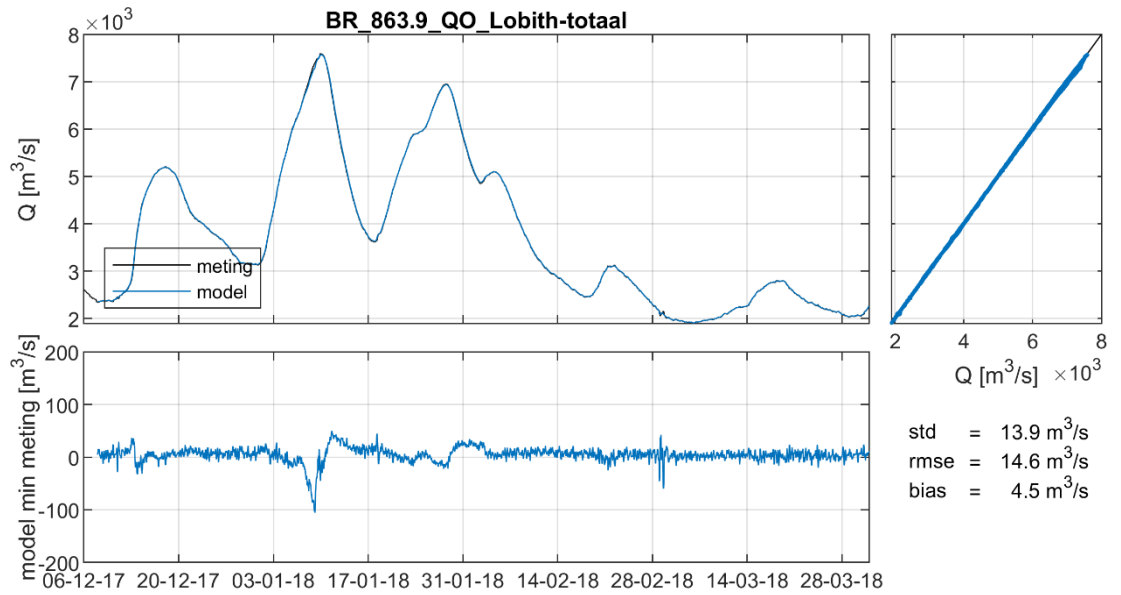
Figuur D.94 boven: waterstand Hagestein-boven en hoogte onderkant deur Hagestein, onder: verval over stuw Hagestein in meting en model.

D.3 Afvoeren splitsingspunten

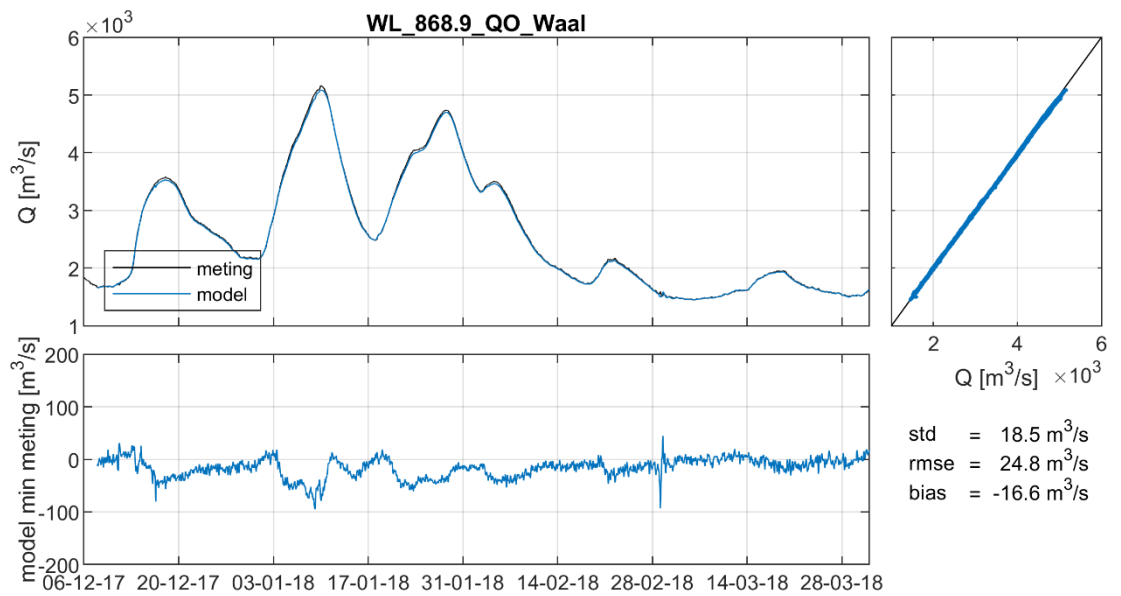
Gedurende de drie hoogwaterpieken gaat er te weinig afvoer naar de Waal en teveel naar het Pannerdens Kanaal. De afwijking is ordegrrootte $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Alleen de afvoerpiek van het tweede hoogwater op het Pannerdens Kanaal wordt relatief goed ingeschat. Dit is opvallend, omdat de piek op de Waal te laag is in het model.

Het surplus van het Pannerdens Kanaal gaat in zijn geheel naar de Neder-Rijn, waardoor de afvoeren ook hier te hoog zijn. De overeenkomst tussen gemeten en gemodelleerde afvoer naar de IJssel is juist zeer goed (bias slechts $-1 \text{ m}^3/\text{s}$). Alleen de vorm van de eerste hoogwaterpiek op de IJssel wordt in het model niet goed weergegeven. De gemeten afvoer stijgt eerst snel, waarna afvlakking plaatsvindt voorafgaand aan de piek. In het model stijgt de afvoer langzamer; de afvlakking is veel geleidelijker. Rondom en na de piek is de overeenkomst tussen model en meting wel goed. Deze 'knik' in de 'gemeten' afvoer is het gevolg van de snelle waterstandsstijging bij de IJsselkop op dit moment, die doorwerkt in de afvoer via de Q_f -relatie. Het effect is niet te zien op de Neder-Rijn en het Pannerdens Kanaal. Mogelijk is hier verbetering van de afvoerreeks op de IJssel nodig.

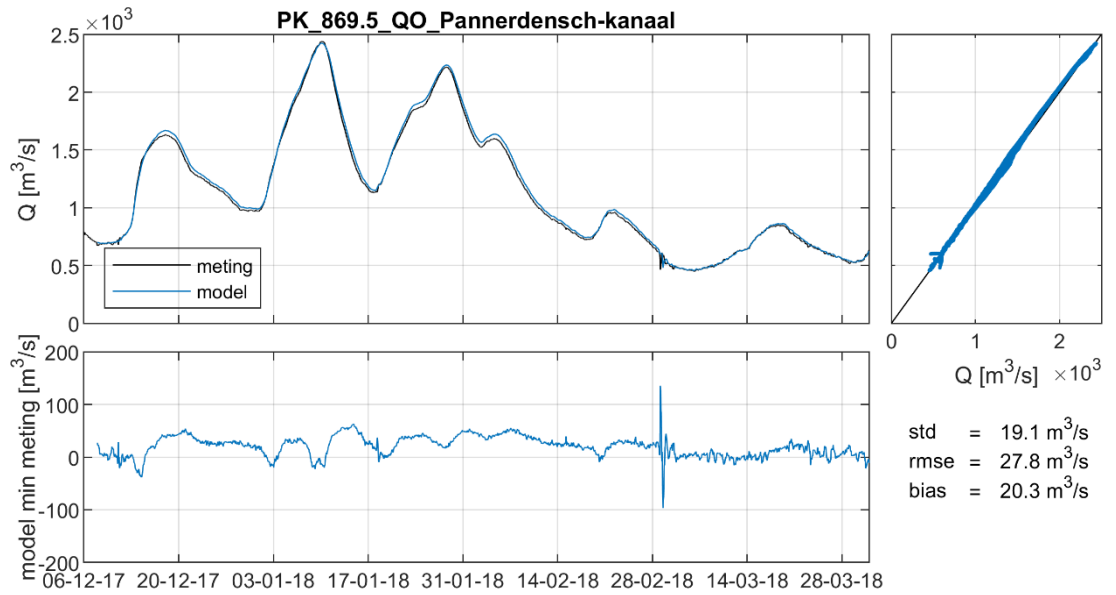
Op de Boven-Rijn valt op dat de vorm van het tweede hoogwater in een venster van ongeveer 6 dagen rondom de piek niet goed wordt weergegeven. In de aanloop is de gemodelleerde afvoer lager dan de meting, en na afloop juist hoger. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door berging op de Boven-Rijn. Met een correctie van de afvoerrandvoorwaarde bij Dornick kan dit worden verbeterd.



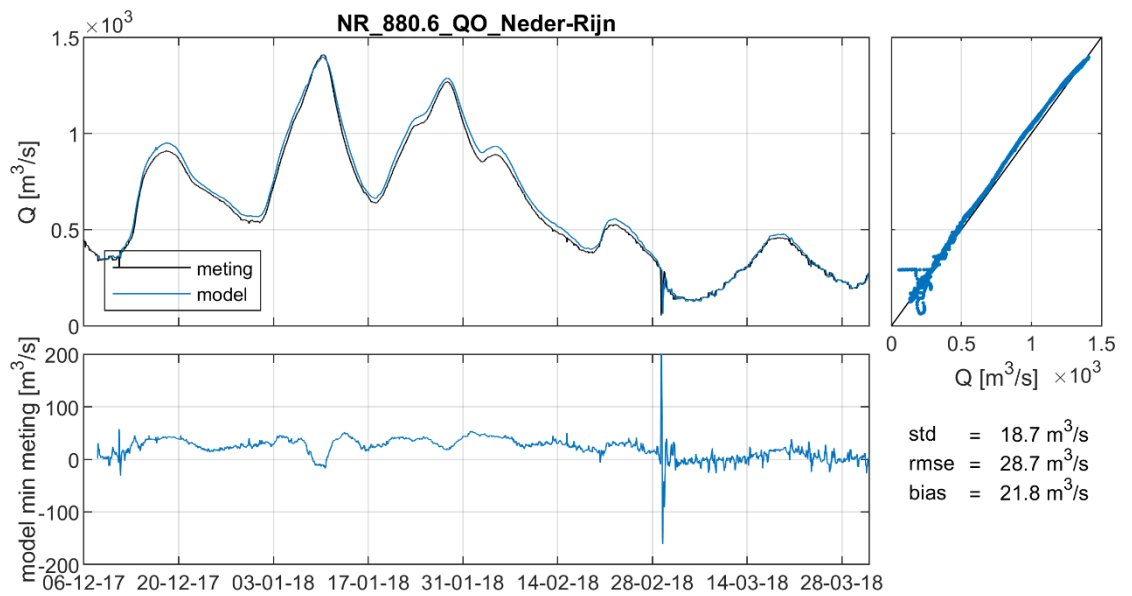
Figuur D.95 Afvoer Boven-Rijn.



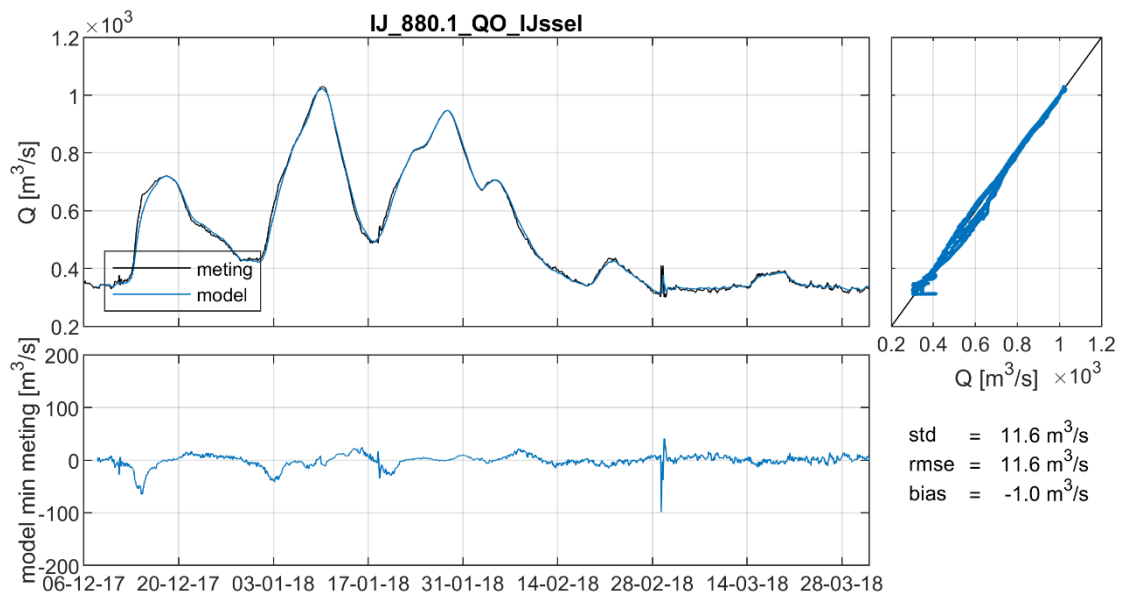
Figuur D.96 Afvoer Waal.



Figuur D.97 Afvoer Pannerdensch Kanaal.



Figuur D.98 Afvoer Neder-Rijn.



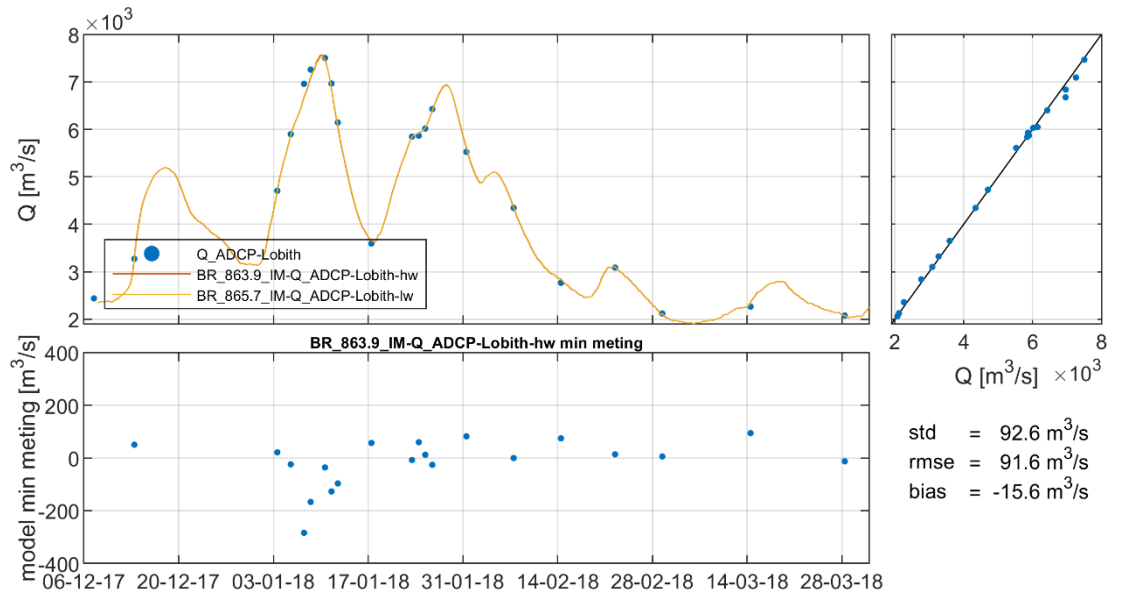
Figuur D.99 Afvoer IJssel.

D.4 ADCP- en ADM-metingen afvoer

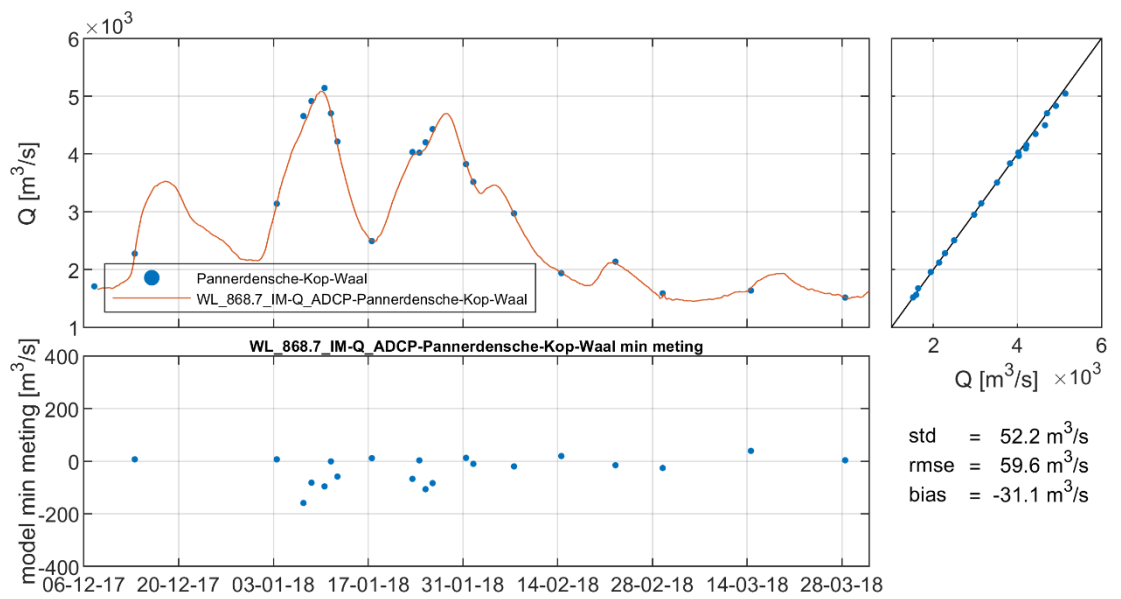
Er gaat te weinig afvoer door het **regelwerk Hondsbroeksche Pleij** ten opzichte van de meting (Figuur D.108). De hoogwatergeul stroomt niet goed in, of de stroming door de opening in het regelwerk wordt niet goed gerepresenteerd in het model. Bij de waterstandsvalidatie benedenstrooms van het regelwerk (Hondsbroeksche Pleij hoogwatergeul, zie paragraaf 3.2.1) zagen we ook al dat de hoogwatergeul onvoldoende instroomt. Hetzelfde geldt voor **Groene rivier Arnhem** bij de tweede hoogwaterpiek (Figuur D.106).

Opvallend genoeg wordt in vergelijking met de ADCP-metingen bij de **splitsingspunten** de piekafvoer naar alle takken onderschat. Het verschil is ongeveer $100 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal (Figuur D.101) en het Pannerdensch Kanaal (Figuur D.103), terwijl de piekafvoer naar Neder-Rijn (Figuur D.105) en IJssel (Figuur D.109) respectievelijk 56 en $72 \text{ m}^3/\text{s}$ lager is dan de meting. Bij **Tiel** (Figuur D.102) lijkt de piekafvoer juist overschat te worden. Dit komt waarschijnlijk doordat in de metingen een deel van de winterbedafvoer ontbreekt (zie Bijlage A, paragraaf 2.3.1).

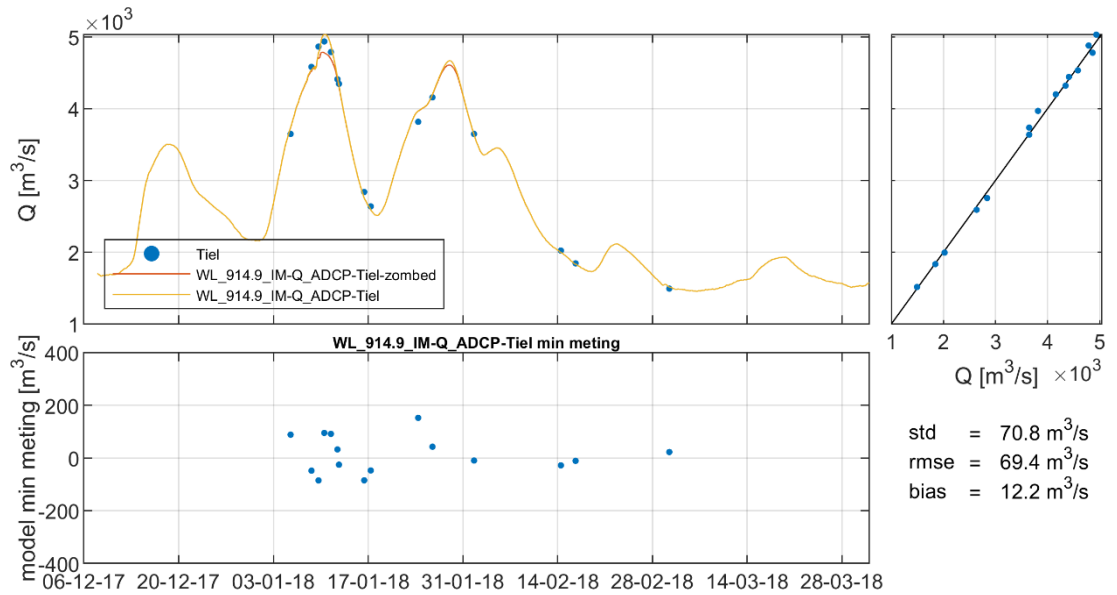
De **ADM-meting** bij **Driel** (Figuur D.112) is consistent iets lager dan de gemodelleerde afvoer. Bij **Hagestein** (Figuur D.113) is de gemeten piekafvoer een stuk hoger dan in het model, terwijl de gemeten waterstand op deze locatie juist lager is rondom de piek. In de rest van de validatieperiode is de gemodelleerde afvoer bij Hagestein vergelijkbaar met de ADM-meting.



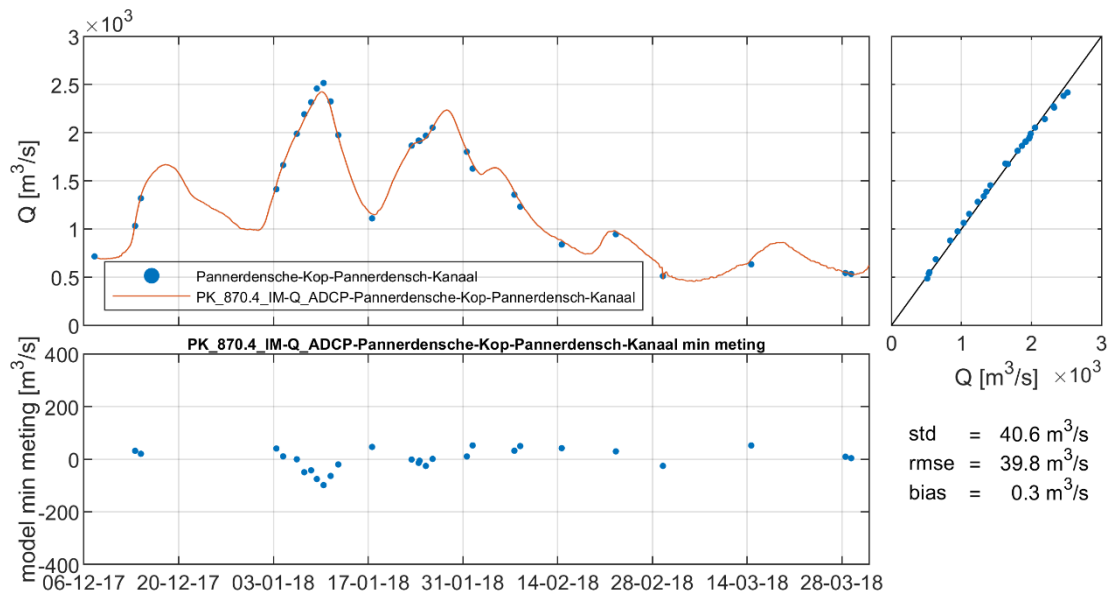
Figuur D.100 ADCP Lobith.



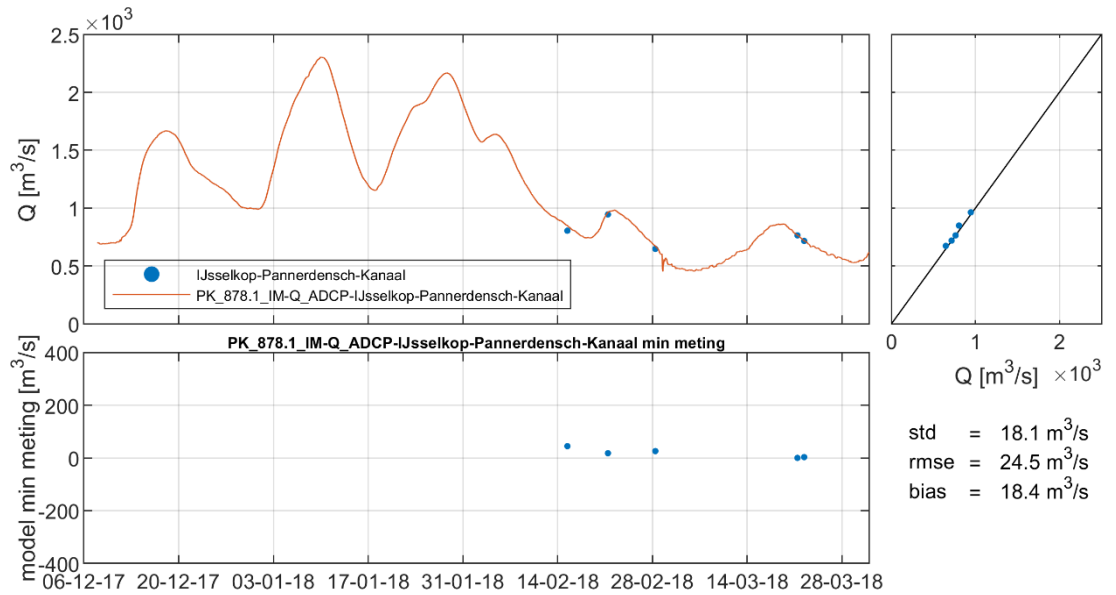
Figuur D.101 ADCP Pannerdensch Kop – Waal.



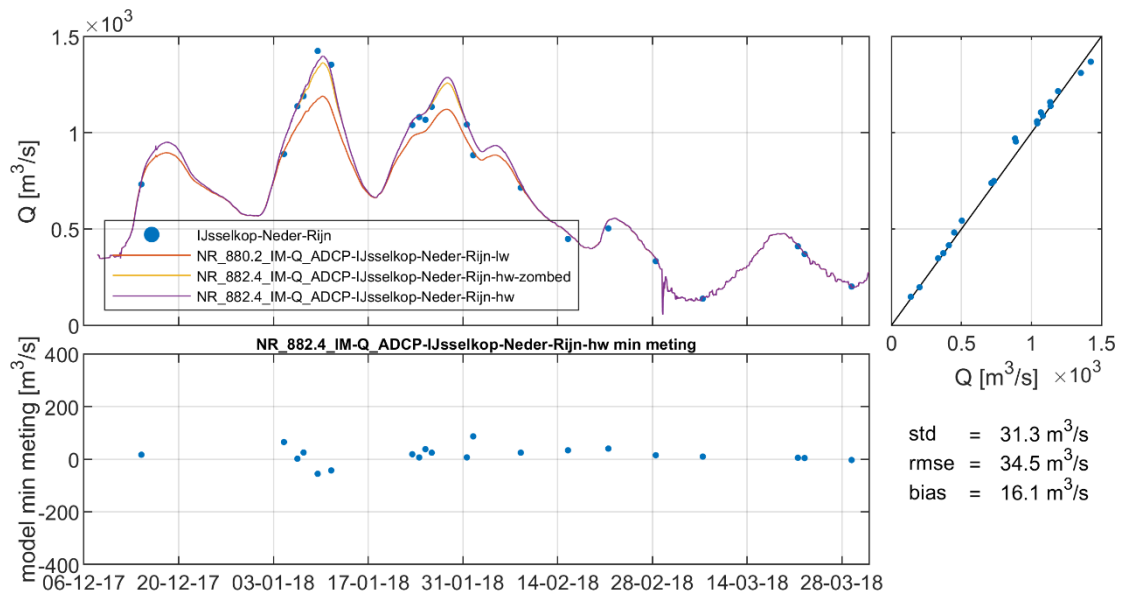
Figuur D.102 ADCP Tiel.



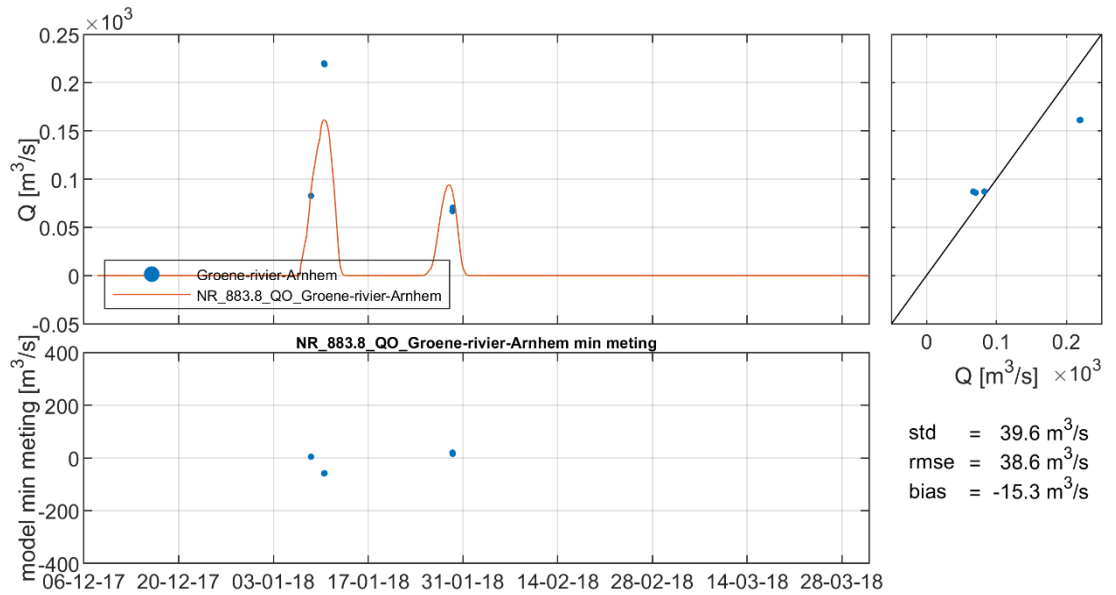
Figuur D.103 ADCP Pannerdensch Kop – Pannerdensch Kanaal.



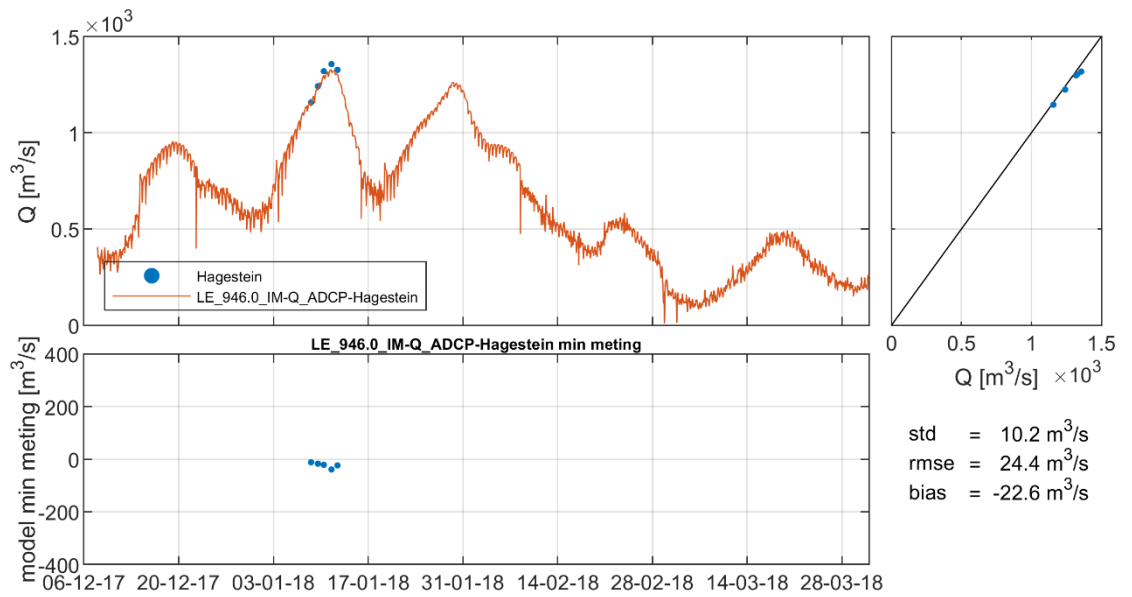
Figuur D.104 ADCP IJsselkop – Pannerdensch Kanaal



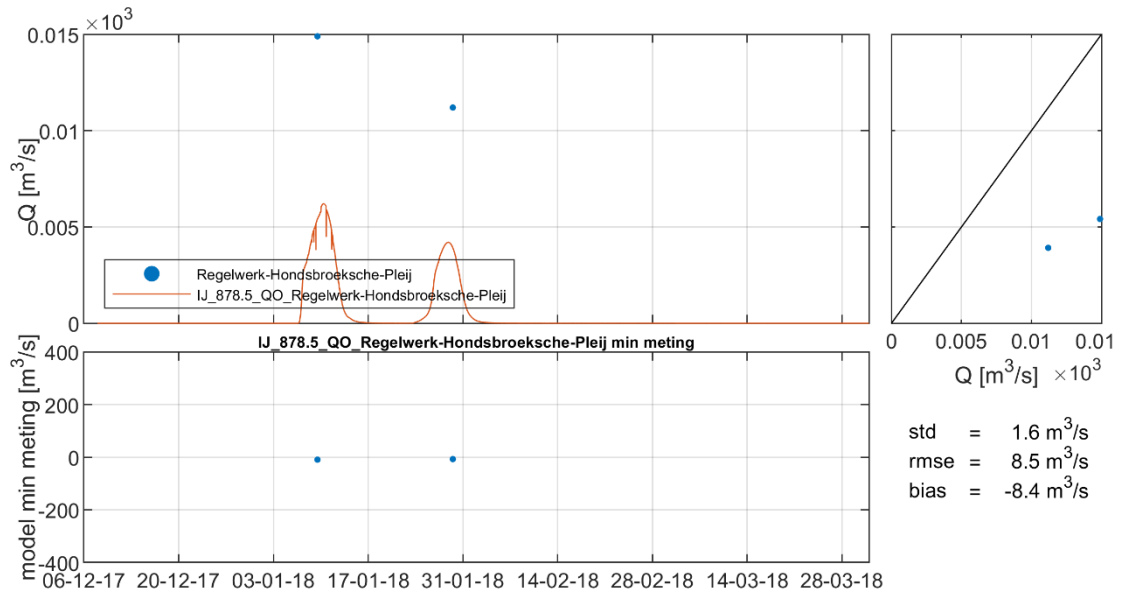
Figuur D.105 ADCP IJsselkop – Neder-Rijn.



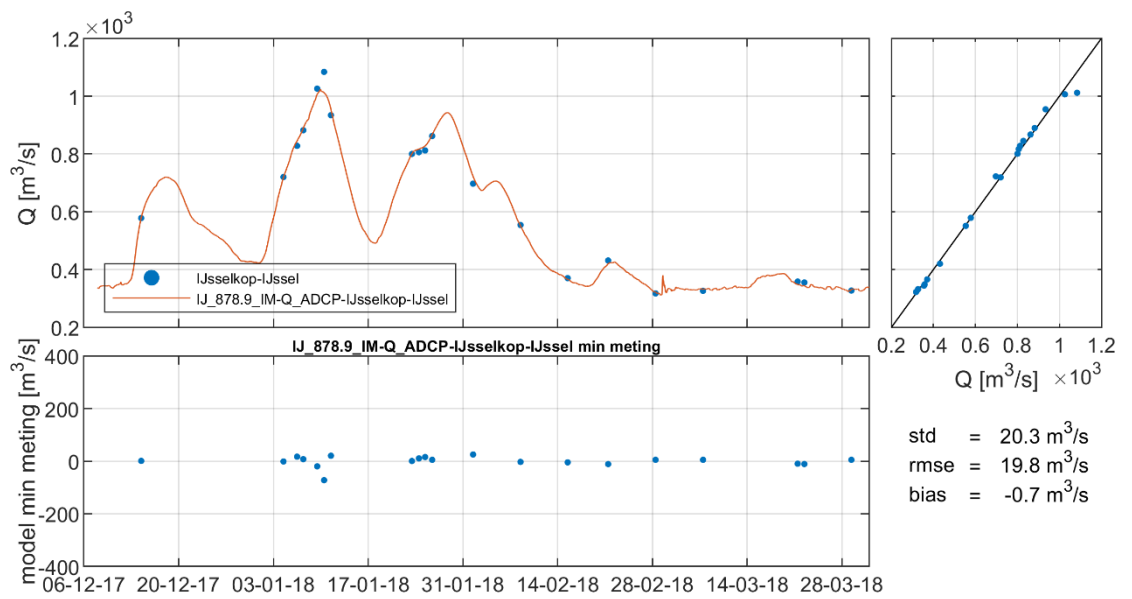
Figuur D.106 Groene rivier Arnhem.



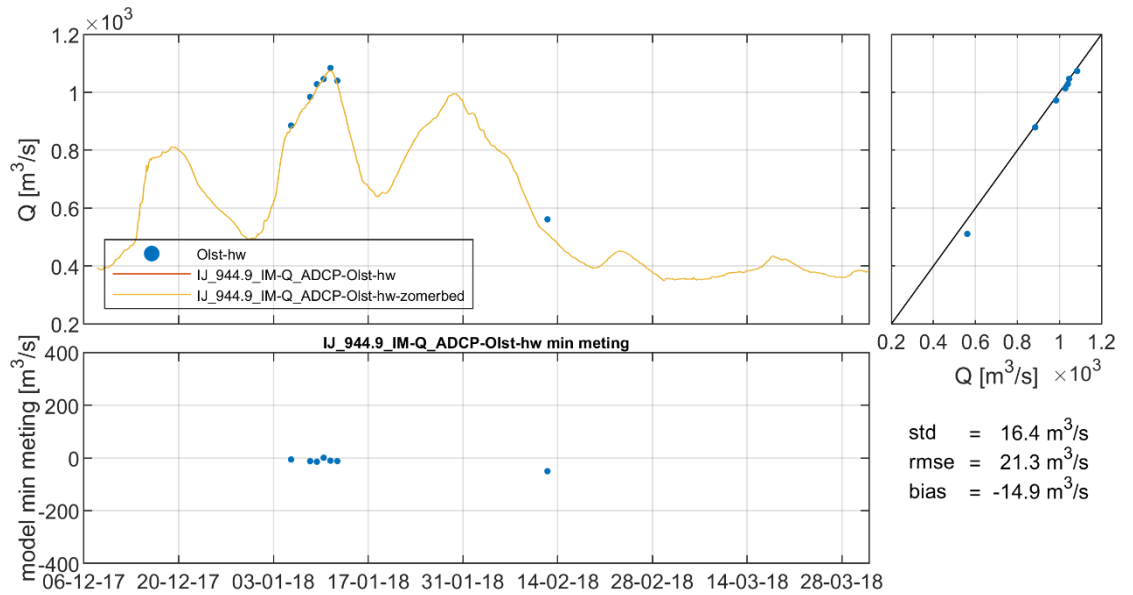
Figuur D.107 ADCP Hagestein.



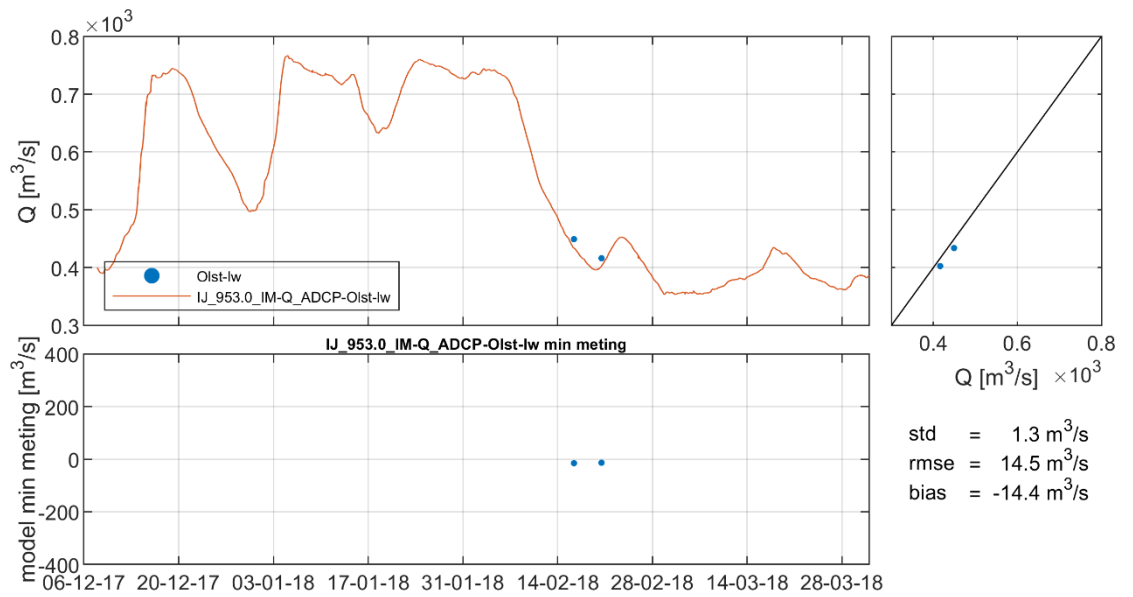
Figuur D.108 Regelwerk Hondsbroeksche Pleij.



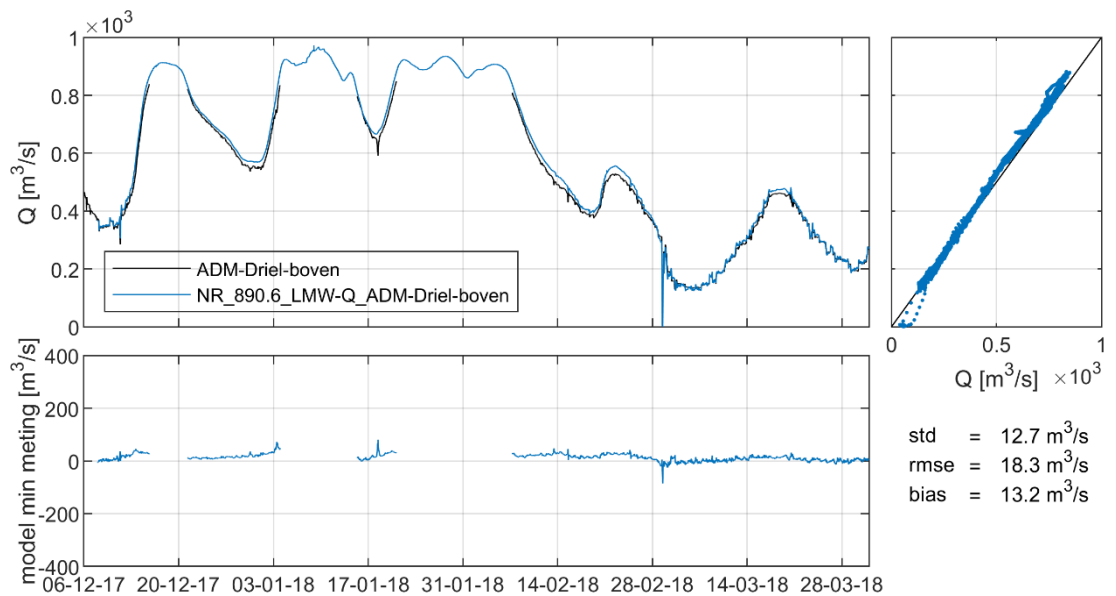
Figuur D.109 ADCP IJsselkop – IJssel.



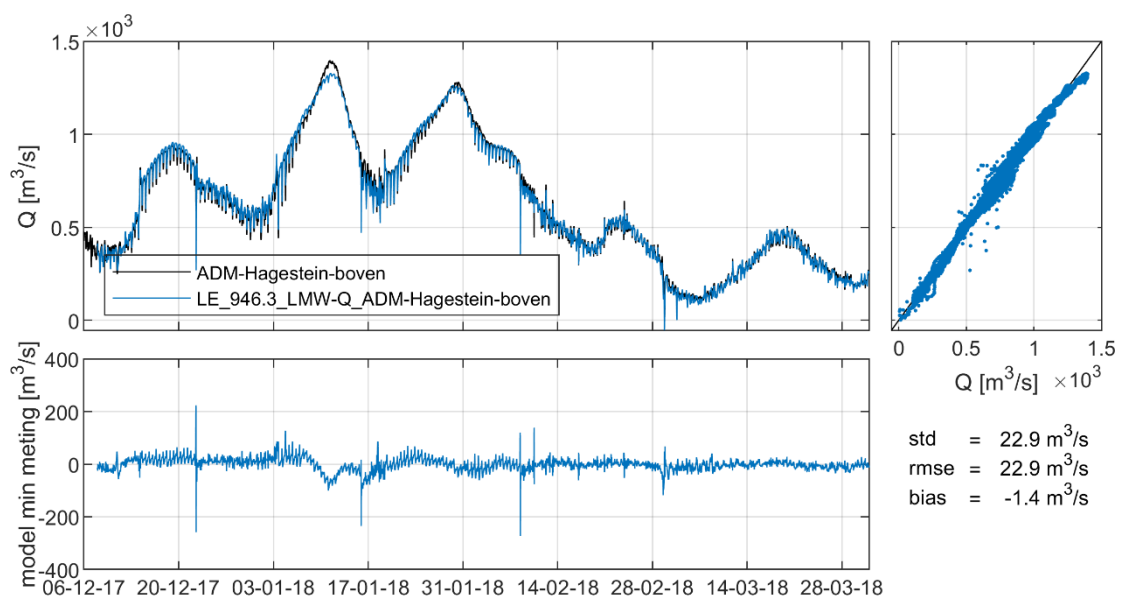
Figuur D.110 ADCP Olst hoogwater.



Figuur D.111 ADCP Olst laagwater.



Figuur D.112 ADM Driel-boven.



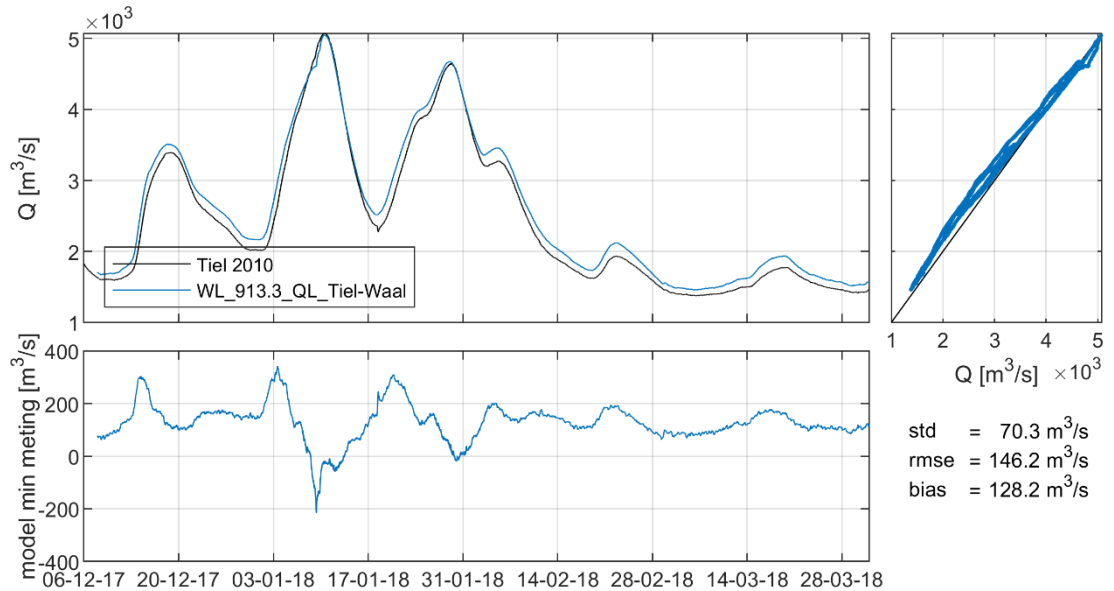
Figuur D.113 ADM Hagestein-boven.

D.5 Qh-relaties Tiel en Olst

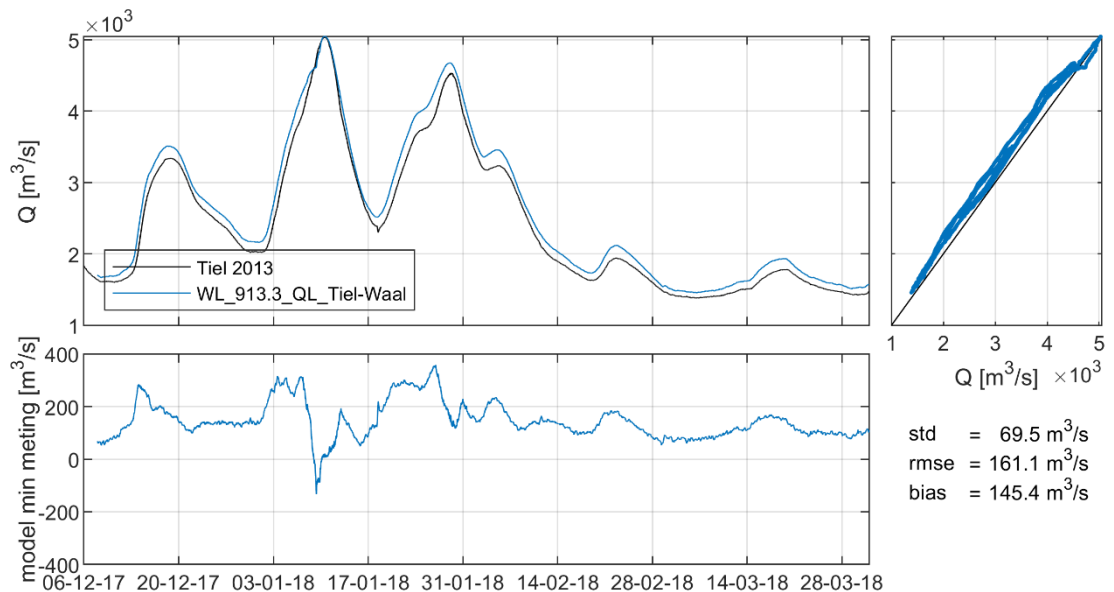
De afvoer op basis van de Qh-relaties uit 2010 en 2013 voor **Tiel** (Figuur D.114 en Figuur D.115) is zeer verschillend van de gemodelleerde afvoer. In het hele afvoerbereik zijn de Qh-afvoeren lager dan de afvoer uit het model. Verschillen lopen op tot ruim 300 m³/s. De Qh-relatie uit 2013 komt bij lage afvoeren iets dichterbij het model dan de relatie uit 2010, maar bij de drie hoogwaterpieken is het verschil met het model juist groter. Alleen de maximale afvoer op basis van het model en de Qh-relaties is vergelijkbaar.

De overeenkomst tussen de gemodelleerde en gemeten ADCP-afvoer bij Tiel (zie Figuur D.102) is met name in het hoge bereik niet goed (standaarddeviatie van 71 m³/s over de hele periode). De Qh-afvoer geeft mogelijk een betere overeenkomst bij hoge afvoeren, maar presteert bij lage afvoeren juist slechter.

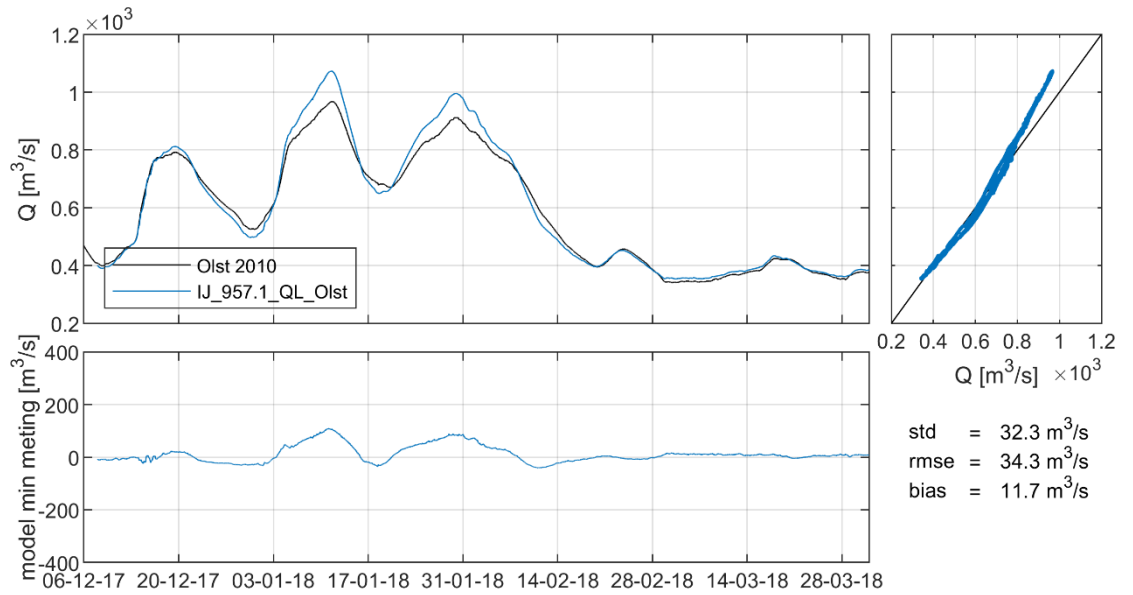
Bij **Olst** (Figuur D.116 en Figuur D.117) zijn de verschillen tussen model en Qh-relaties bij lage afvoeren klein, maar bij de drie pieken nemen de verschillen sterk toe. Met beide Qh-relaties wordt de vorm van de pieken heel anders ingeschat dan in het model. De Qh-relatie uit 2013 heeft wel een beduidend betere overeenkomst met het model in het middelhoge en hoge afvoerbereik. Als we kijken naar de ADCP-metingen tijdens het hoogwater (zie Figuur D.110) blijkt dat de gemodelleerde afvoer bij Olst hier goed mee overeenkomt. De afvoer op basis van de Qh-relaties is hier dus te laag.



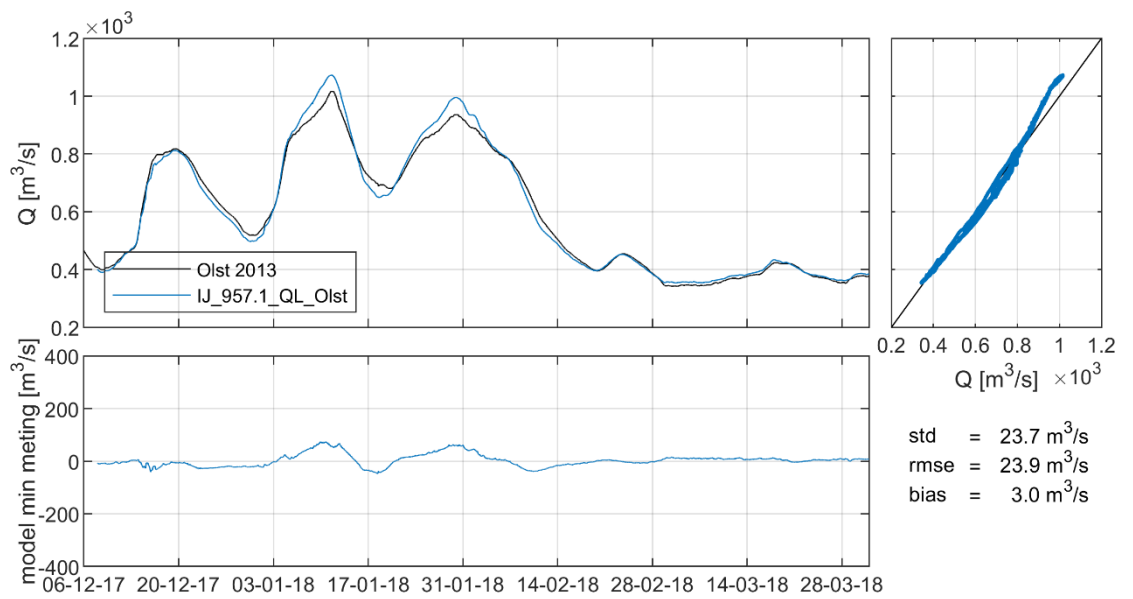
Figuur D.114 Afvoer Tiel Qh 2010.



Figuur D.115 Afvoer Tiel Qh 2013.



Figuur D.116 Afvoer Olst Qh 2010.



Figuur D.117 Afvoer Olst Qh 2013.

E Validatieresultaten SOBEK

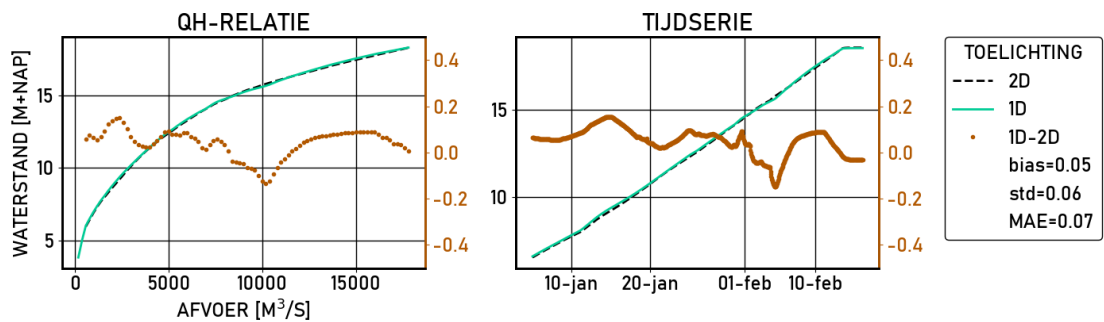
E.1 Waterstanden LMW-stations

E.1.1 Afleringsom; vergelijking met 2D

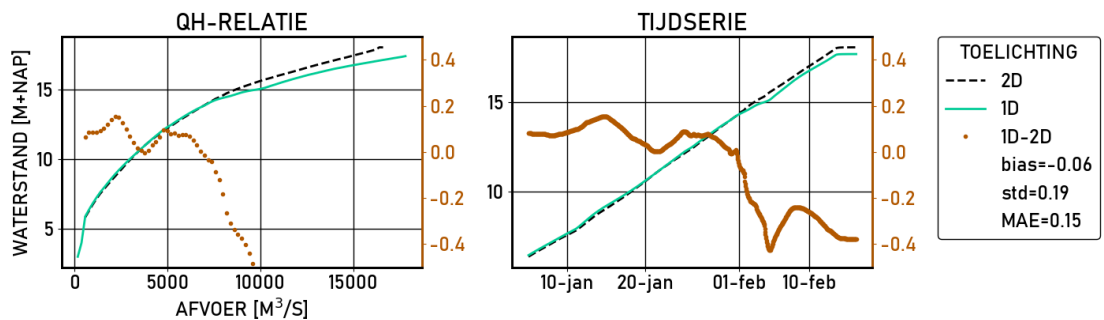
Deze figuren laten de vergelijking zien van de afleringsom: een monotoon stijgende afvoer van laag tot extreem hoog. We tonen zowel de QH relatie per station, als de tijdserie van de afleringsom. Let op, dit is dus niet de tijdserie van de validatie 2018, die vanaf bijlage E.1.2 wordt getoond.

E.1.1.1. Bovenrijn-Waal

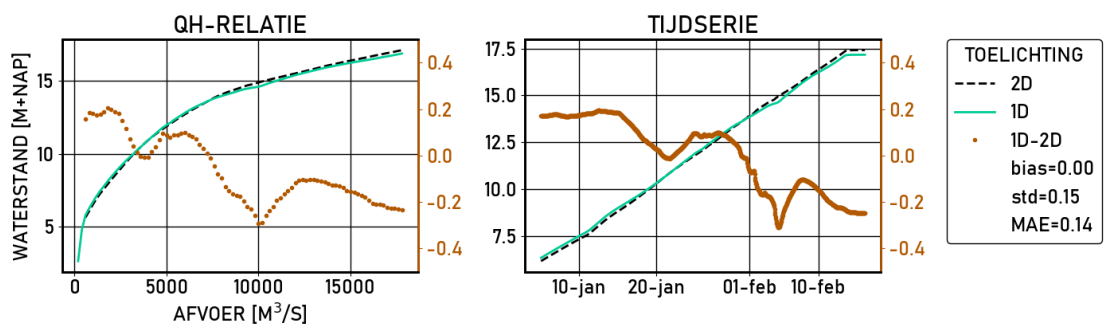
BR_862.2_R_LMW-H_Lobith



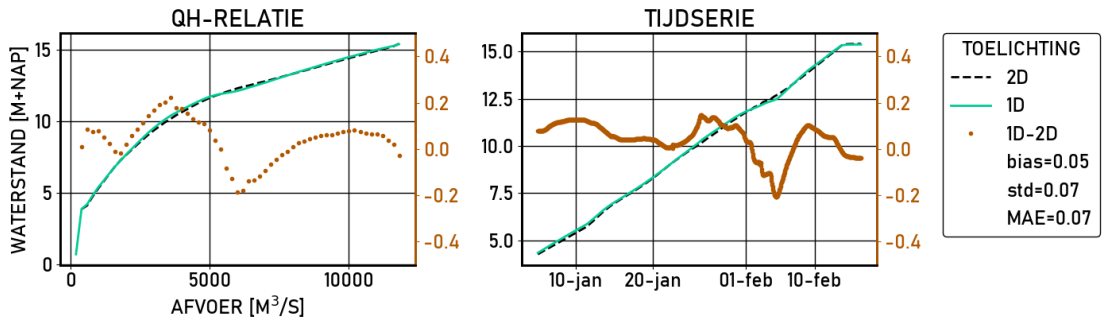
BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven



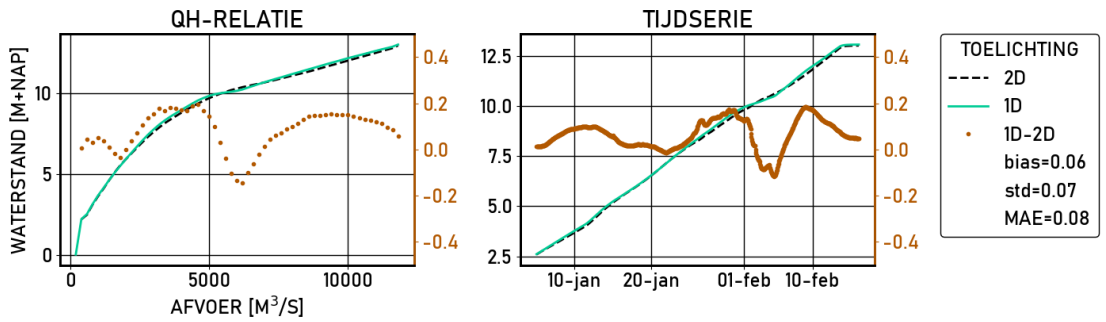
BR_867.2_L_LMW-H_Pannerdensche-kop



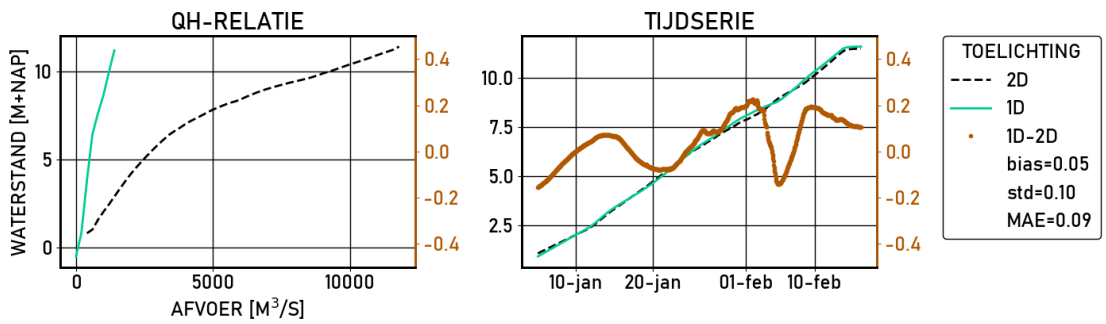
WL_884.9_L_LMW-H_Nijmegen-haven



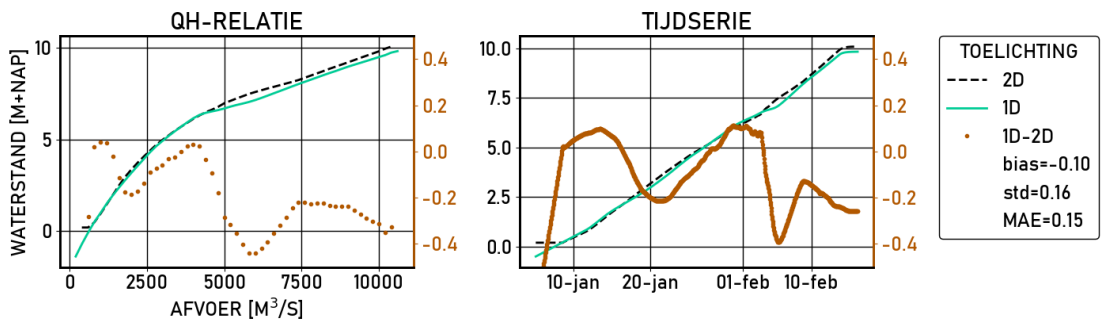
WL_901.4_R_LMW-H_Dodewaard



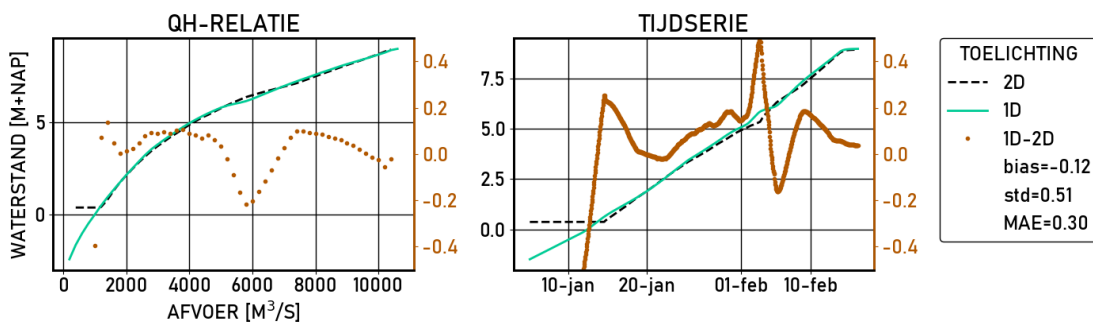
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal



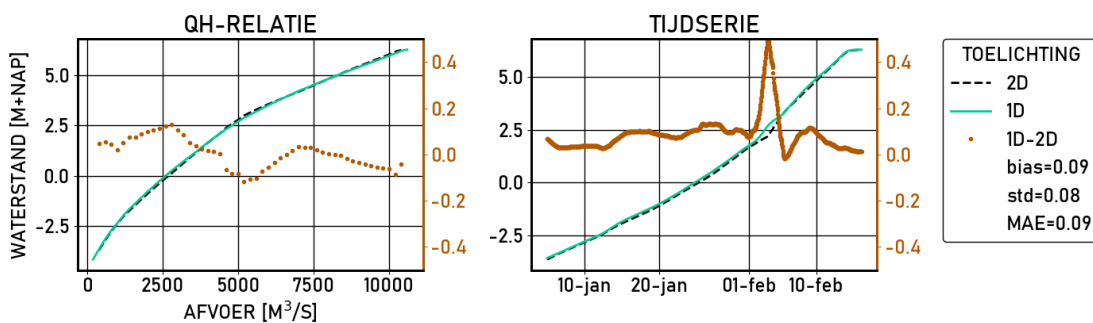
WL_926.1_L_LMW-H_Sint-Andries-Waal-g6



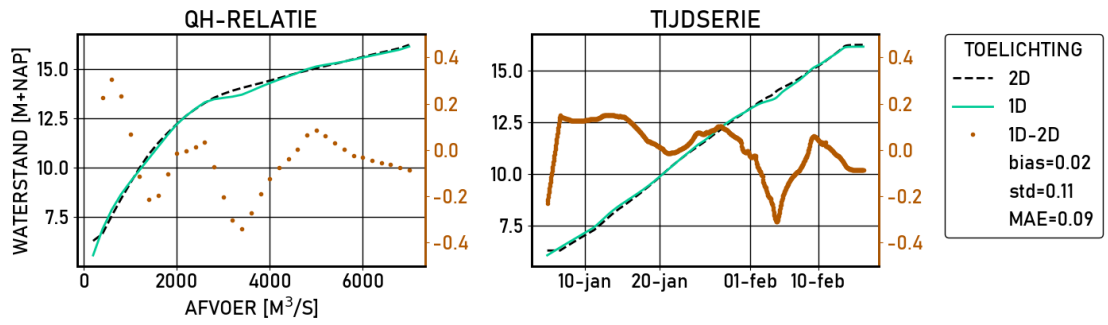
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel



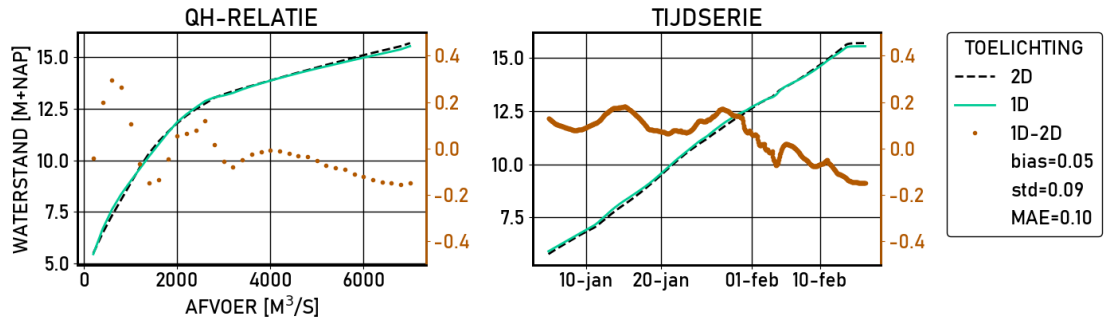
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren



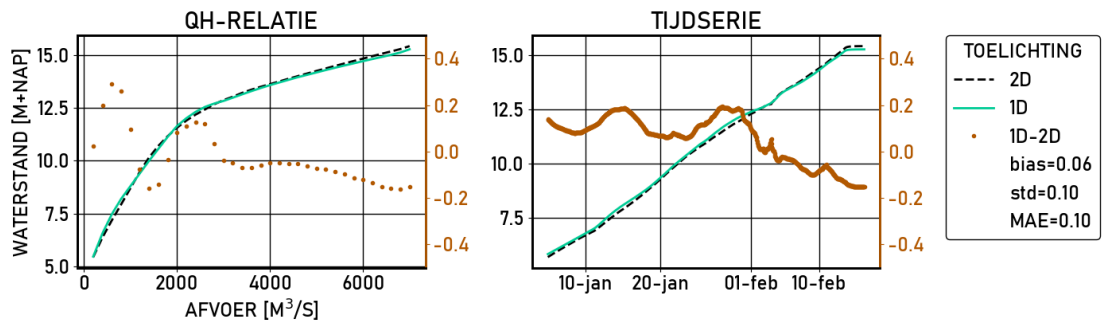
E.1.1.2. Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek
 PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden



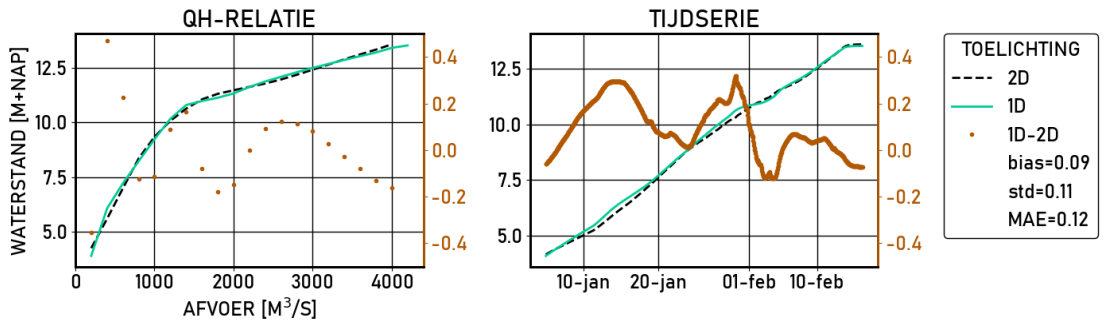
PK_876.4_L_LMW-H_Looveer-g6



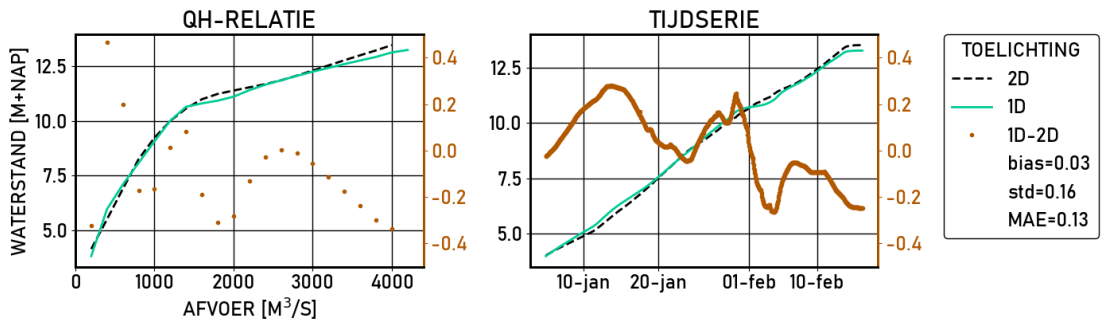
PK_878.5_R_LMW-H_IJsselkop



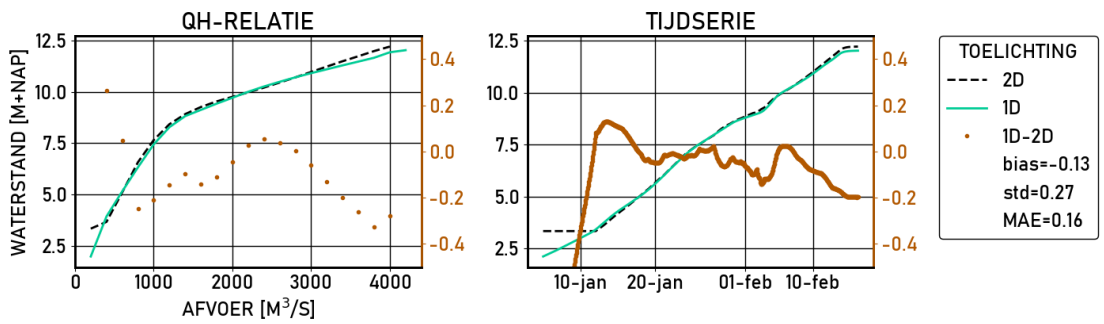
NR_891.2_R_LMW-H_Driel-boven



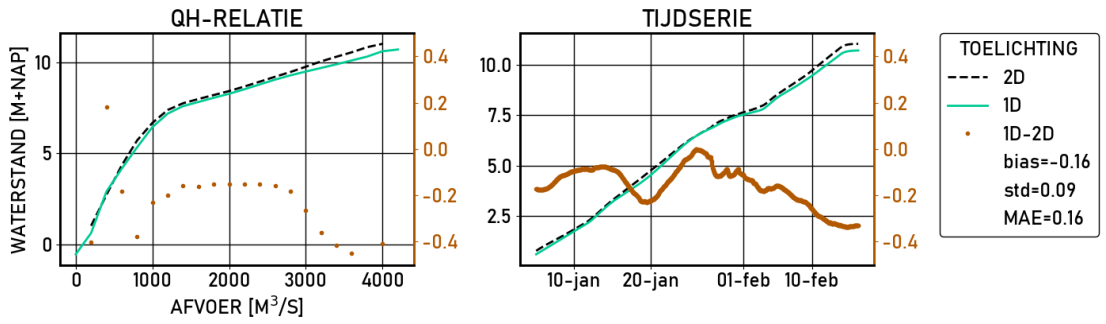
NR_891.7_R_LMW-H_Driel-beneden



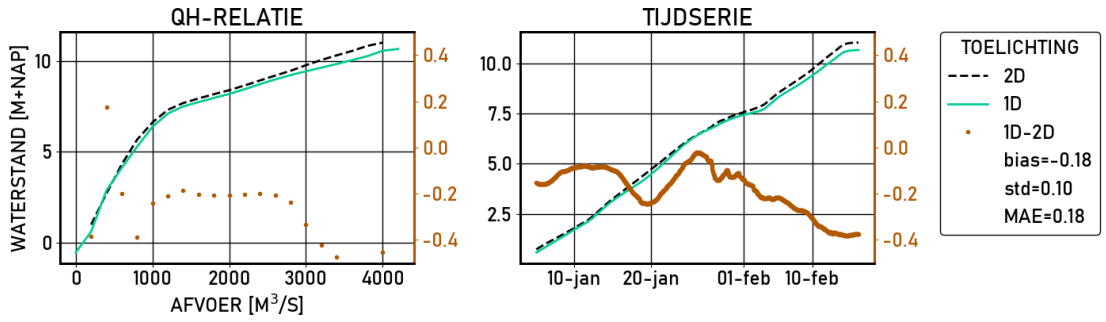
NR_908.1_L_LMW-H_Grebbe



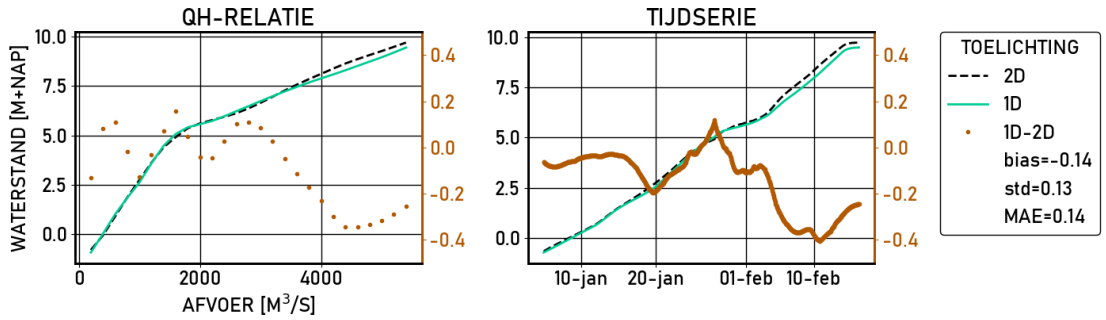
NR_922.0_R_LMW-H_Amerongen-boven



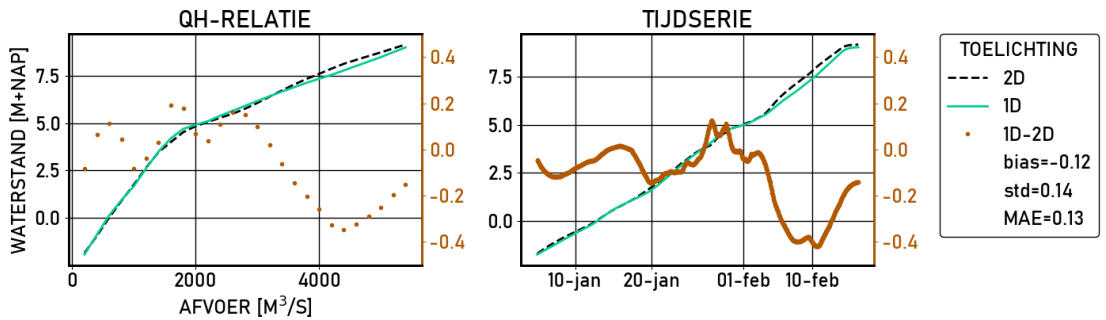
NR_922.5_R_LMW-H_Amerongen-beneden



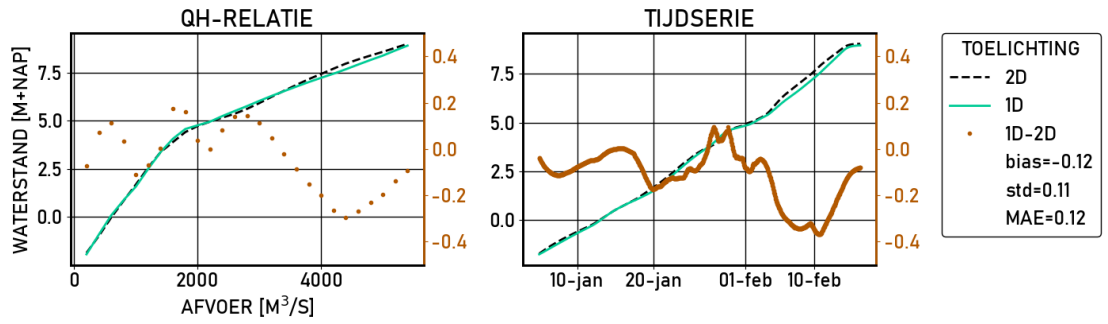
LE_939.8_L_LMW-H_Culemborg-brug



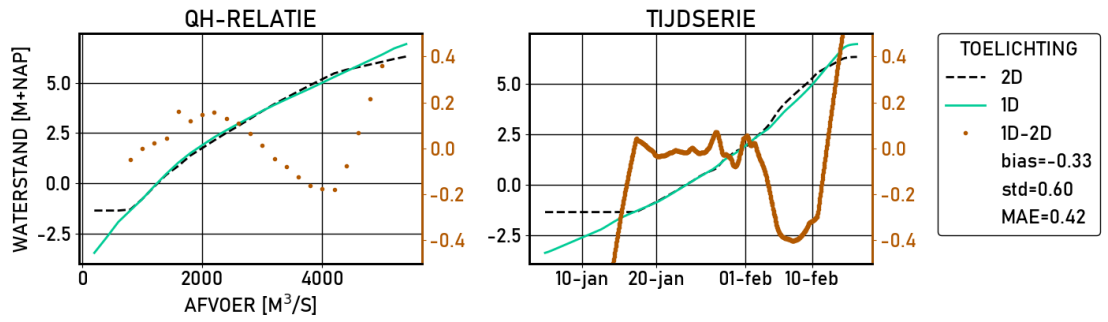
LE_946.6_R_LMW-H_Hagestein-boven



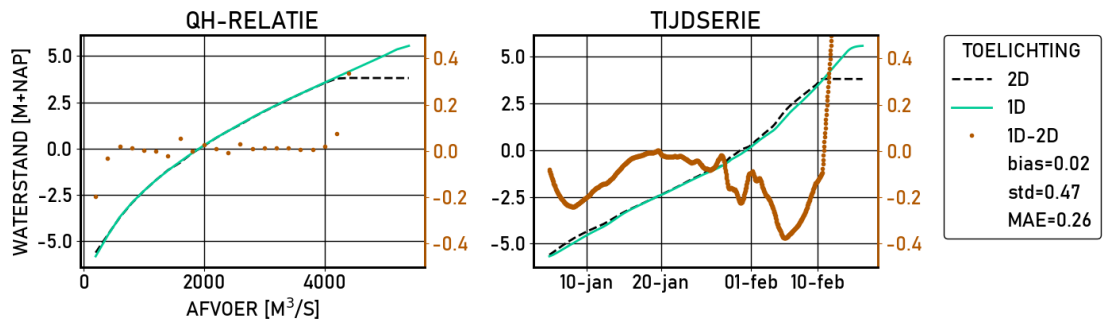
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden



LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven

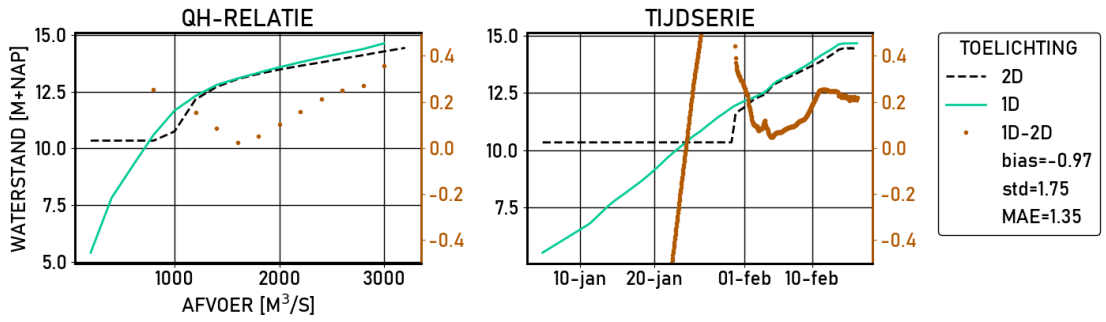


LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-aan-de-Lek-g6

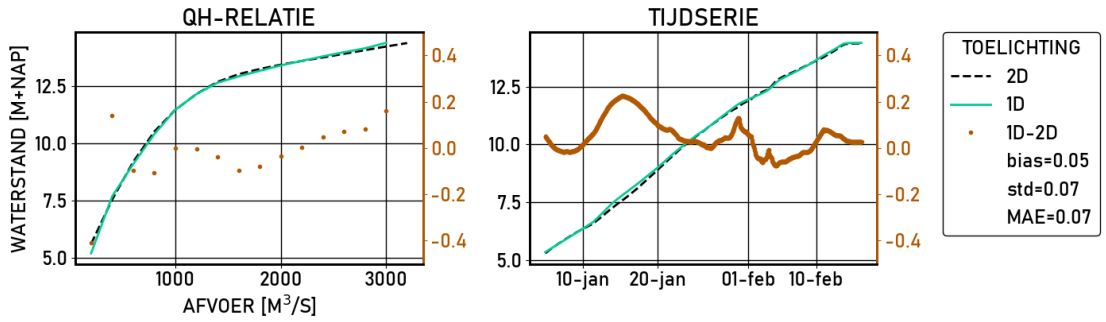


E.1.1.3. IJssel

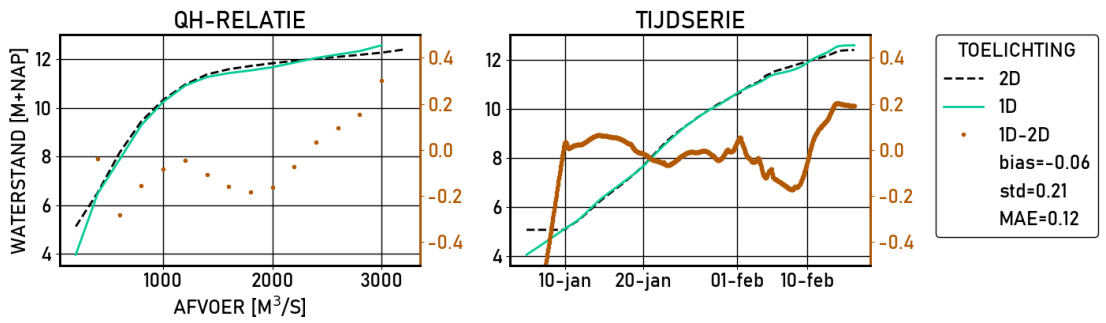
IJ_879.6_R_LMW-H_Hondsbroeksche-Pleij-IJ



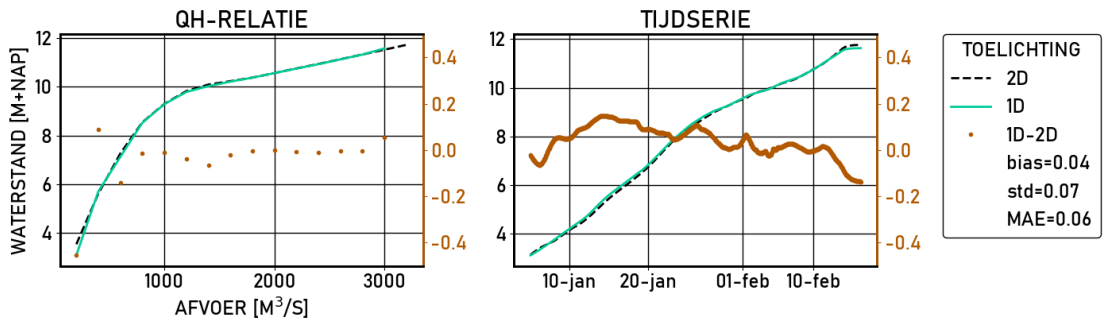
IJ_881.1_R_LMW-H_Westervoort-IJsseldijke



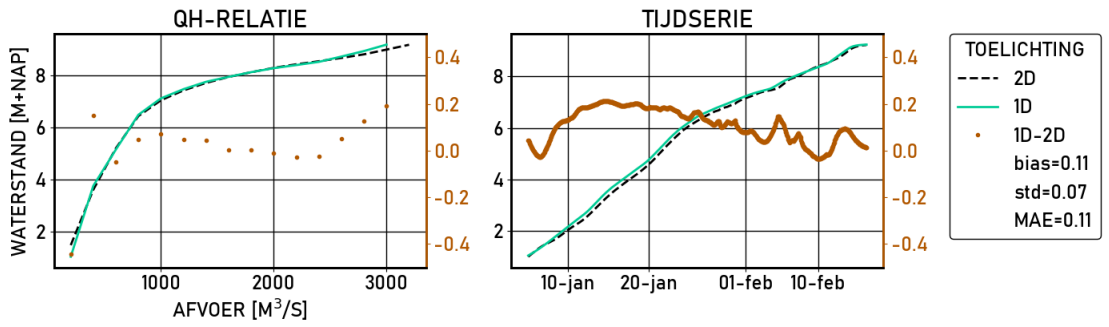
IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg



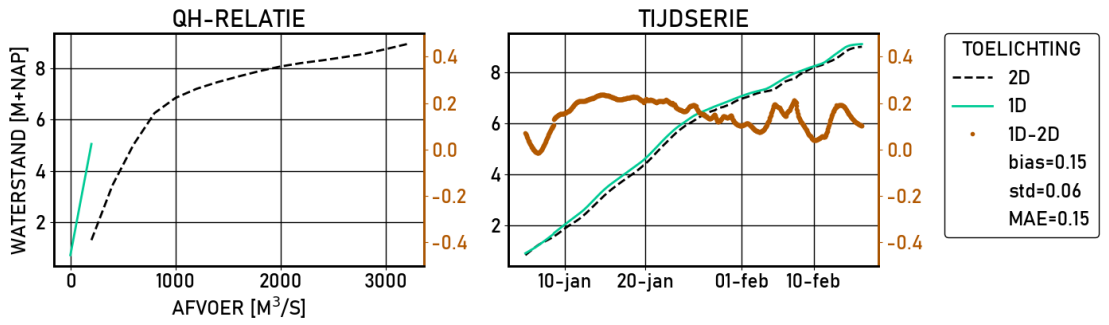
IJ_903.0_R_LMW-H_Doesburg-brug



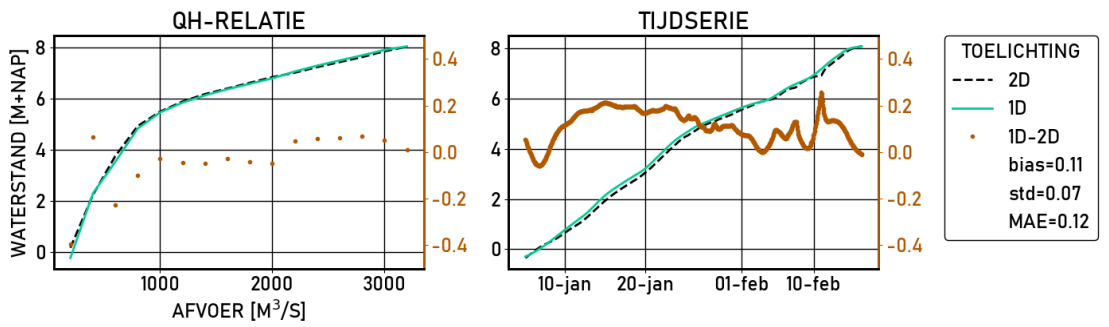
IJ_929.3_L_LMW-H_Zutphen-noord



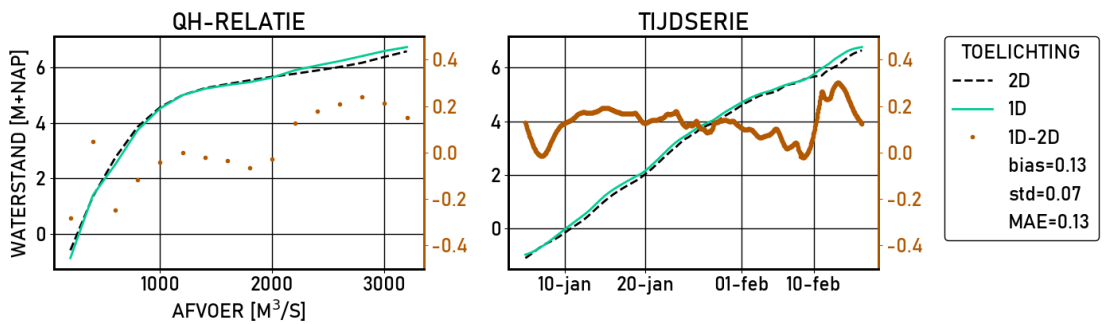
IJ_931.2_R_LMW-H_Eefde-beneden



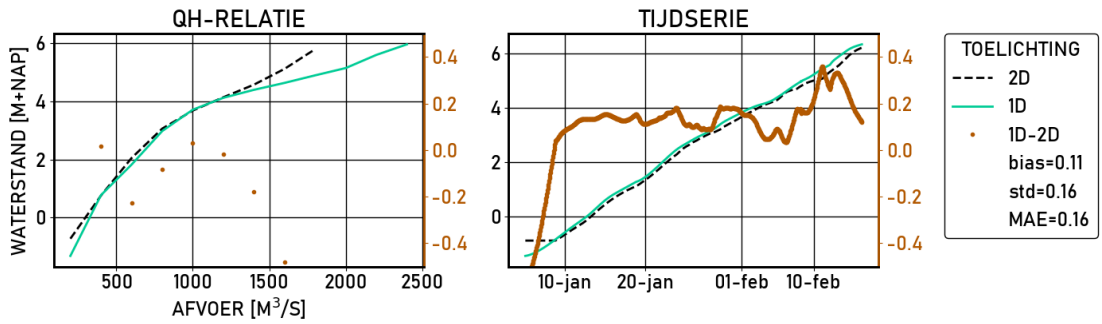
IJ_945.0_R_LMW-H_Deventer



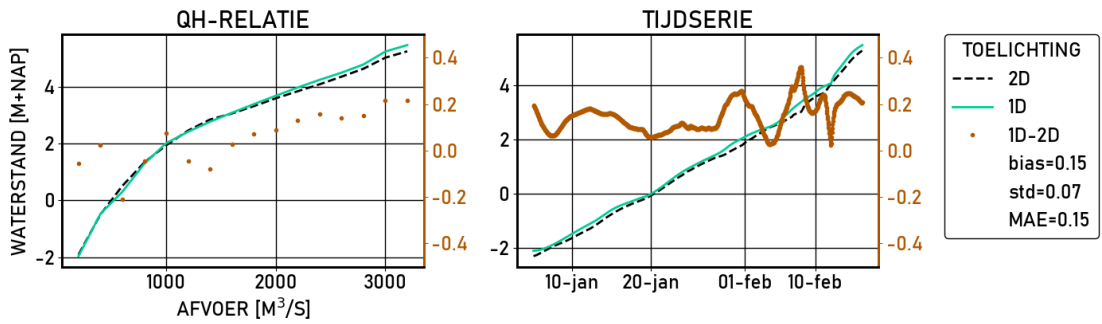
IJ_957.1_R_LMW-H_Olst



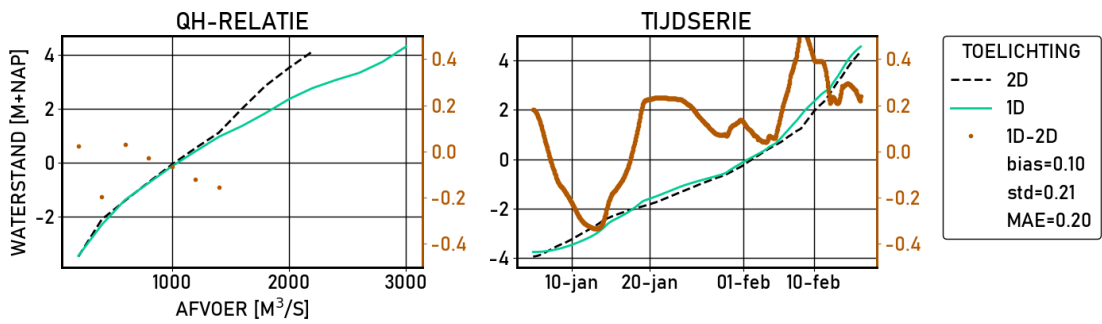
IJ_965.2_R_LMW-H_Wijhe



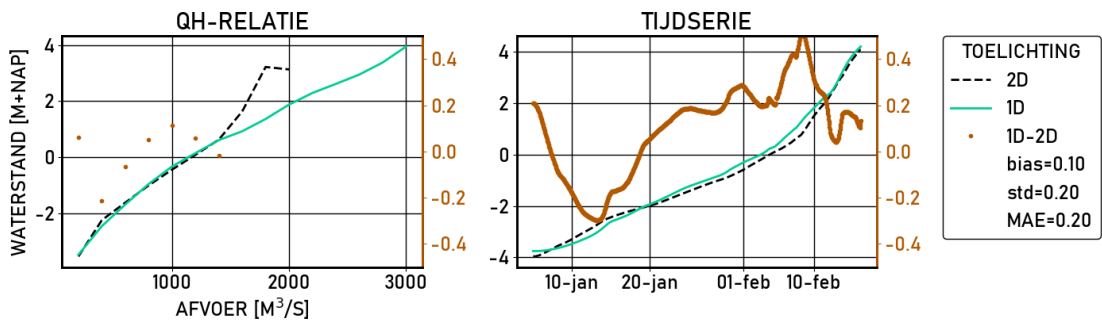
IJ_980.8_R_LMW-H_Katerveer



IJ_994.5_L_LMW-H_Kampen-bovenhaven



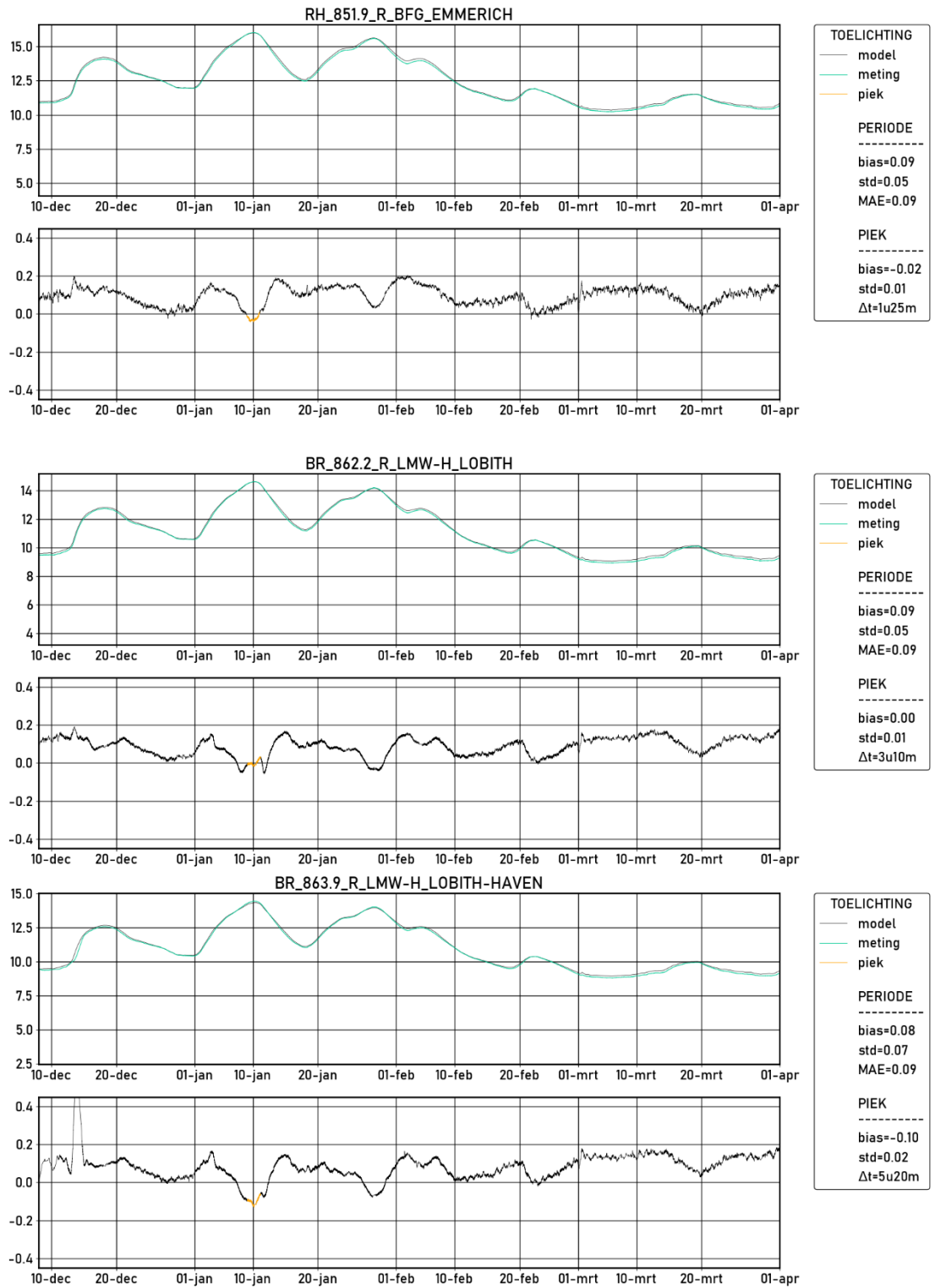
IJ_1001.3_L_LMW-H_Keteldiep

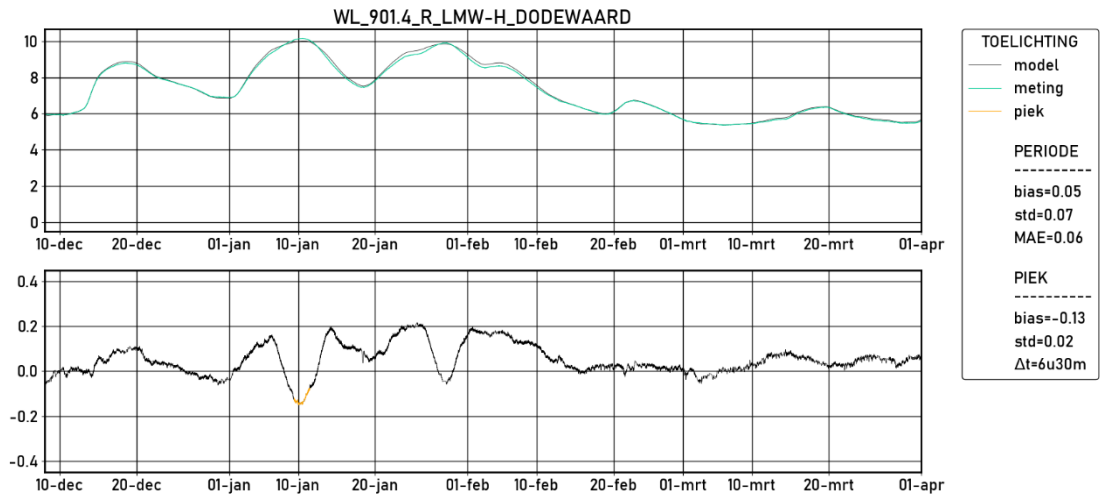
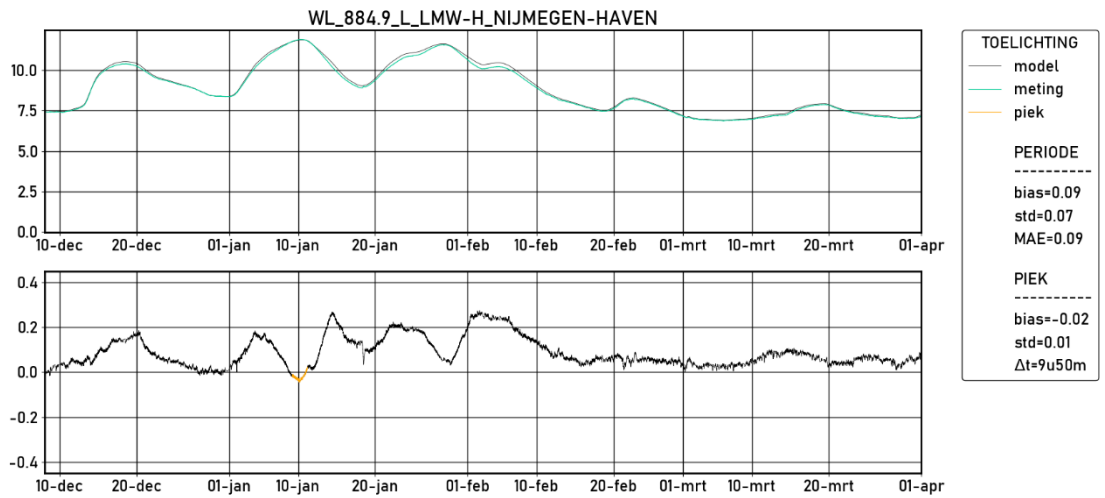
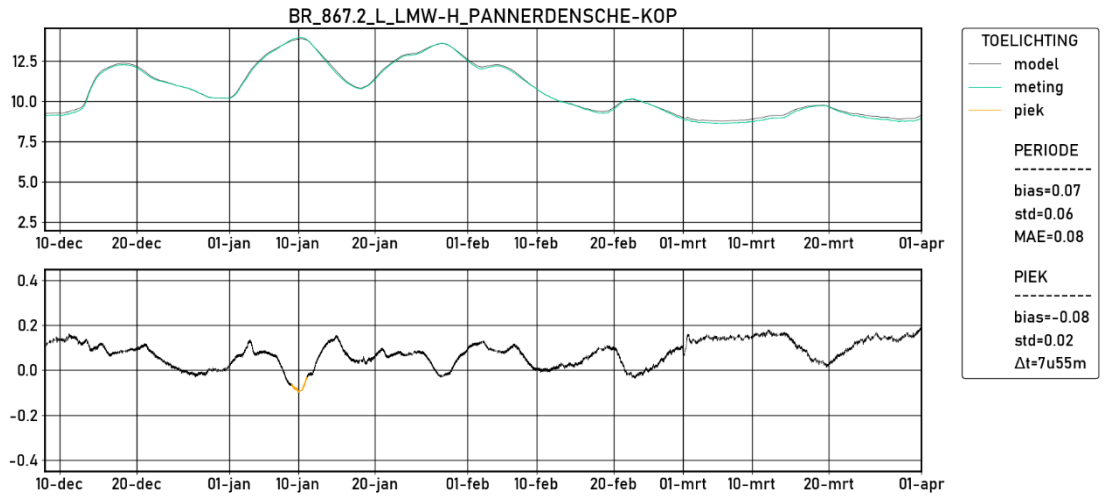


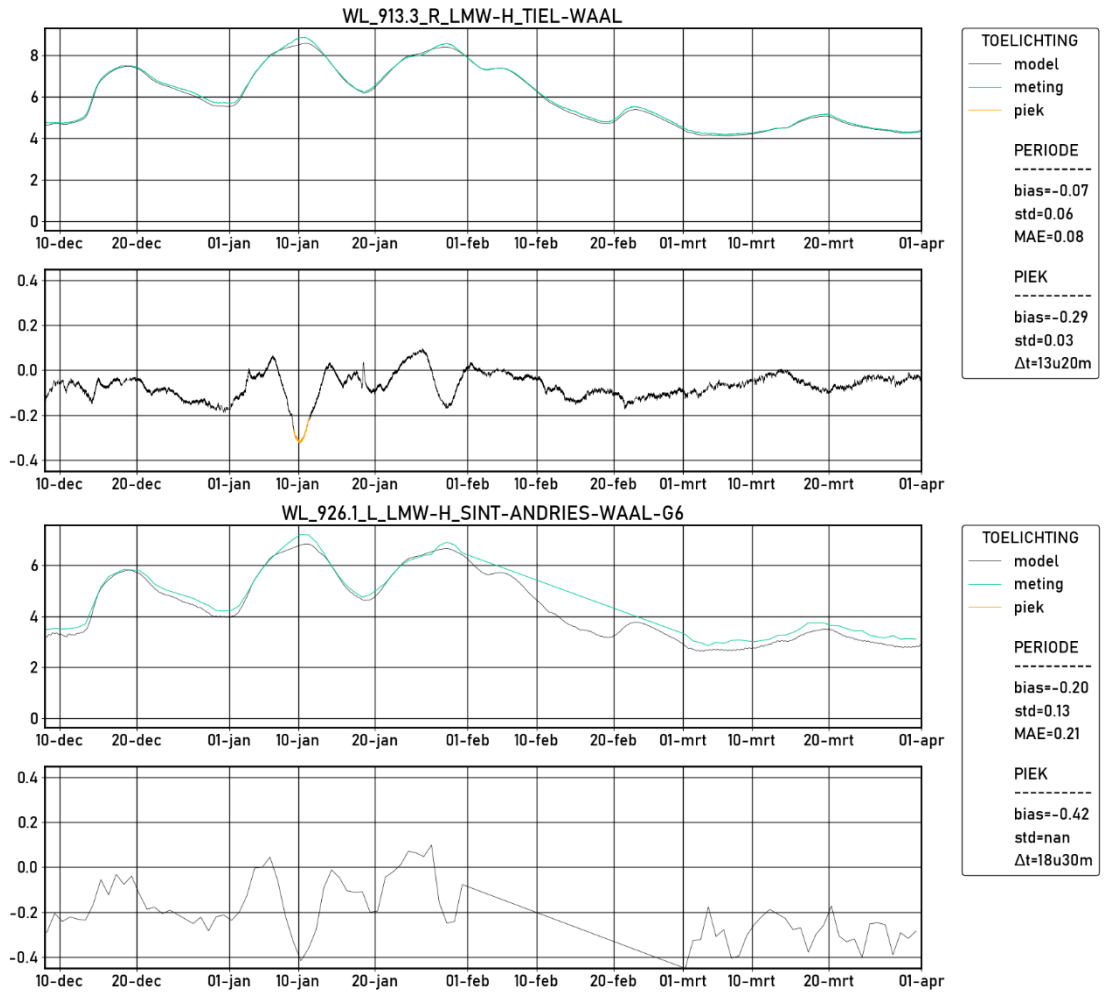
E.1.2 Validatieperiode 8 december 2017 tot 1 april 2018

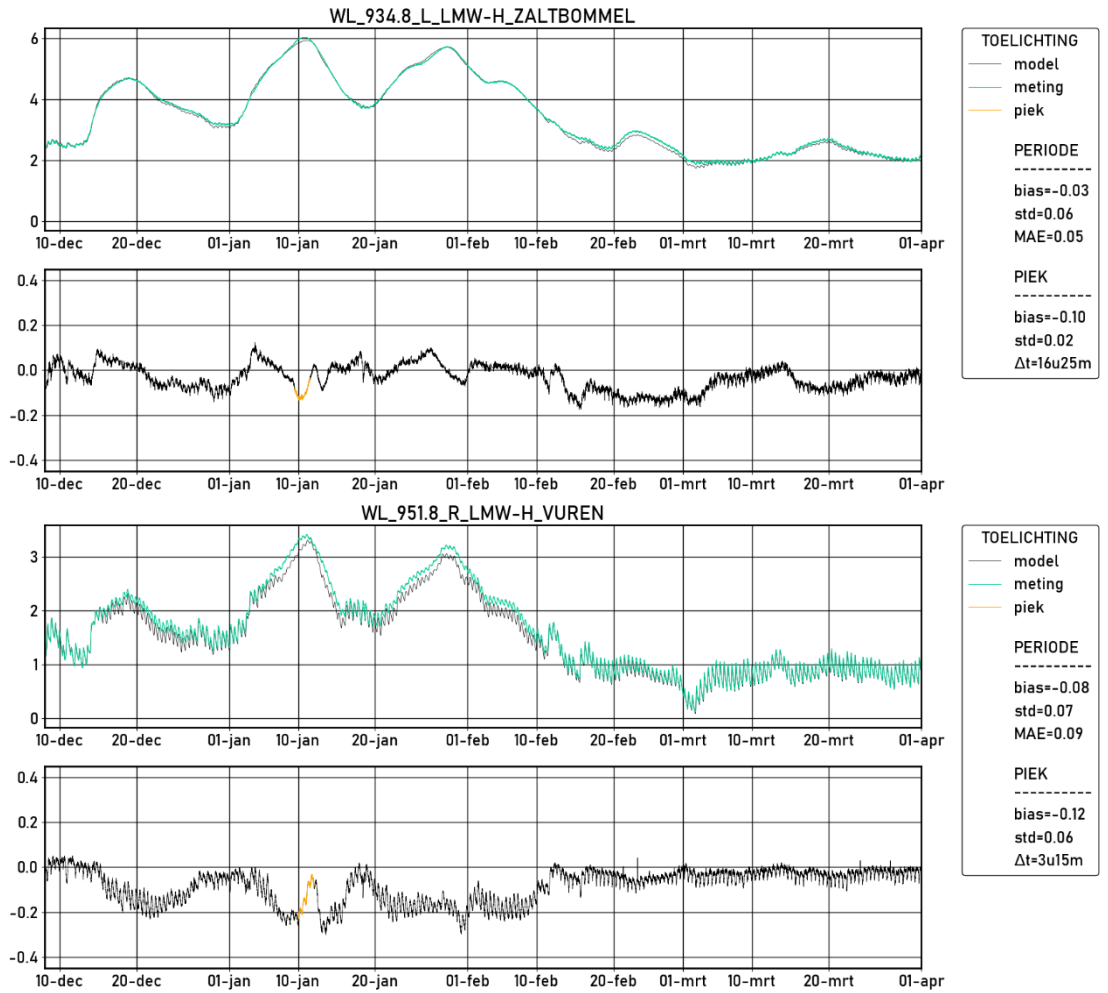
Het venster van 2 dagen rond de piek waarvoor aparte statistieken zijn bepaald is steeds in oranje gemarkeerd in de verschillijnen.

E.1.2.1. Bovenrijn-Waal

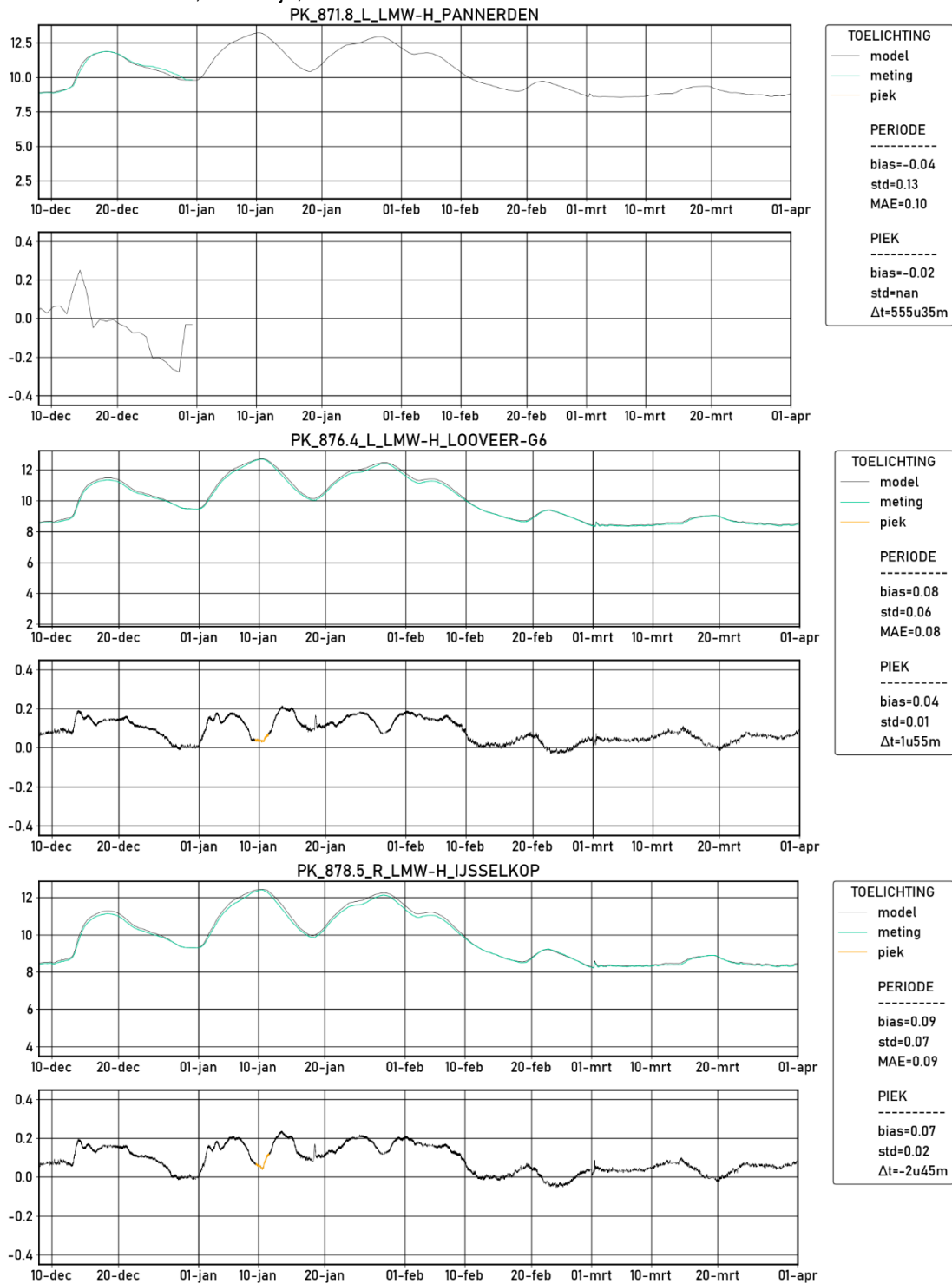


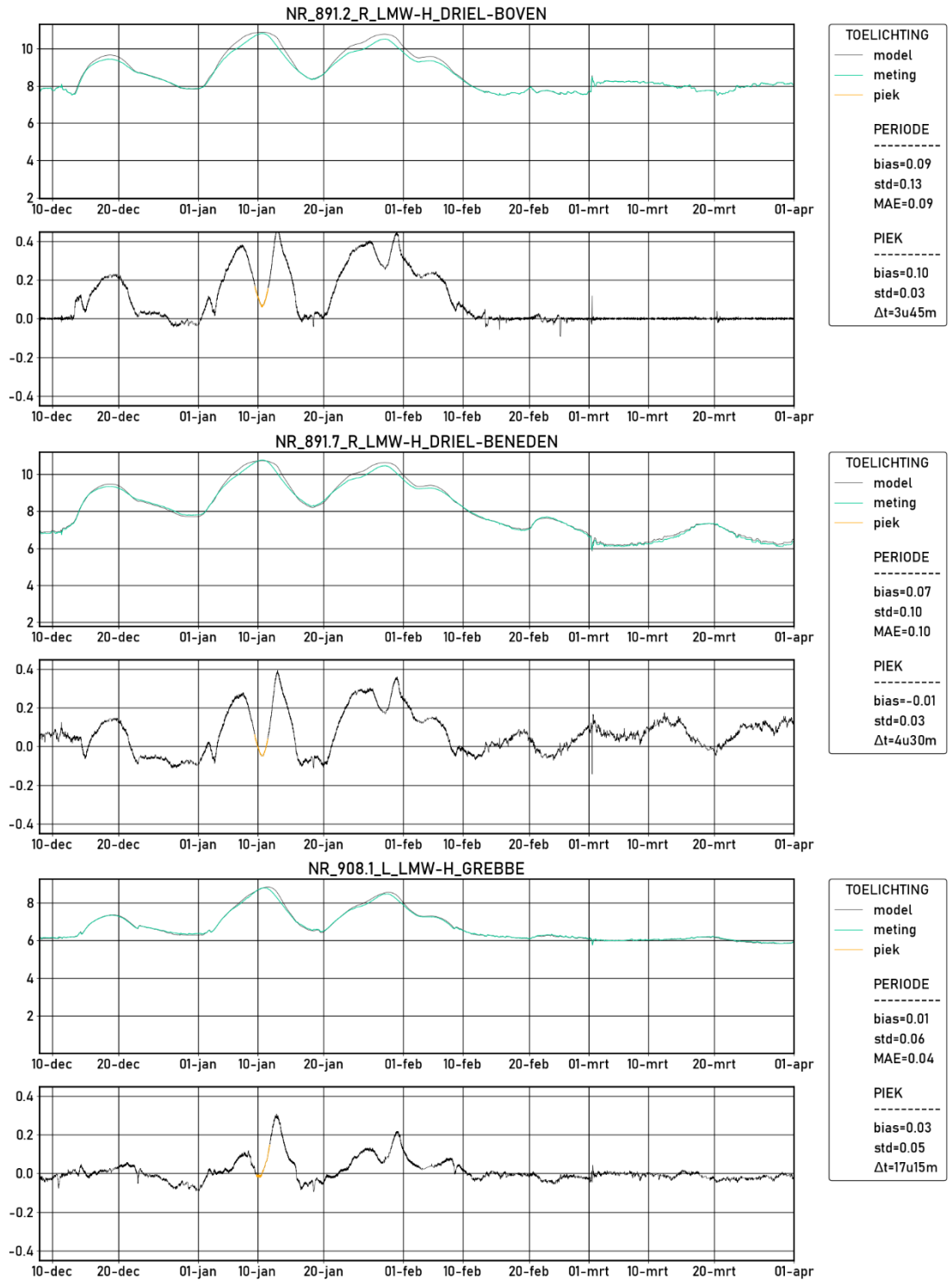


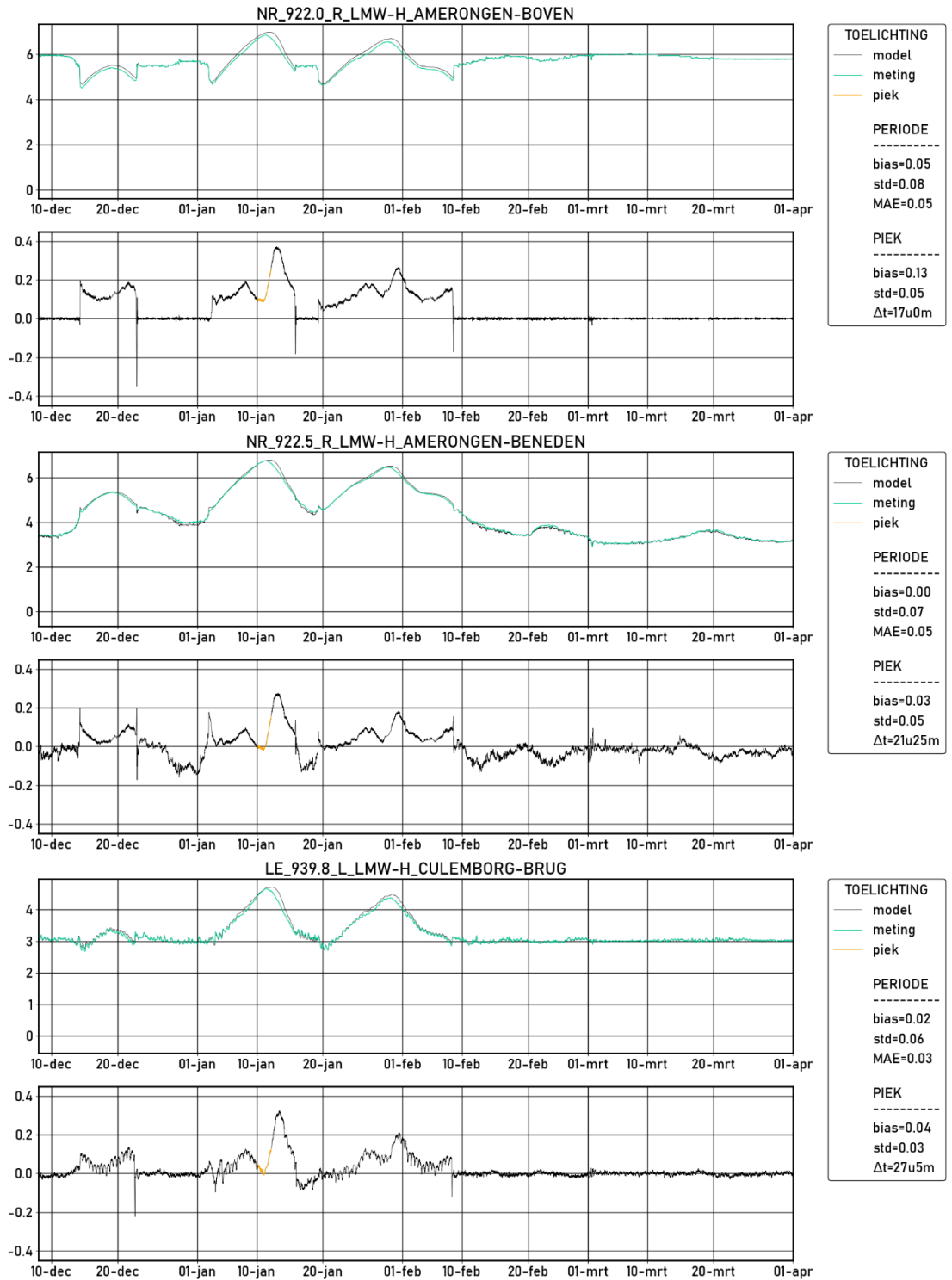


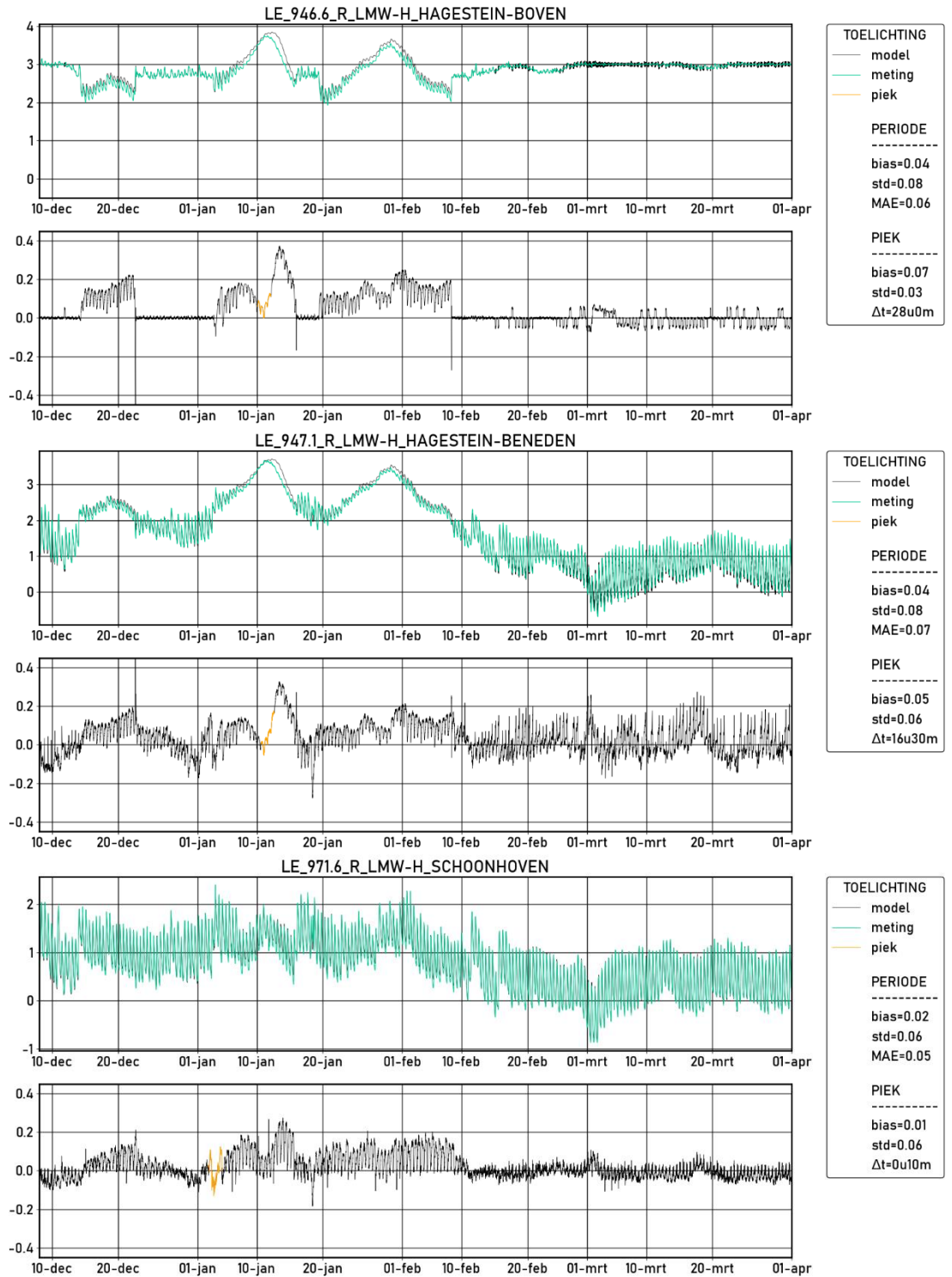


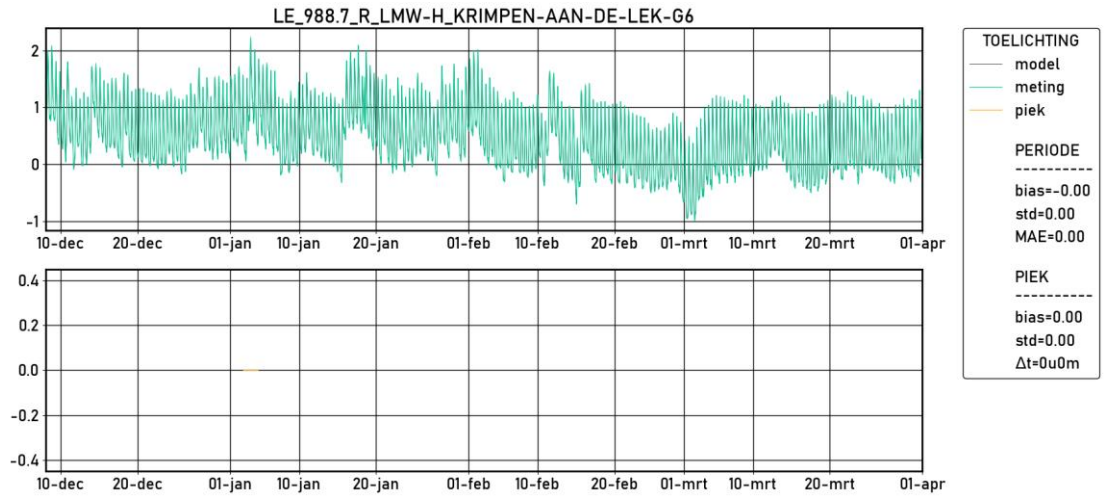
E.1.2.2. Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek



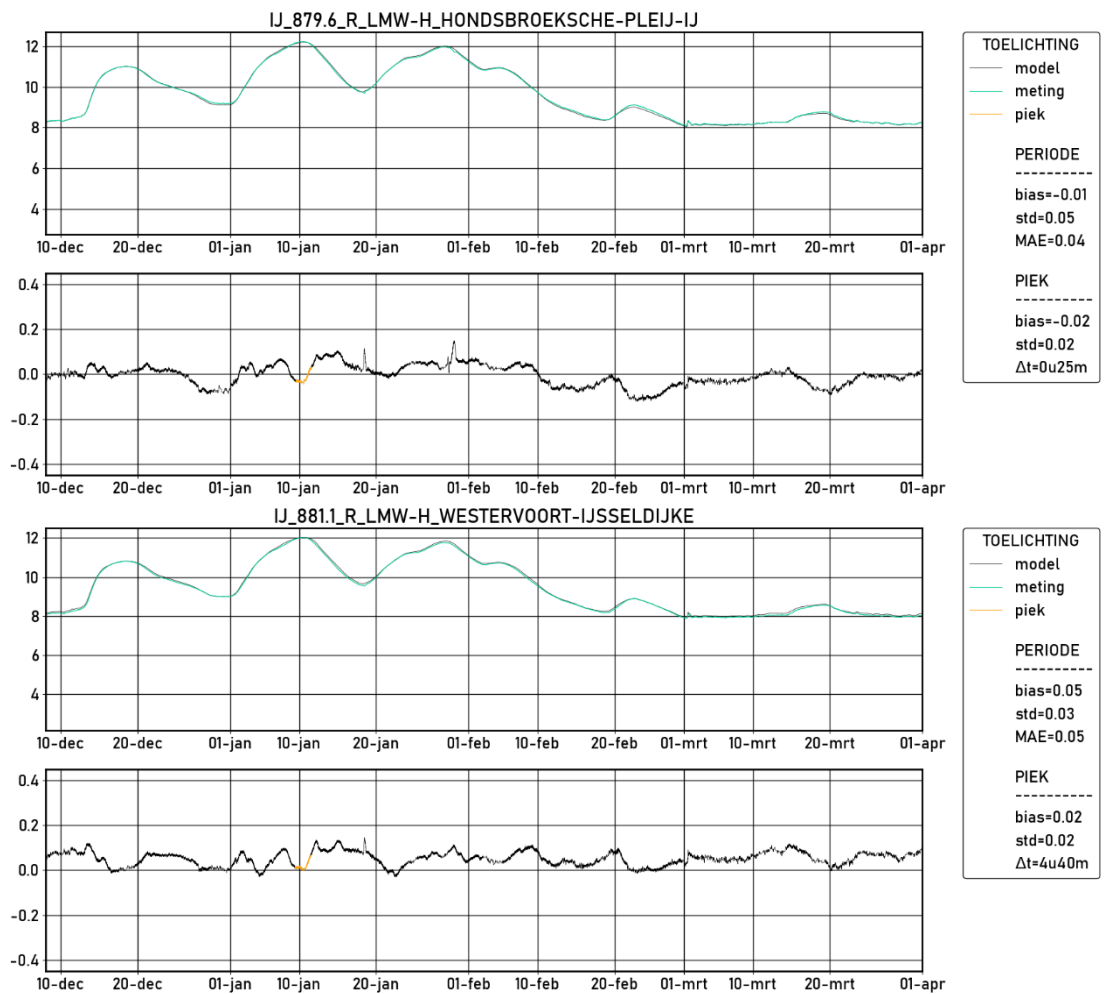


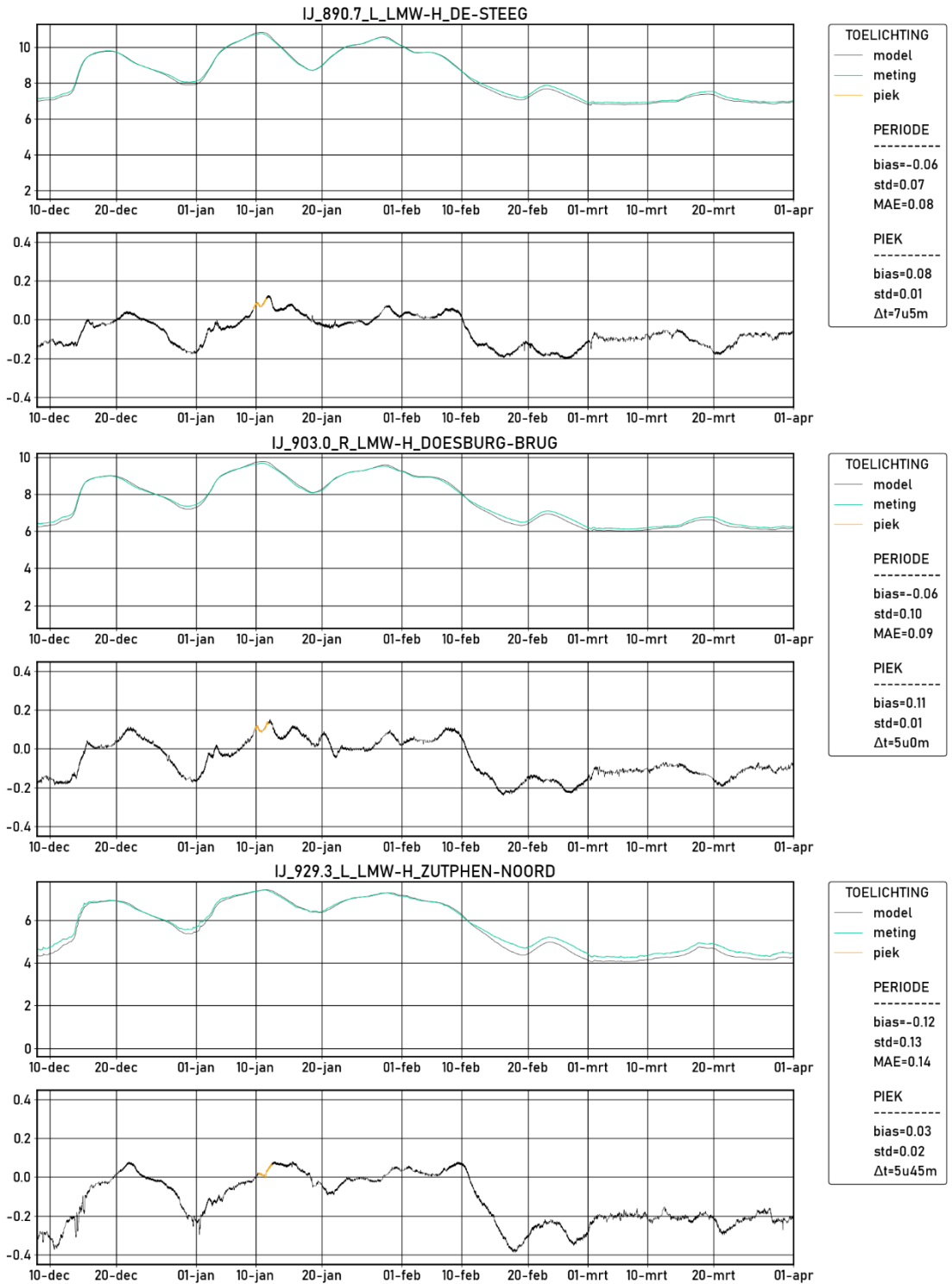


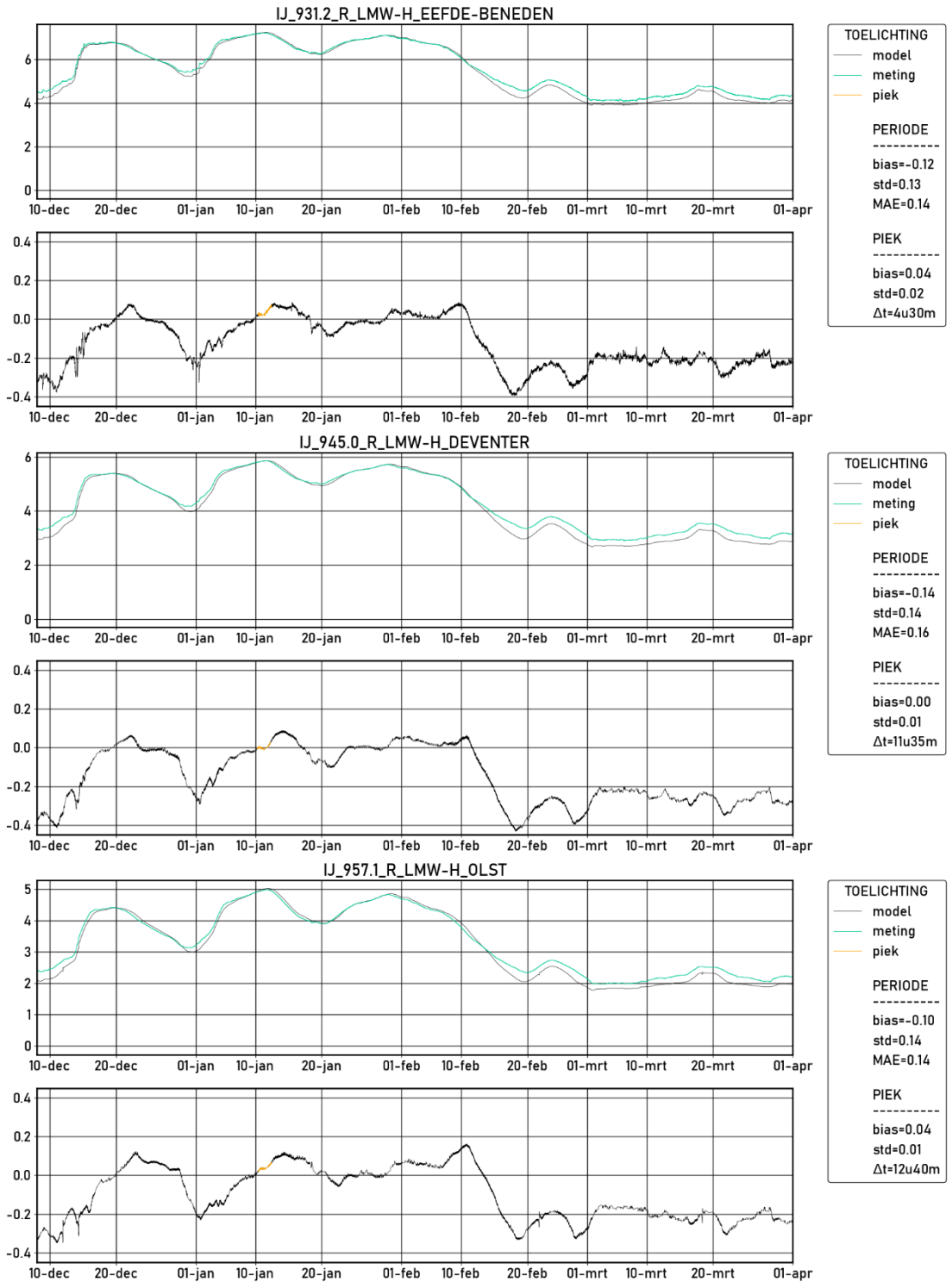


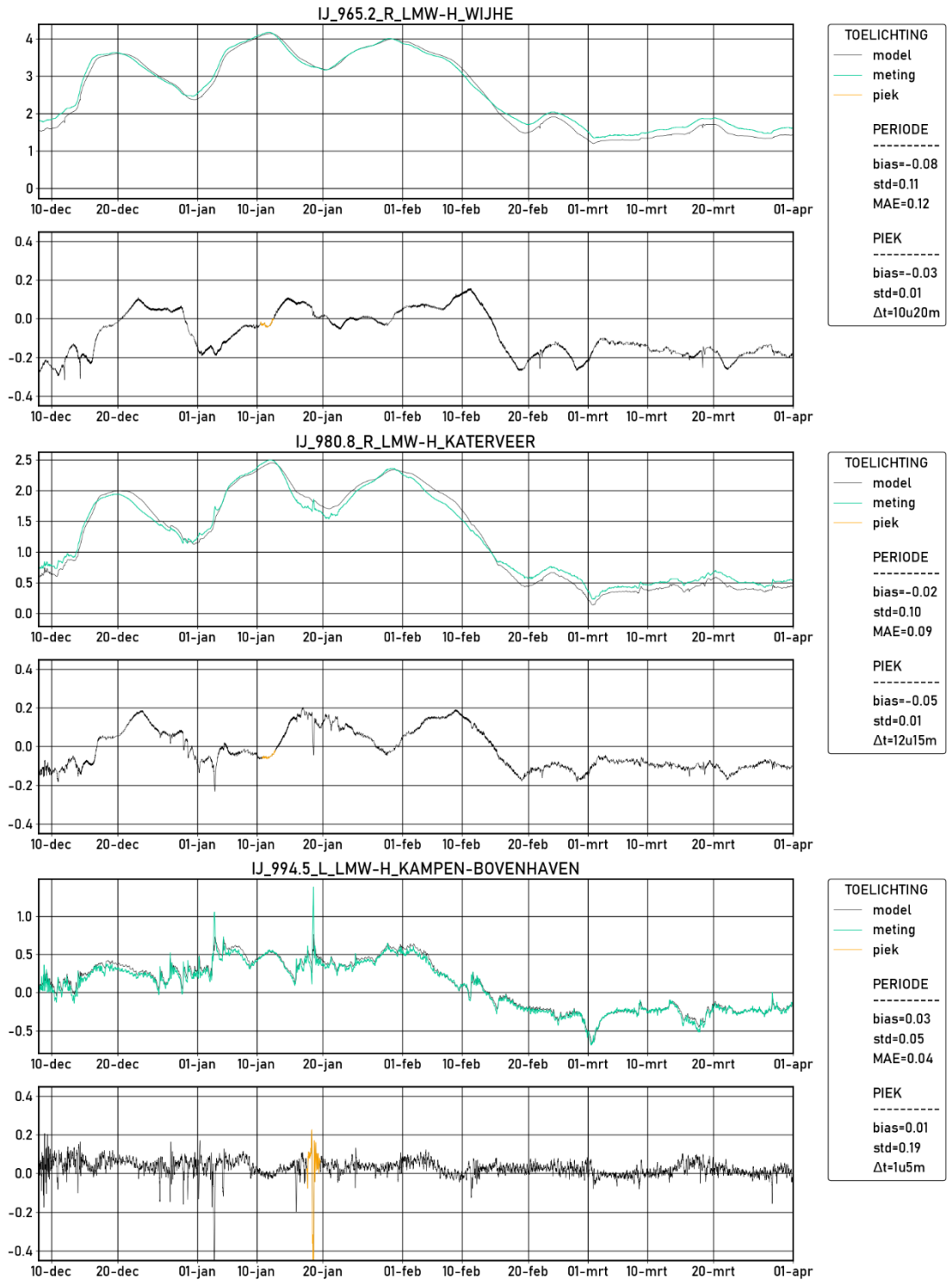


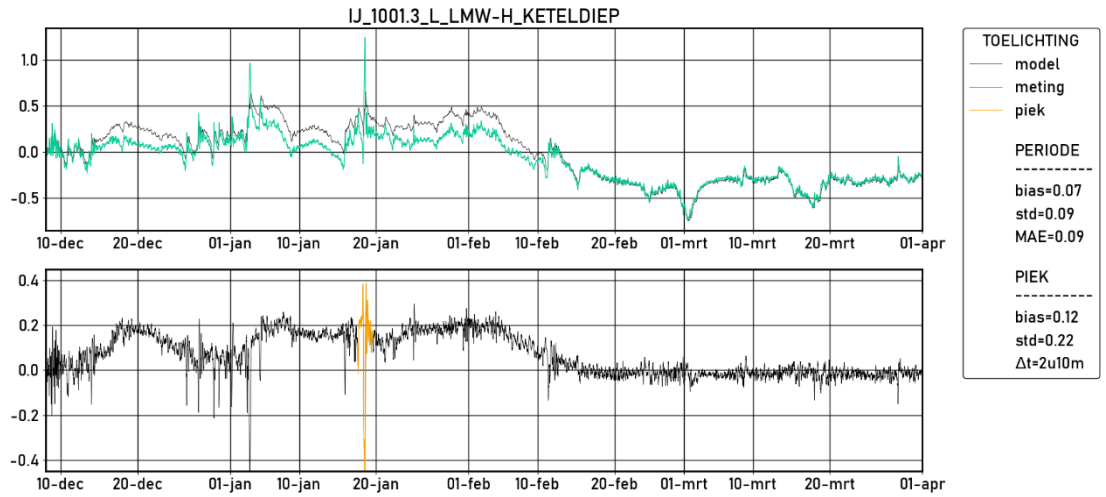
E.1.2.3. IJssel





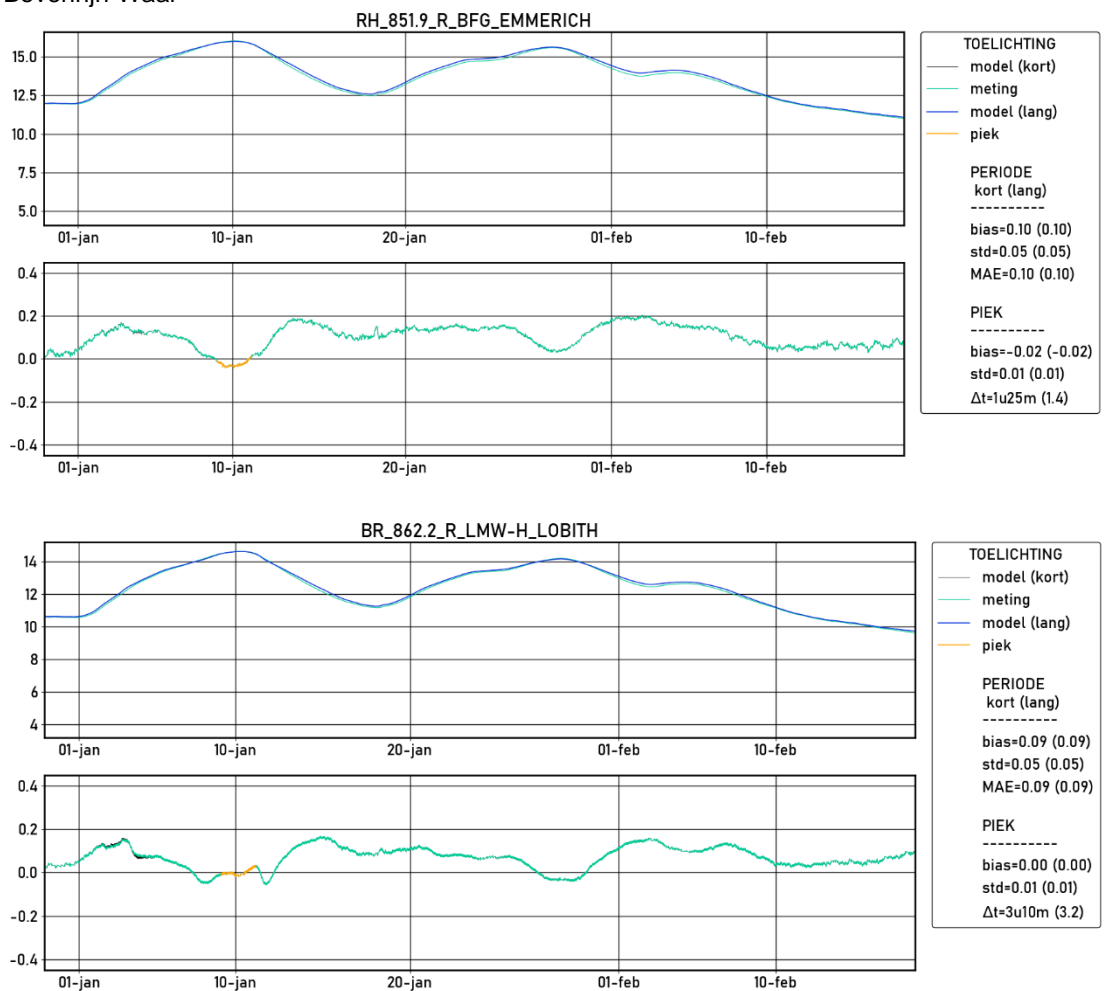


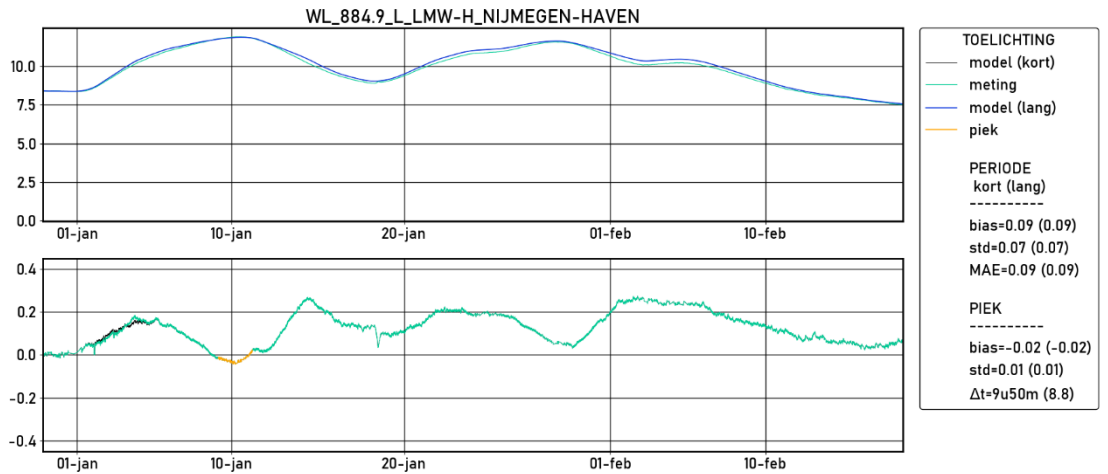
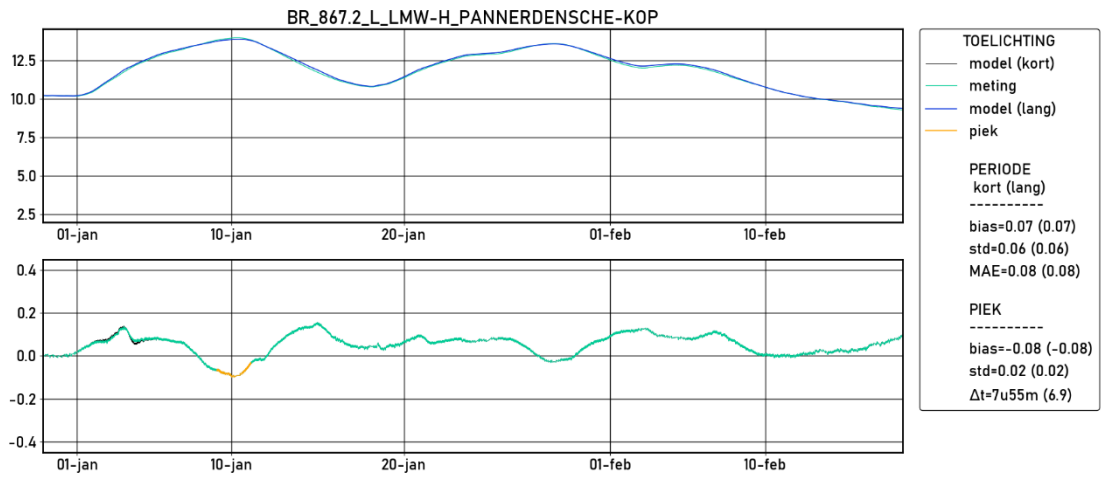
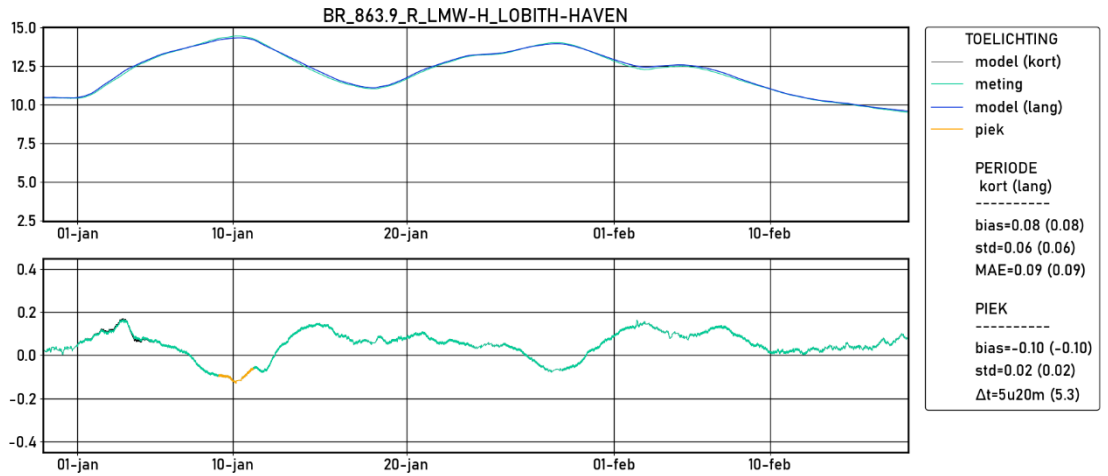


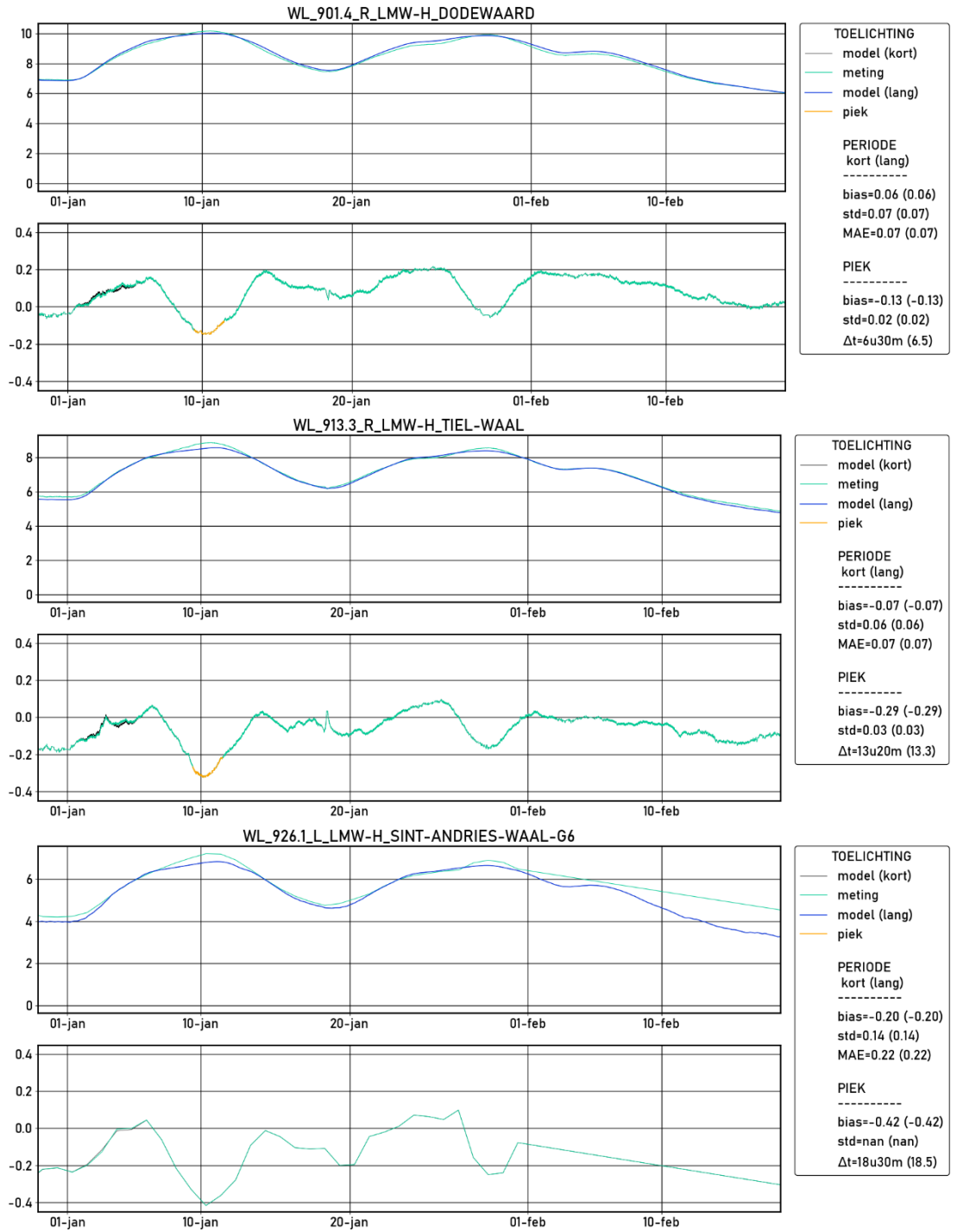


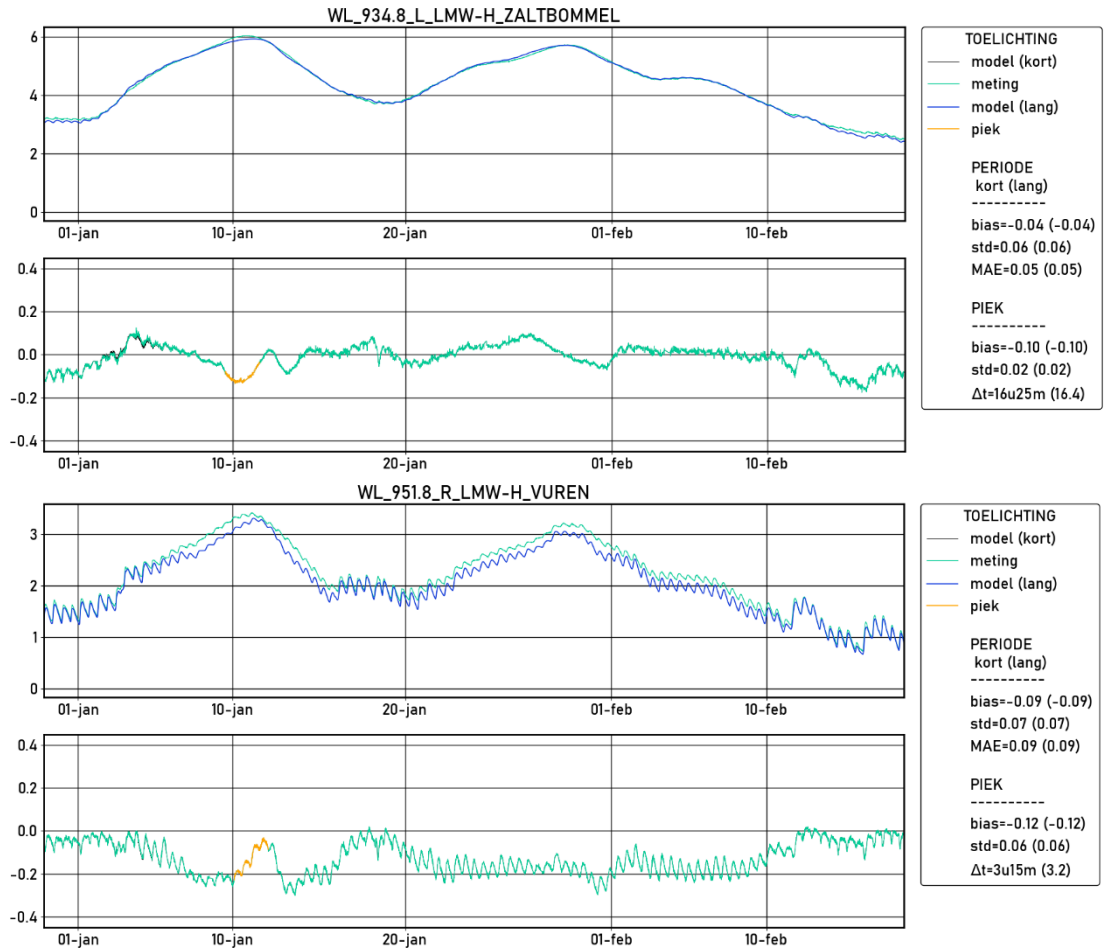
E.1.3 Vergelijking validaties periode 31 december 2017 tot 18 februari 2018

E.1.3.1. Bovenrijn-Waal

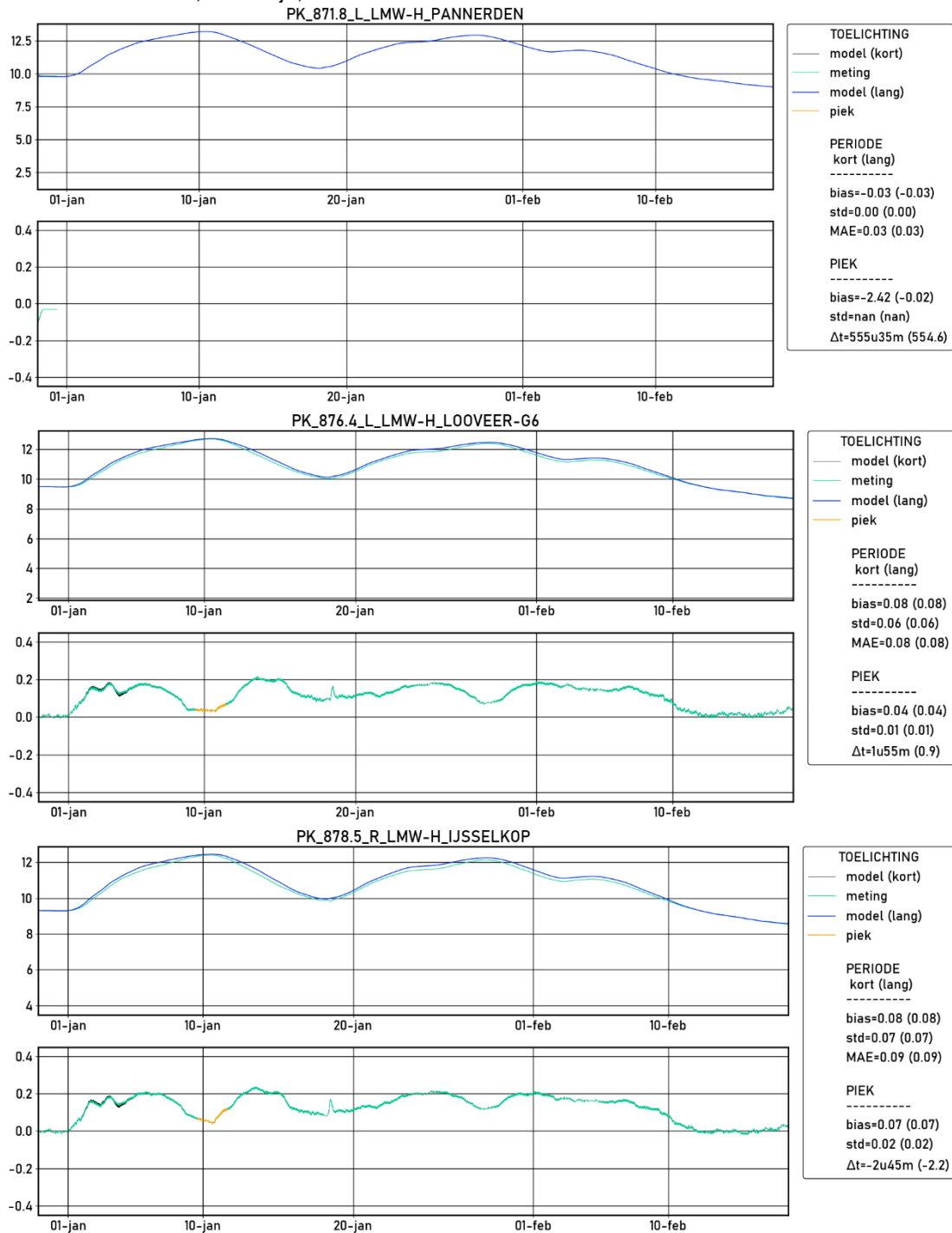


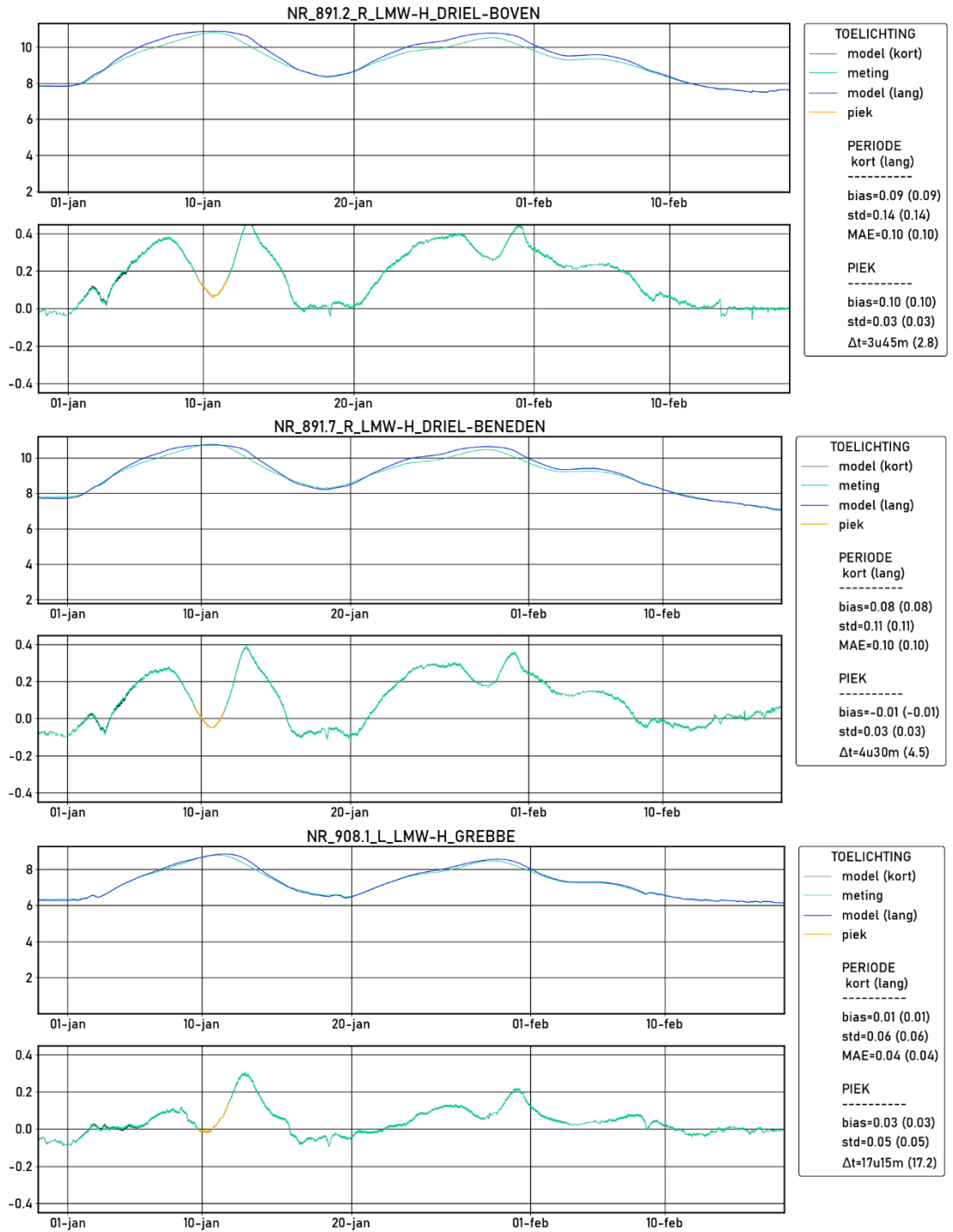


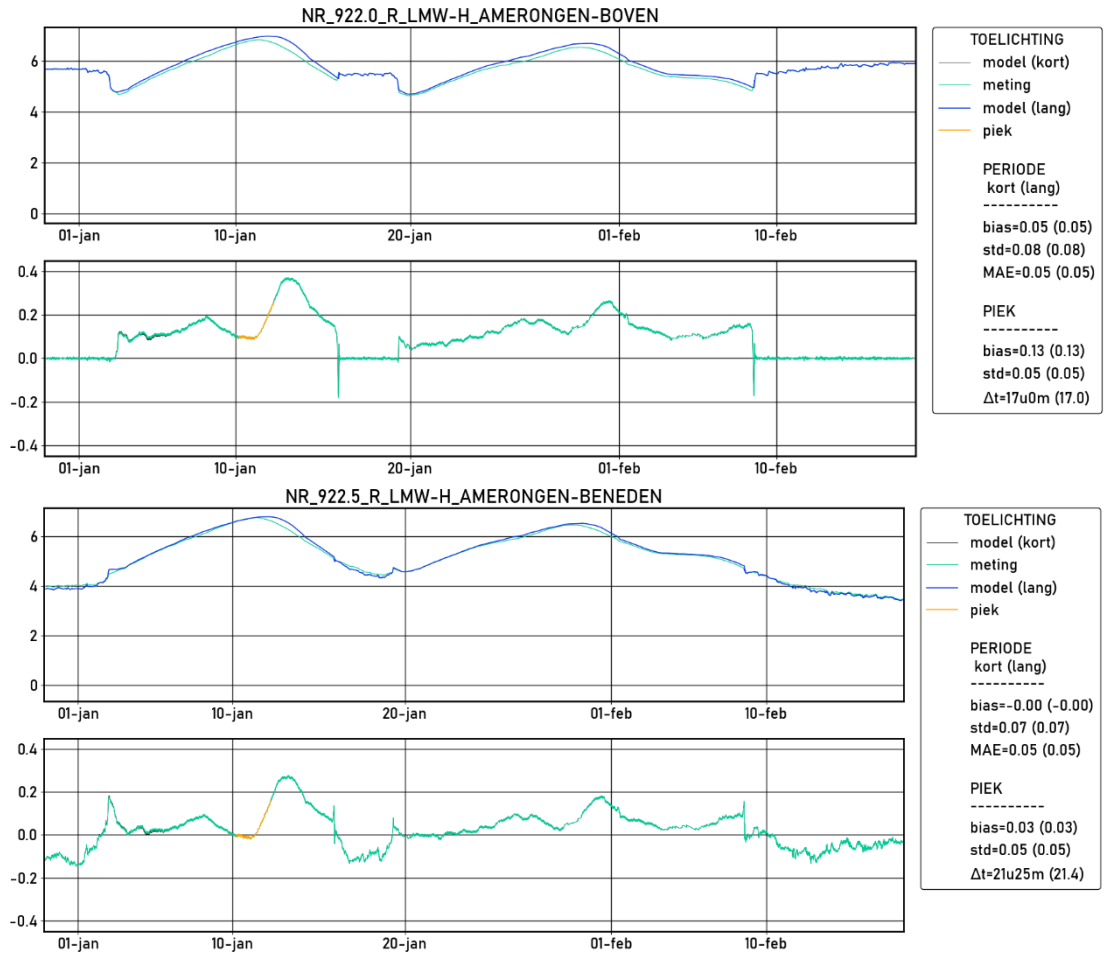


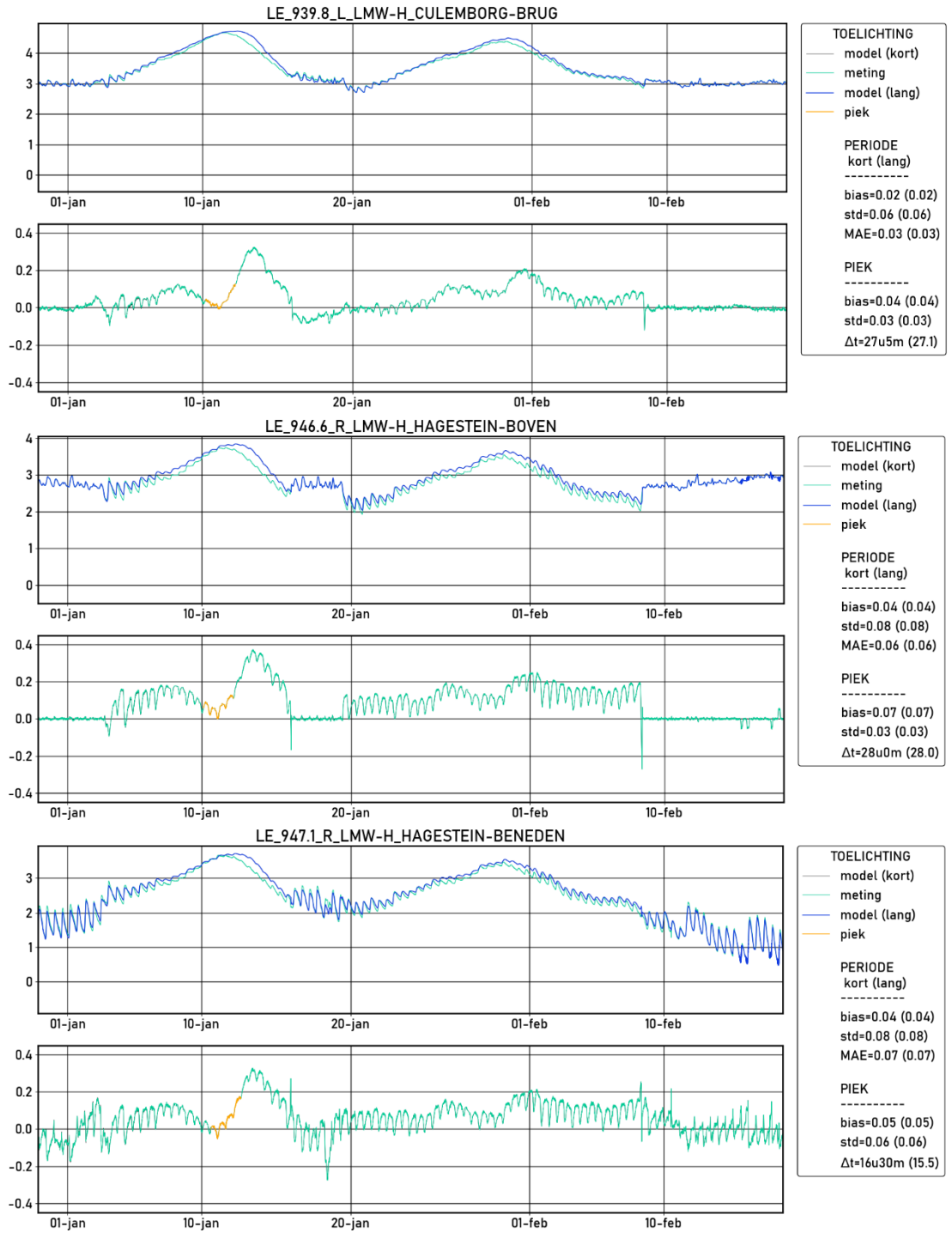


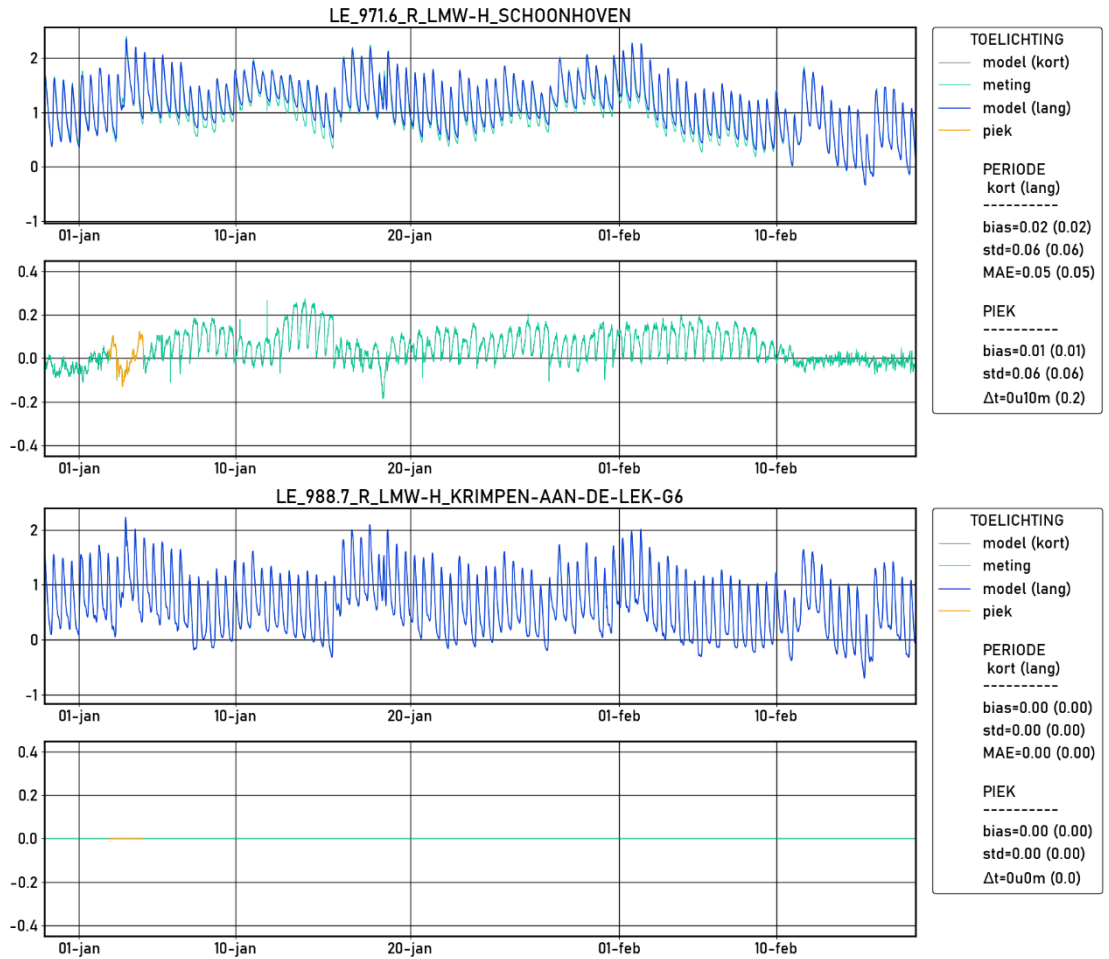
E.1.3.2. Pannerdens Kanaal, Nederrijn, Lek



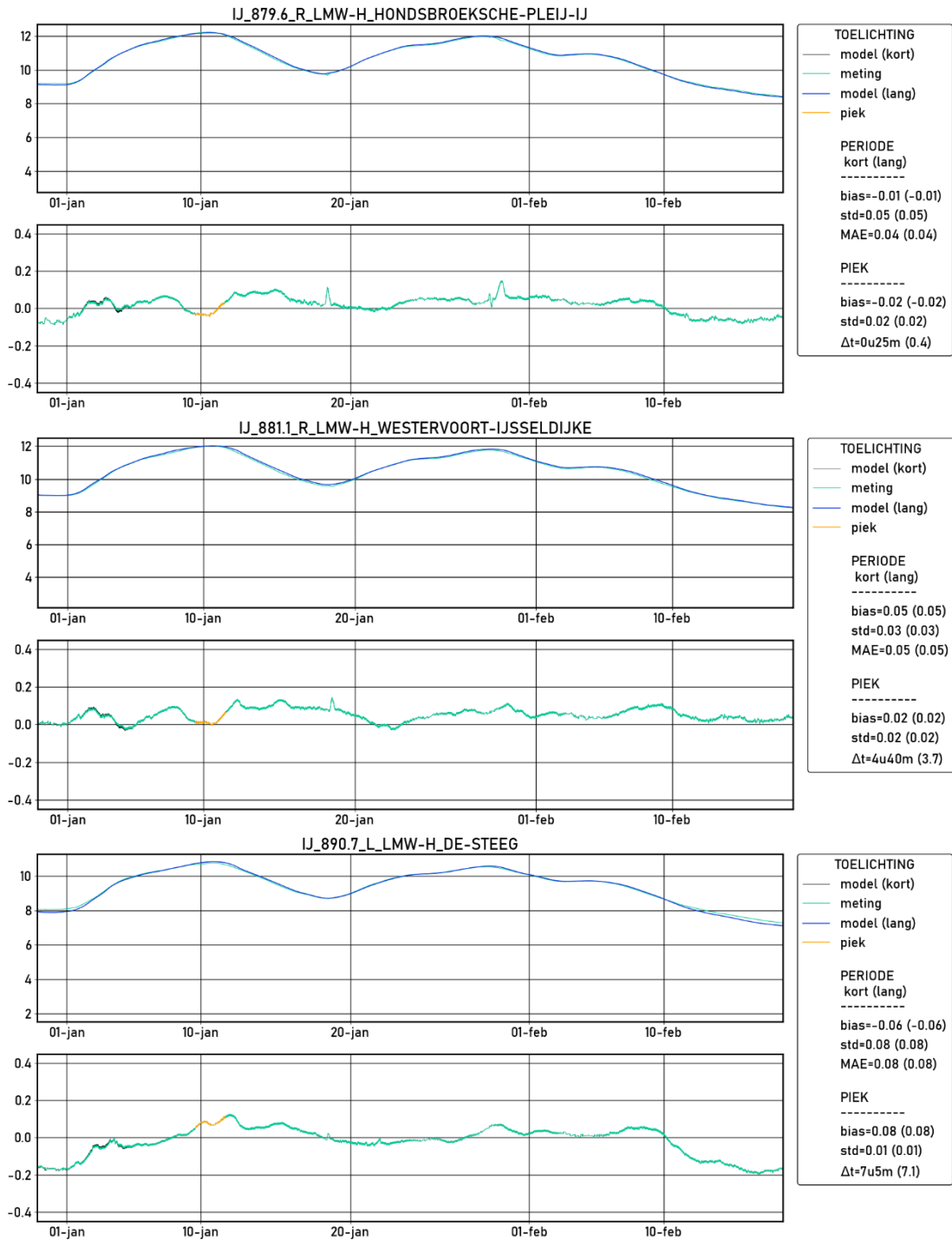


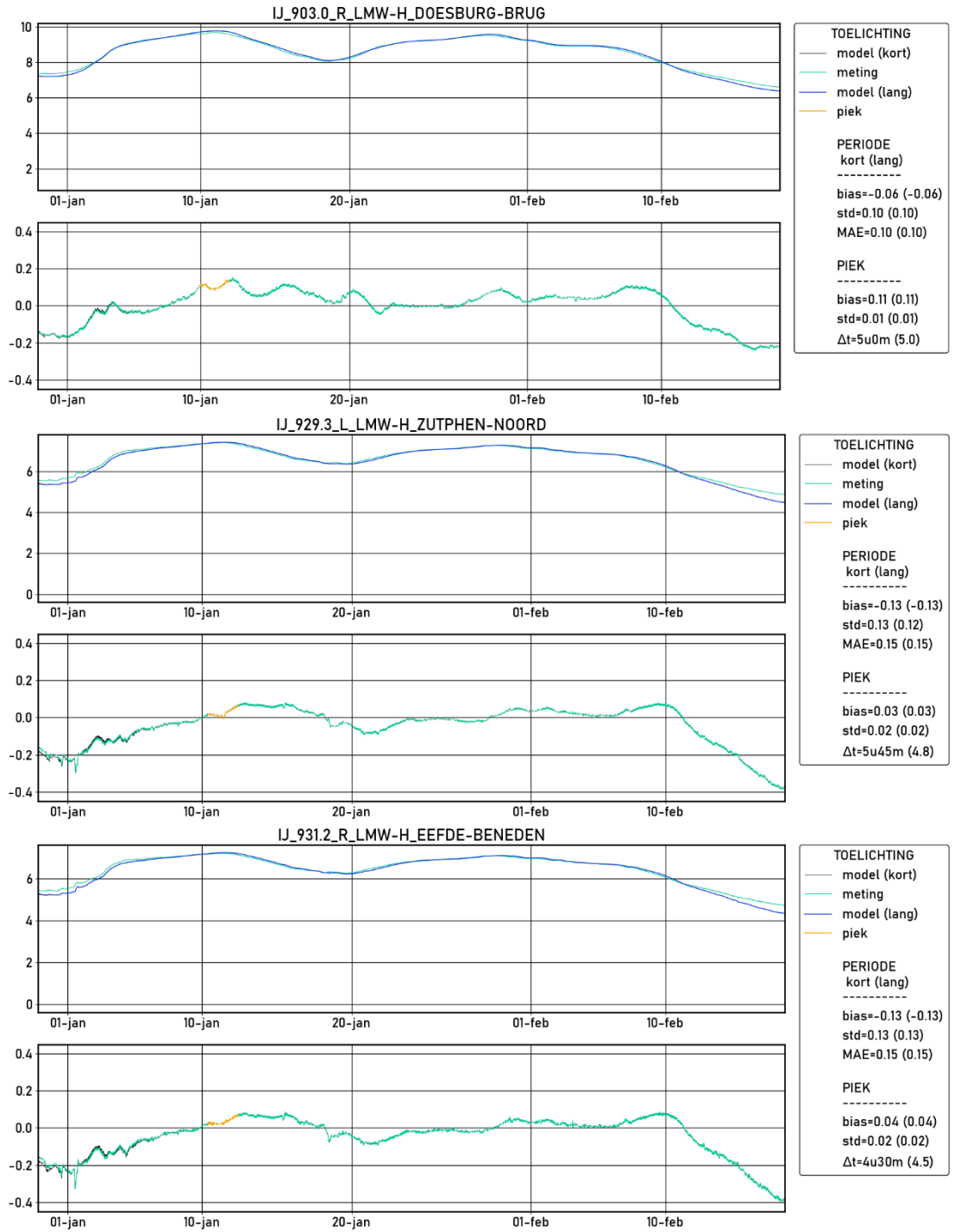


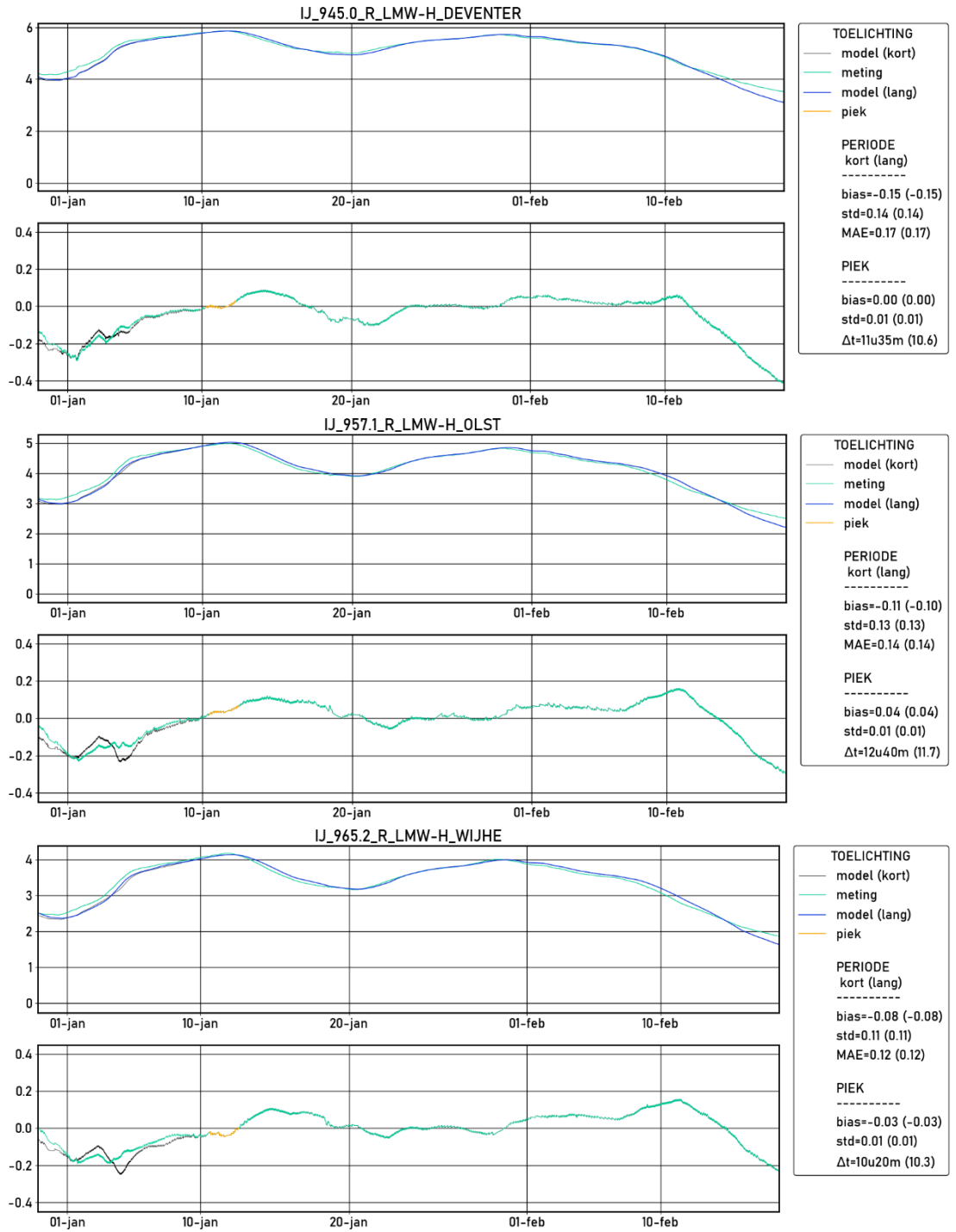


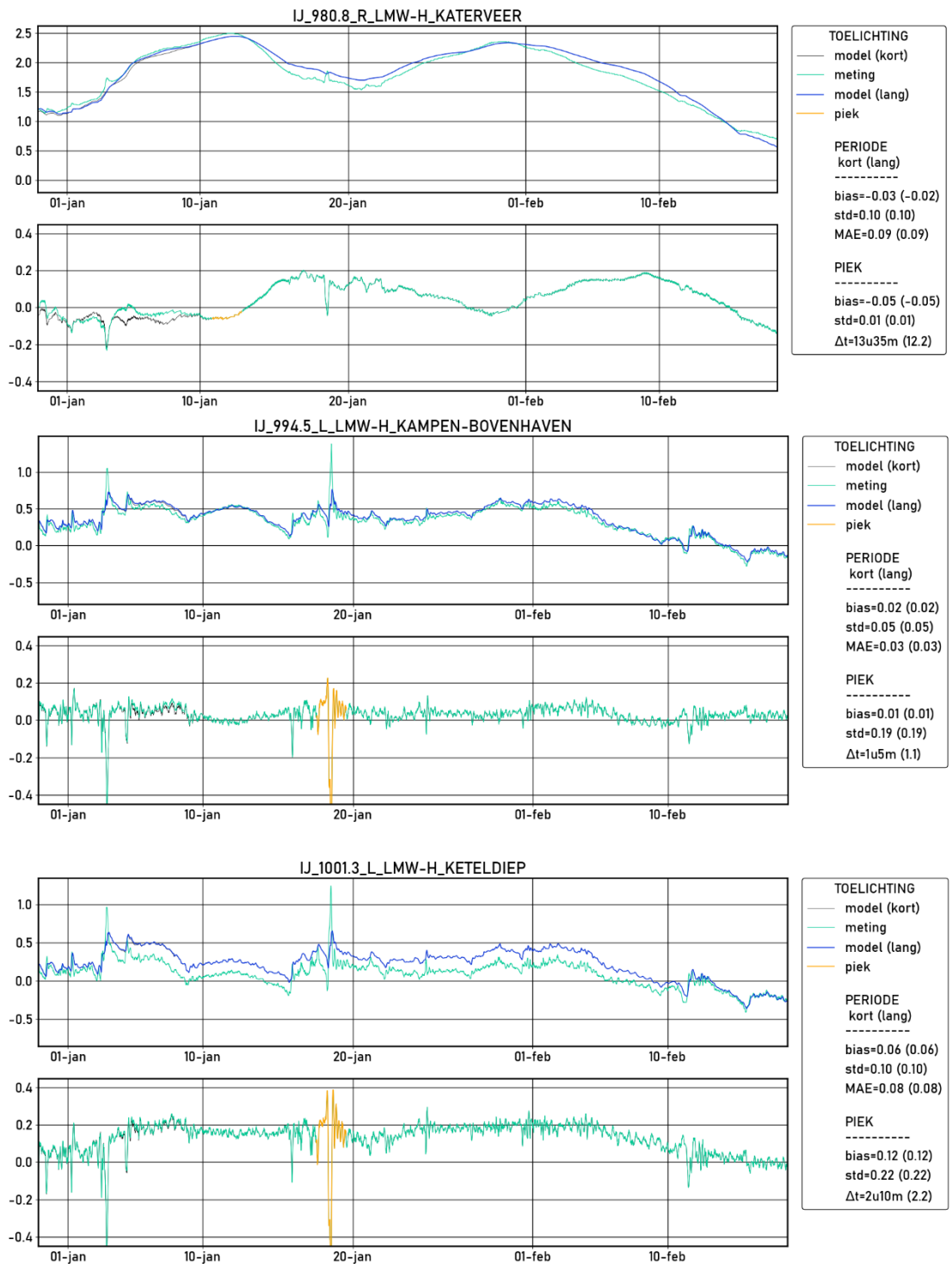


E.1.3.3. IJssel







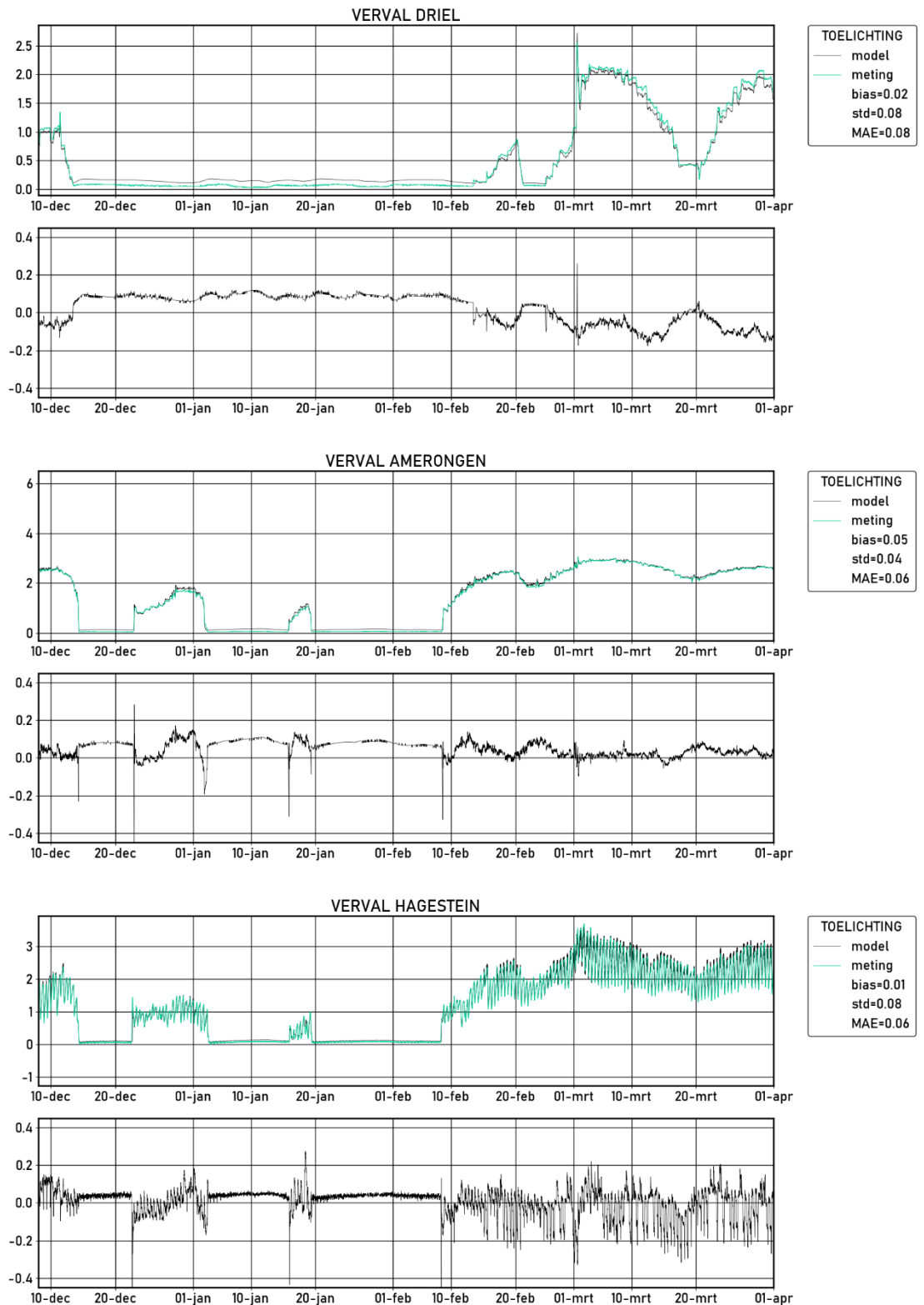


E.2 Verval stuwen

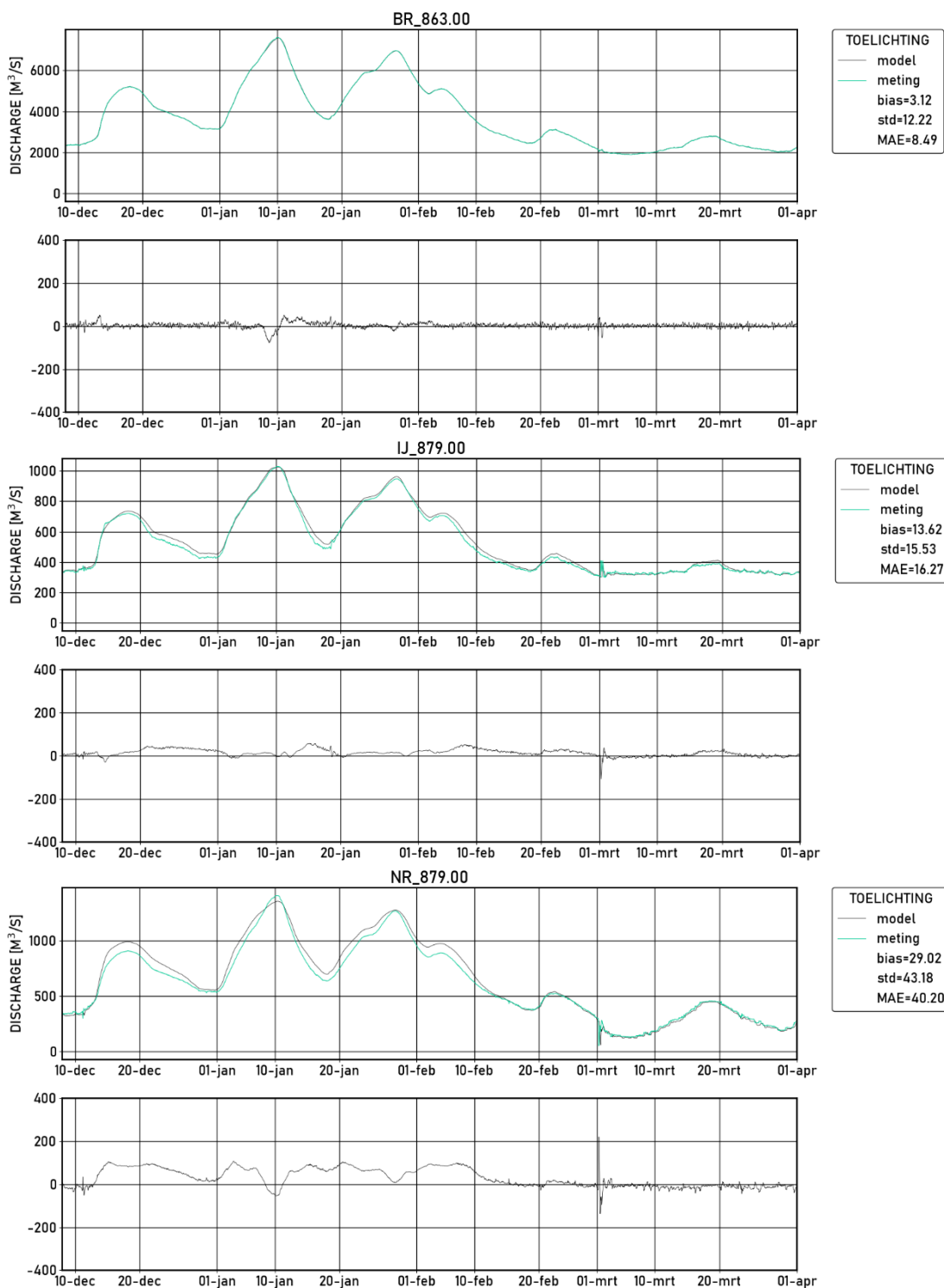
Net als in D-Hydro, is in volledig gestreken situatie het verval over de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein enkele centimeters te groot. Dit bleek ook al uit de waterstandsvalidatie (paragraaf 3.2.2) en is voor het 2D-model eerder gerapporteerd in Kosters et al. (2022).

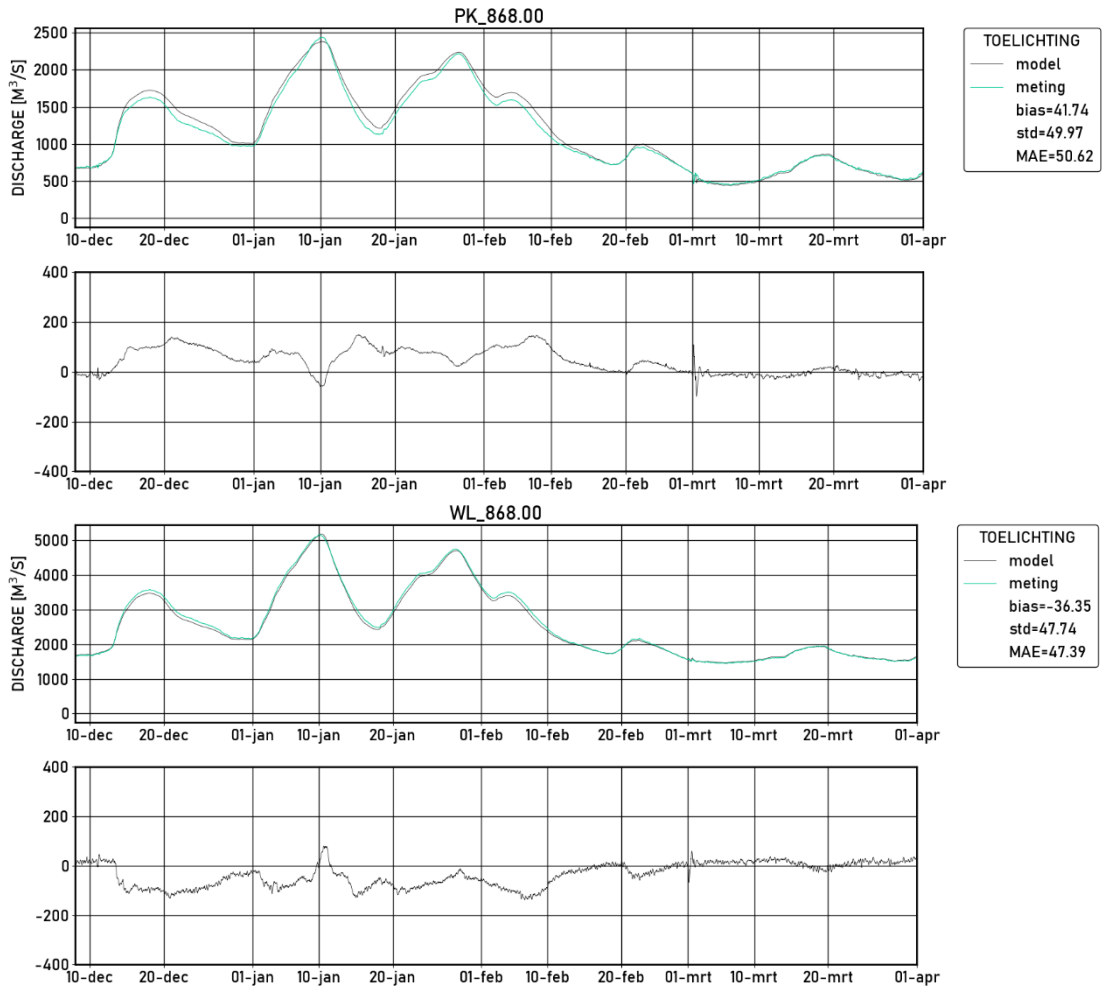
Het gemodelleerde verval is meestal te groot, gemiddeld genomen 5 cm bij Driel, 2 cm bij Amerongen en 1 cm bij Hagestein.

Bij geopende stuwen is het verval bij Driel en Amerongen rond 10 cm te groot en bij Hagestein ongeveer 4 cm. Bij Driel is het verval juist te klein als de stuw in bedrijf is; dit komt omdat de waterstand bij Driel-beneden te hoog is.



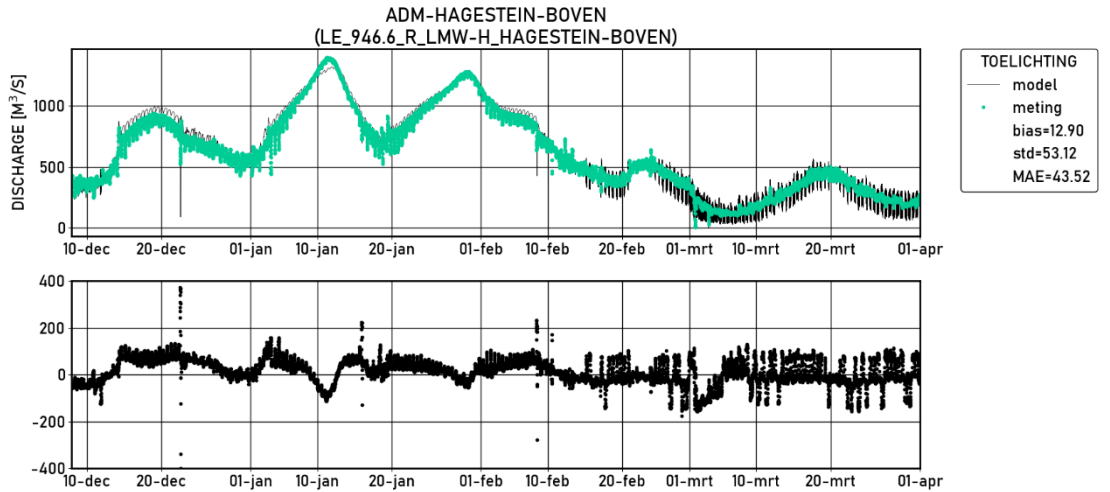
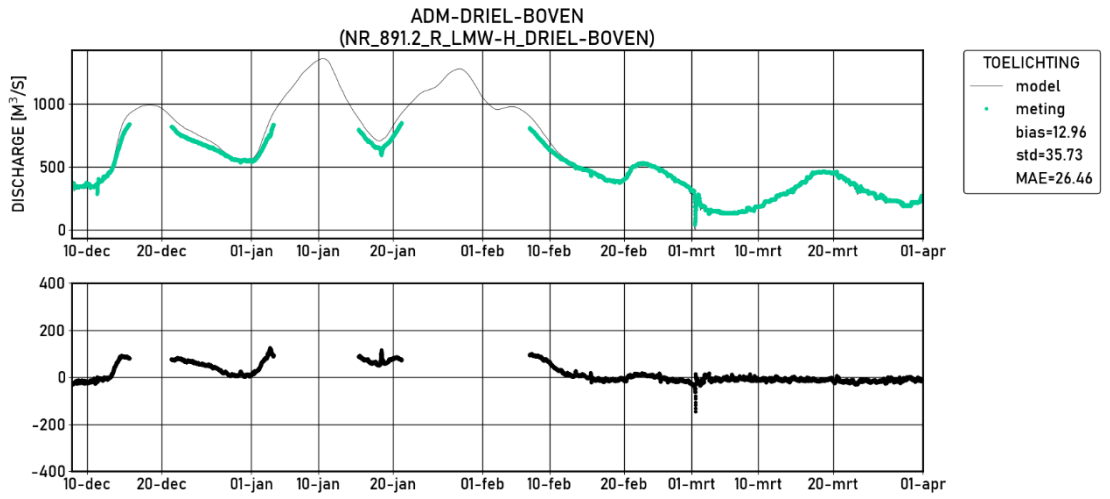
E.3 Afvoeren splitsingspunten

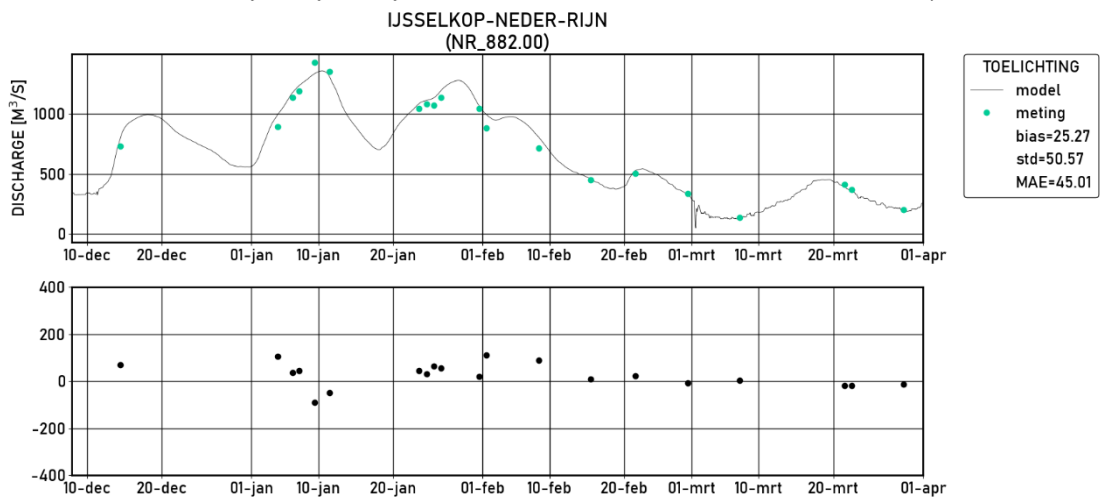
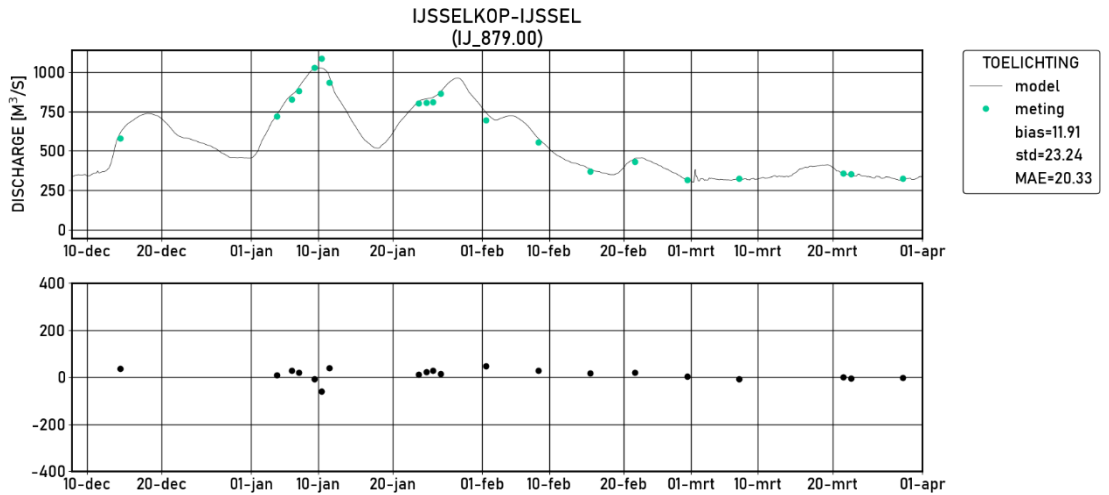
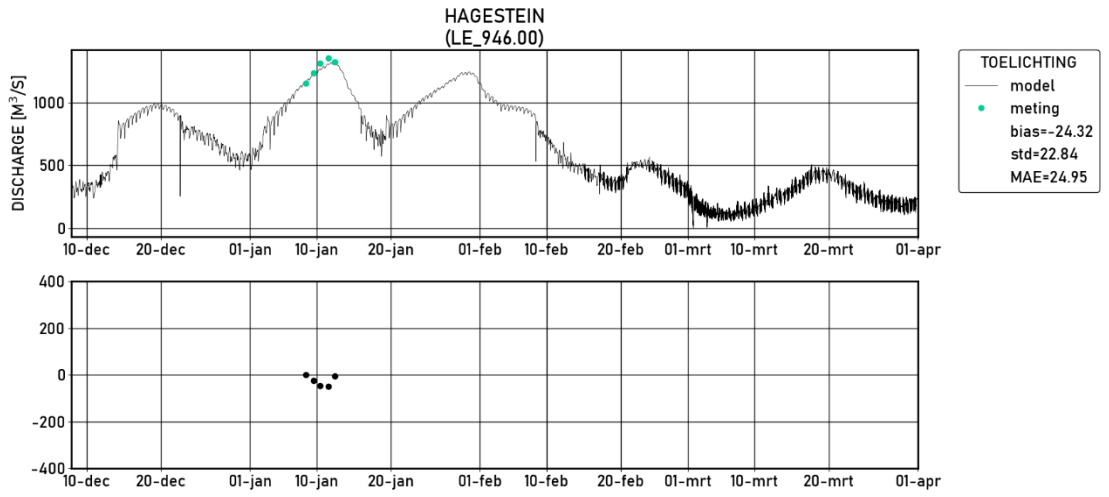




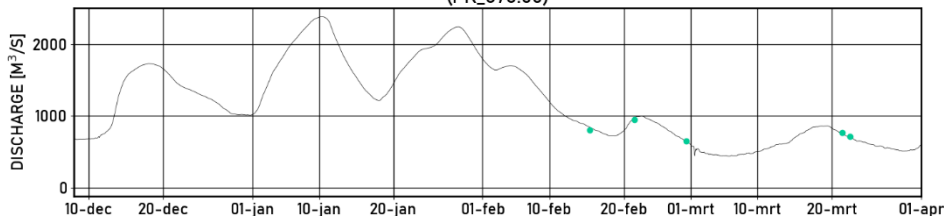
E.4 ADCP- en ADM-metingen afvoer

Hier zijn enkel de stations vergeleken die in het 1D model staan. Niet alle stations bestaan in 1D, of zijn vergelijkbaar met metingen, omdat er in 1D geen onderscheid kan worden gemaakt tussen stroming door een hoogwatergeul in het winterbed. Op de geselecteerde stations is het verschil gemiddeld genomen 10 (ADM Hagestein) en 13 (ADM Driel) m³s⁻¹.

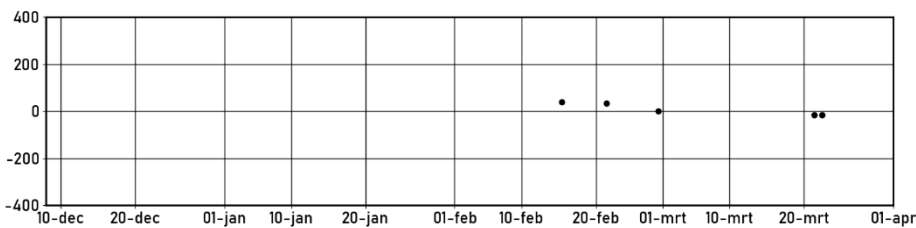




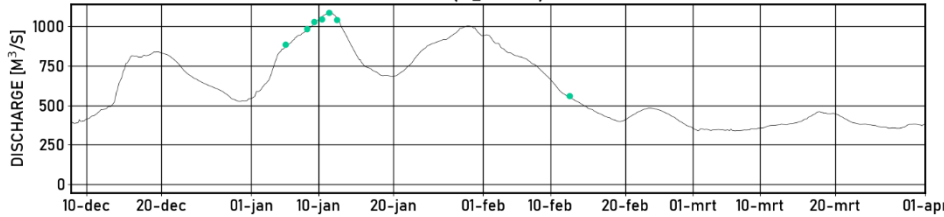
IJSSELKOP-PANNERDENSCH-KANAAL
(PK_878.00)



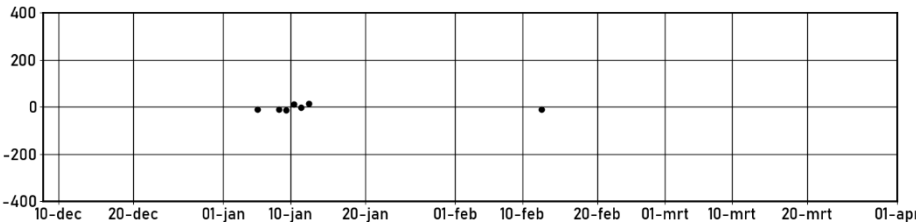
TOELICHTING
 — model
 • meting
 bias=8.80
 std=26.25
 MAE=20.89



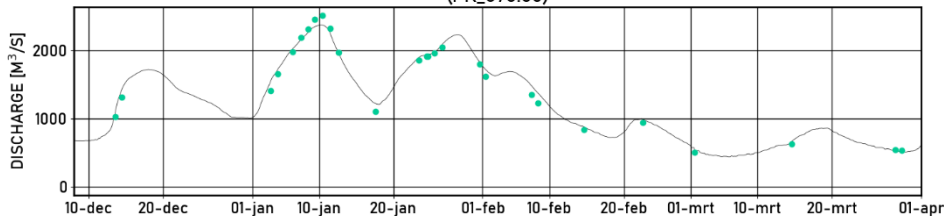
OLST-HW
(IJ_945.00)



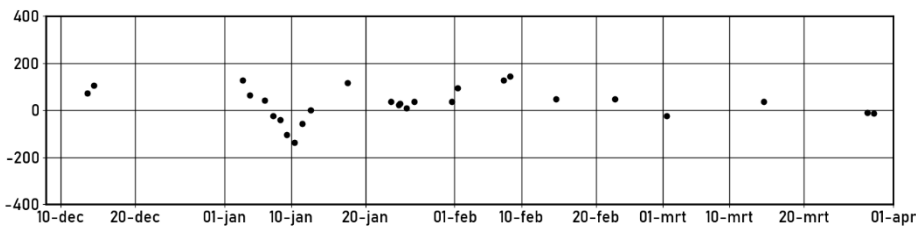
TOELICHTING
 — model
 • meting
 bias=-2.99
 std=11.52
 MAE=10.55

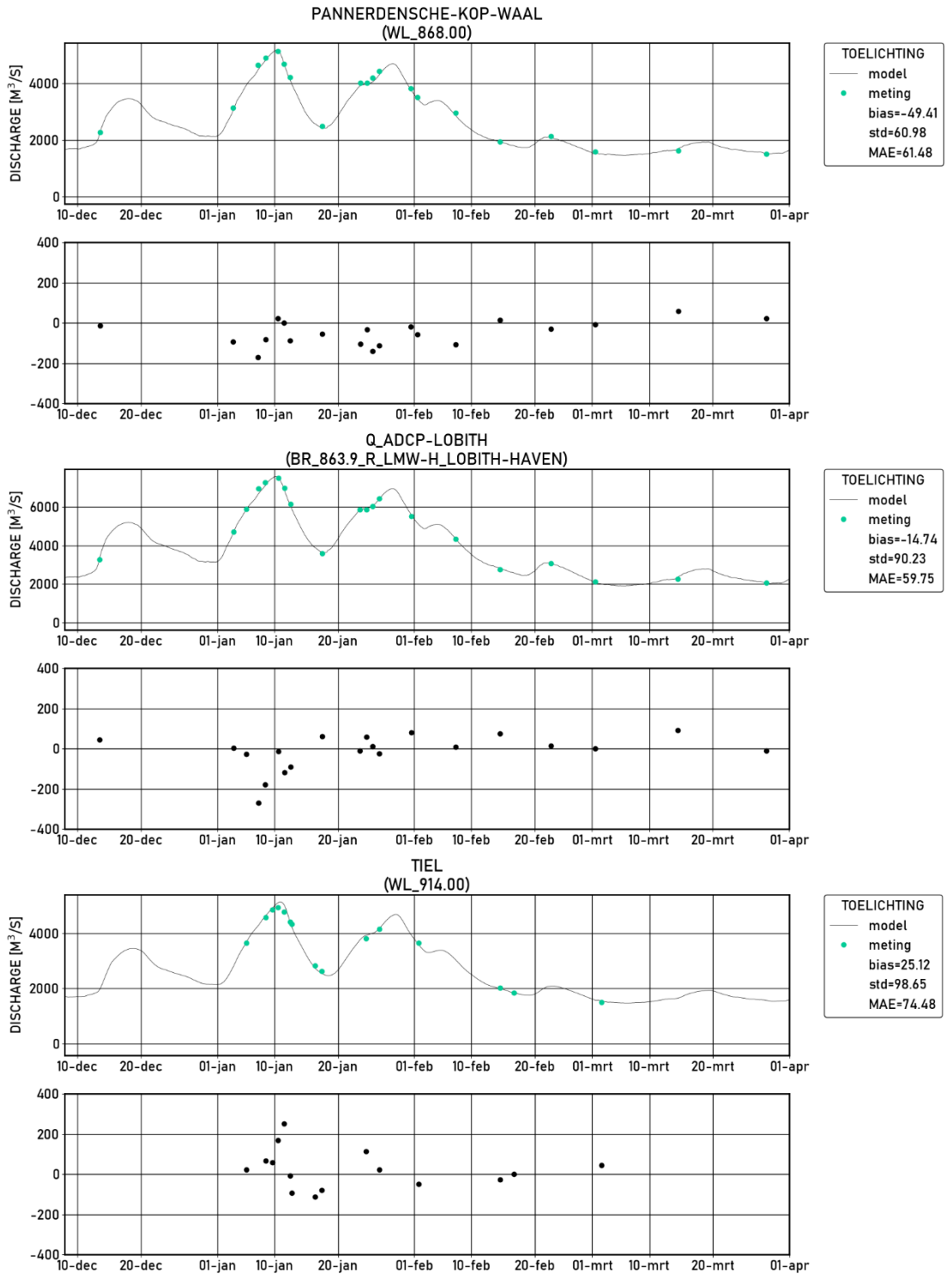


PANNERDENSCH-KOP-PANNERDENSCH-KANAAL
(PK_870.00)



TOELICHTING
 — model
 • meting
 bias=28.86
 std=68.60
 MAE=59.47





F Zomerbedbreedte in SOBEK

Van: Koen Berends <Koen.Berends@deltares.nl>

Verzonden: vrijdag 21 oktober 2022 10:06

Aan: Putten, Daniël van (ON) <daniel.van.putten@rws.nl>; Scholten, Martin (WVL) <martin.scholten@rws.nl>

CC: Matthijs den Toom <Matthijs.denToom@deltares.nl>; Boyan Domhof <Boyan.Domhof@deltares.nl>; Aukje Spruyt <Aukje.Spruyt@deltares.nl>; Anna Kusters <Anna.Kusters@deltares.nl>

Onderwerp: Analyse sobek-j22 n.a.v. RWsOS vraag

Beste Daniël, cc. Martin,

Via Matthijs den Toom heb ik begrepen dat er in het operationeel gebruik van sobek-rijn-j22_6-v1a 'omhoogstromend water' is waargenomen. Dat is in een Teams overleg tussen jou en Matthijs besproken. Matthijs heeft deze vraag bij Boyan en mij neergelegd.

Wij hebben de casus per ommekeer bestudeerd, met name om te kijken of dit een symptoom is van een eerder niet waargenomen onderliggend probleem. Wij concluderen dat dit niet het geval is, en dat het waargenomen gedrag op een logische manier volgt uit de manier waarop 2D wordt platgeslagen naar 1D. Wel volgen er aanknopingspunten uit voor incrementele verbetering aan de methodiek in de komende jaren.

Vanwege de beperkte omvang van de vraag hoop ik dat beantwoording per mail volstaat – in plaats van een memo.

De locatie die we bestudeerd hebben betreft de Waal ter hoogte van vluchthaven IJzendoorn:



Fig. 1 Waal ter hoogte van IJzendoorn. Noteer de twee aangetakte plassen aan weerszijden van de hoofdgeul.

Uit bestudering van de door FM2PROF gemaakte profielen (m.n. "waal_1_40147.826") blijkt dat de 'Main Section Width' – de breedte waarover de zomerbedruwheid geldt – aanzienlijk groter is dan bij omliggende profielen. Op dit stuk is een breedte van 250-300 meter normaal, terwijl dit profiel een breedte heeft van 635 meter.



Fig. 2 Dwarsprofiel waal_1_40147.826

Hierdoor is er lokaal een breder en gladder profiel, dat vlak daarna weer smaller wordt. We zien hier ook een plotseling afname van de stroomsnelheid met een factor 2. Een dergelijke afname in kinetische energie moet gepaard gaan een toename in potentiële energie: opstuwing. Die lokale opstuwing zien we, met kennis van nu, ook terug in de rapportage. In bepaalde omstandigheden zien we zelfs dat dit kan leiden tot een kleine en tijdelijke omkeer van het verhang.

De vraag is dan waarom de zomerbedbreedte hier zo breed is. Dat heeft te maken met twee ontwerpkeuzes in FM2PROF, nl. het bepalen van de zomerbedbreedte en het bepalen van bergend volume.

De zomerbedbreedte wordt in principe gelijk genomen aan de sectiebreedte uit het Baseline-polygoon. Er worden echter een paar checks uitgevoerd, die nagaan of daarmee een valide SOBEK 3 profiel aangemaakt kan worden. Een van die checks is dat de zomerbedbreedte niet kleiner mag zijn dan de kleinste stroomvoerende breedte. Deze check is dit jaar toegevoegd, omdat bleek dat SOBEK 3 de zomerbedruwheid negeert als de zomerbedbreedte kleiner is dan de kleinste breedte. Dat leidde in de pilot tot flinke lokale opstuwing – een aanzienlijk groter probleem dan wat we nu zien. Bij dit profiel is de zomerbedbreedte zo groot, omdat de kleinste stroomvoerende breedte groot is.

De vervolgvraag is, waarom de stromende breedte zo groot is ter hoogte van dit profiel. De oorzaak hiervan is ongetwijfeld dat verschillende 2D cellen in de aangetakte plas op de eerste tijdstap in de 2D berekening het stromingscriterium overschrijden. Omdat de plas dieper is dan de rivier zelf, hebben we daardoor veel stroomvoering laag in het profiel.

Tot slot rest de vraag: kunnen we dit verbeteren. Er zijn verschillende richtingen waar we aan kunnen denken, zoals het forceren van berging in plassen, forceren van een kleinere zomerbedbreedte, of aanpassing van het stroomvoeringscriterium. Elk van deze potentiële oplossingen heeft echter ook nadelen – en mogelijk grotere nadelen dan wat we nu zien.

Daarom zou ik adviseren om deze casus mee te nemen als aanknopingspunt voor incrementele verbetering in de volgende actualisatie. Uitgangspunt zou dan moeten zijn om te kijken of een potentiële verbetering de ongekalibreerde vergelijking met 2D verder verbeterd.

Ik kan me voorstellen dat je nog vragen hebt. Ik ben de komende week afwezig i.v.m. de herfstvakantie, maar beantwoord je vragen graag na terugkeer.

Met vriendelijke groet,
Mede namens Boyan,

Dr. ir. K.D. (Koen) Berends

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