

Actualisatie Modellen Rijn 2024

sobek-rijn-j24_6-v1a1



Actualisatie Modellen Rijn 2024
sobek-rijn-j24_6-v1a1

Auteur(s)

Bart Maas

Koen Berends

Actualisatie Modellen Rijn 2024

sobek-rijn-j24_6-v1a1

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Dhr. William de Lange
Referenties	
Trefwoorden	SOBEK, Rijntakken, 1D model, RWsOS

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-07-2024
Projectnummer	11210333-003
Document ID	11210333-003-ZWS-0008
Pagina's	73
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bart Maas	
	Koen Berends	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de bouw, afregeling en testen van het zesde-generatie 1D model voor de Rijntakken: *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. Het primaire doel van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* is de operationele voorspelling van de waterstanden in de Nederlandse Rijntakken binnen de samenhangende operationele systemen van Rijkswaterstaat voor de rivieren (RWsOS-Rivieren). Binnen dat systeem worden voorspellingen gebruikt voor onder meer peilbeheer, waterverdeling en watermanagement. Daarnaast wordt het model door Rijkswaterstaat via Helpdesk Water (onderdeel van het Informatiepunt Leefomgeving IPLO) beschikbaar gesteld voor secundaire doelen.

Modelbouw

Het 1D model wordt afgeleid volgens een standaardmethodiek. Deze methode is tijdens de pilotstudies voor de Rijntakken en Maas ontwikkeld voor het zesde generatie Rijntakkenmodel. Deze methodiek verschilt in veel opzichten van de methode die in de vijfde generatie is gebruikt. De belangrijkste uitgangspunten zijn:

- Het 1D model wordt geheel gebaseerd op het 2D model (hier *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*). De naamgeving van objecten is identiek aan 2D en het RTC model is overgenomen uit 2D met beperkte aanpassingen om het voor 1D geschikt te maken.
- Profielen en ruwheden worden afgeleid met het programma 'FM2PROF'.
- Er wordt gekalibreerd op 2D modelresultaten. Steeds binnen één som waarbij zowel waterstanden als de afvoerverdeling wordt afgeregeld.

Ten opzichte van de vorige versie (*sobek-rijn-j22_6-v1a2*) zijn de volgende aanpassingen doorgevoerd aan de schematisatie:

- Er zijn nieuwe dwarsprofielen afgeleid met de aangepaste FM2PROF software (versie 2.3). Door een aanpassing in de software wordt er nu beter onderscheid gemaakt tussen bergend en stroomvoerend volume in het profiel.
- De gebiedsvakken die gebruikt worden bij het afleiden van de dwarsprofielen vanuit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* zijn rondom de takken Veessen-Wapenveld en Reevediep aangepast om zo de werkelijke situatie te volgen om realistischere profielen aan te maken.
- Toevoeging en aanpassing van D-RTC sturing:
 - Toevoeging van de RTC sturing "VeWa_leegloop". Deze RTC sturing zorgt ervoor dat de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld leeg wordt gepompt nadat er een hoogwater is gepasseerd.
 - Toevoeging van RTC sturing "WKC Amerongen". Deze RTC sturing is toegevoegd om de werking van WKC Amerongen na te bootsen. Deze aanpassing is overgenomen uit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.
 - Aanpassing van RTC sturing "Driel". Aanpassing van het stuurpunt voor de werking van het stuurprogramma. Deze aanpassing is overgenomen uit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.
- Toevoegen van de volgende LMW-stations aan schematisatie:
 - *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW*
 - *DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord*
 - *DM_70.90_L_LMW-H_Roggebotsluis-zuid-g6*
 - *VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord*

Kalibratie & Validatie

Als onderdeel van de standaardmethodiek dient het 1D model gekalibreerd en gevalideerd te worden op basis van het geactualiseerde 2D model. Bij de kalibratie zijn de aanbevelingen uit voorgaand onderzoek naar verbetering kalibratiemethodiek meegenomen (Berends, Maas & Gensen, 2024). Hierdoor is het hoogste afvoerniveau aangepast t.o.v. voorgaande jaren.

Tijdens de kalibratie van dit jaar bleek dat in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop en IJsselkop zonder extra gewicht in de kalibratie significante verschillen tussen 1D en 2D ontstaan in het midden-lage en hoge afvoerbereik. Om de afvoerverdeling correct te kalibreren is er gekozen om het gewicht op de afvoerverdeling vier keer zwaarder te maken, dat wil zeggen tijdens de kalibratie de 2D afvoerverdeling meer wordt geforceerd in het 1D model.

Uit de kalibratie en validatie kwamen de volgende bevindingen:

- De kalibratie leidt tot vergelijkbare resultaten van de waterstanden ten opzichte van *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.
- De validatieresultaten zijn vergelijkbaar *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Dat wil zeggen dat het verschil met 2D doorgaans binnen verwachte orde grootte (centimeters) blijft. Echter ook bij *sobek-rijn-j24_6-v1a1* blijven er grotere verschillen (>10cm) zichtbaar bij de afvoeren 8000 – 10.000 m³/s op de Boven-Rijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.
- De afvoerverdeling bij Pannerdensche Kop en IJsselkop is verbeterd t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en is daarmee grotendeels conform *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.
- De afvoer door het Reevediep is toegenomen t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Wel wordt de afvoer onderschat t.o.v. het 2D model.
- De afvoer door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld wordt lichtelijk onderschat t.o.v. het 2D model waardoor de waterstanden en de afvoer door de IJssel toenemen.

Conclusie en aanbevelingen

Het zesde-generatie 1D model voor de Rijntakken is geactualiseerd naar *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. Het model heeft een vergelijkbare nauwkeurigheid in waterstanden met haar voorgangers maar laat een significante verbetering zien betreft de afvoerverdeling. Er is gebruik gemaakt van een nieuwe profielgeneratie methode, Deze methode zorgt voor een betere verdeling tussen bergend en stroomvoerend volume in het profiel. Het model is verder uitgebreid met de toevoeging van verschillende RTC sturingen om de werkelijkheid beter na te bootsen. Daarnaast zijn opvallende resultaten uitgelicht met daaropvolgende aanbevelingen voor toekomstige actualisaties. Hiervan zijn de belangrijkste:

- Met het oog op aankomende actualisaties is het wenselijk om te onderzoeken hoe effectief het aanpassen van het gewicht van de afvoerverdeling is en waar een optimum gevonden kan worden voor zowel waterstanden als afvoerverdeling.
- Onderzoek naar het effect van het meestromen van “De Bijland” en implementatie van mogelijke 1D modelmaatregelen. Vermoed wordt dat het meestromen van de kom “De Bijland”, in het 2D model, zorgt voor grote waterstandsverschillen op de Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	8
1.1	Methode	8
1.2	Software	9
1.3	Team	9
2	Modelbouw	10
2.1	Vernieuwing en onderzoek	10
2.1.1	Onderzoek kalibratiemethodiek	10
2.1.2	Nieuwe methode voor genereren profielen (aanpassing in FM2PROF software)	12
2.1.3	Effect en aanpassing van gebiedsvakken IJssel, Reevediep en Veessen-Wapenveld op het genereren van profielen	15
2.2	Aanpassingen aan schematisatie	19
2.2.1	1D-2D mapping in FM2PROF	19
2.2.2	RTC sturing voor leeglopen Veessen-Wapenveld na hoogwater	19
2.2.3	RTC sturing Aanpassing RTC Driel	21
2.2.4	RTC sturing WKC Amerongen	22
2.2.5	Toevoegen LMW-stations	24
2.3	Genereren van profielen en ruwheden	26
2.3.1	2D afleidingssom voor FM2PROF	26
2.3.2	Dwarsprofiellocaties	26
2.3.3	Gebieds- en sectievakken	26
2.3.4	Draaien van FM2PROF	27
2.4	Ongekalibreerde vergelijking met 2D	28
2.4.1	Waterstanden	28
2.4.2	Afvoerverdeling	31
2.4.3	Conclusie	34
2.5	RWsOS variant	34
3	Kalibratie	35
3.1	Methode	35
3.1.1	Algemene methode voor kalibratie & validatie	35
3.1.2	Kalibratie <i>sobek-rijn-j24_6-v1a1</i>	37
3.2	Resultaten kalibratie	38
3.2.1	Ruwheden	38
3.2.2	Waterstanden	40
3.2.2.1	Waterstandsverschil met 2D	40
3.2.2.2	Waterstandsverschil met <i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	42
3.2.3	Afvoerverdeling	43
3.2.3.1	Afvoerverdeling verschil met 2D	43
3.2.3.2	Afvoerverdeling verschil met <i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	46
4	Validatie	47

4.1	Resultaten validatiesommen	47
4.1.1	Waterstanden	47
4.1.1.1	Waterstandsverschil met 2D	47
4.1.1.2	Waterstandsverschil met <i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	49
4.1.2	Afvoerverdeling	52
4.1.2.1	Afvoerverdeling verschil met 2D	52
4.1.2.2	Afvoerverdeling verschil met <i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	54
4.2	Aandachtspunten verschillen tussen 1D en 2D modelresultaten	58
5	Conclusie en aanbevelingen	60
5.1	Conclusies	60
5.1.1	Analyse verschillen in resultaten tussen 1D en 2D	60
5.1.2	Analyse verschillen in resultaten met <i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	60
5.1.3	Modelaanpassingen en kalibratie (changelog)	61
5.2	Aanbevelingen	61
6	Referenties	63
A	Memo: Modelonderzoek Rijn 1D Q1	64
B	Memo: Verschilanalyse FM2Prof 2.3	65
C	Verschilanalyse aanpassing gebiedsvakken	66
D	Aanpassingen voor RWsOS	69
D.1.1	Restart read and write	69
D.1.2	Randvoorwaarden en lateralen	69
D.1.3	Uitvoertijdstep	69
D.1.4	Uitvoerparameters	69
D.2	Aanpassing aan de schematisatie	70
E	Resultaten – Digitale bijlage	71

1 Introductie

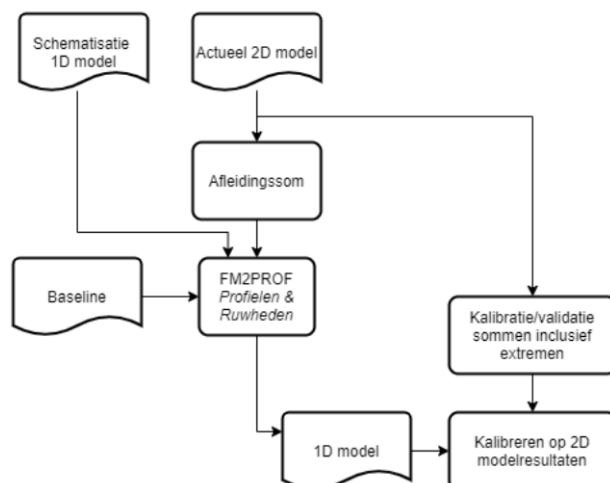
Dit rapport beschrijft de bouw, afregeling en testen van het zesde-generatie 1D model voor de Rijn: *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. Dit model is een doorontwikkeling van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (Maas, Gensen en Berends, 2023).

Dit 1D model wordt gebruikt voor de berekening van waterstanden en afvoeren binnen het areaal van Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Naast het standaardmodel (*sobek-rijn-j24_6-v1a1*) wordt een afgeleide variant opgeleverd: *sobek-rijn-j24_6-v1a1-rwsos*. Deze variant wordt gebruikt voor de operationele voorspelling van de waterstanden in de Nederlandse Rijntakken binnen de samenhangende operationele systemen van Rijkswaterstaat voor de rivieren (RWsOS-Rivieren). Binnen dat systeem worden voorspellingen gebruikt voor onder meer peilbeheer, waterverdeling en watermanagement. Daarnaast wordt het model door Rijkswaterstaat via Helpdesk Water (onderdeel van het Informatiepunt Leefomgeving IPLO) beschikbaar gesteld voor secundaire doelen.

1.1 Methode

Het *sobek-rijn-j24_6-v1a1* model is ontwikkeld volgens de standaardmethodologie voor zesde generatie 1D modellen. Deze methodologie kent de volgende uitgangspunten (Figuur 1.1):

- Het 1D model wordt geheel gebaseerd op het 2D model. In principe is de naamgeving van objecten, randvoorwaarden en het RTC model (tenzij niet mogelijk) identiek aan die van het 2D model.
- Profielen en winterbedruwheden worden afgeleid met het programma 'FM2PROF'.
- Er wordt met behulp van OpenDA gekalibreerd op 2D modelresultaten. Dit wordt gedaan binnen één som, waarbij zowel waterstanden als afvoerdelingen worden afgeregeld. Elke modelversie wordt opnieuw afgeleid van het 2D model dat de basis vormt voor de schematisatie.



Figuur 1.1 Standaardmethodiek afleiden 1D modellen voor de zesde generatie. Het blokje 'Baseline' betreft sectie-informatie die als invoer van FM2PROF wordt gebruikt. Baseline wordt ook gebruikt bij het maken van het actuele 2D model en bij het maken van keuzes voor de schematisatie van het 1D model. Deze afhankelijkheid is in dit figuur omwille van de duidelijkheid niet weergegeven.

1.2 Software

In dit project worden verschillende soorten software gebruikt. Deze staan beschreven in Tabel 1.1.

Tabel 1.1 De gebruikte software.

Software	Versie	Gebruikt voor
SOBEK3	3.7.25.55022	Simulaties en visuele inspectie
FM2PROF	2.3.2	Afleiden van profielen en ruwheden, visualisatie van resultaten
OpenDA	2.4.5	Kalibratie

1.3 Team

Het werk is uitgevoerd door het volgende team:

Tabel 1.2 Het ontwikkel team.

Naam	Organisatie	Rol
dr. ir. Koen Berends	Deltares	Product owner
Bart Maas MSc	Deltares	Modelontwikkelaar

Daarnaast hebben de volgende personen bijgedragen aan het model en dit rapport:

Tabel 1.3 Externe bijdragen.

Naam	Organisatie
ir. William de Lange	Rijkswaterstaat WVL
ir. Dénes Beyer	Rijkswaterstaat Oost-Nederland
ir. Raymond van Renswoude	Rijkswaterstaat Oost-Nederland

2 Modelbouw

2.1 Vernieuwing en onderzoek

Voorgaand aan de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* is er modelonderzoek uitgevoerd naar onderwerpen die voortkwamen uit de bouw van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (Maas, Gensen en Berends, 2023) en naar vragen die tijdens het onderzoek opkwamen. De onderstaande paragrafen beschrijven slechts de uitkomsten van de onderzoeken die daadwerkelijk geleid hebben tot een aanpassing van de werkwijze van de actualisatie of van de schematisatie van het model. Meer achtergrond en overige onderwerpen worden uitgebreider toegelicht in de (digitaal) toegevoegde modelonderzoek memo (Berends, Maas en Gensen, 2024) (Bijlage A).

2.1.1 Onderzoek kalibratiemethodiek

Volgend uit de aanbevelingen van de bouw van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* is er onderzoek gedaan naar mogelijke aanpassingen van de kalibratiemethodiek. Hiervoor is een viertal alternatieve kalibratiemethodieken beschouwd. Voor elke methode is gekeken of deze leidt tot een verbetering van de kalibratie- en validatieresultaten van het 1D model. De alternatieve strategieën richten zich in het algemeen op de waterstanden in het gehele modeldomein en specifiek op de afvoerverdeling bij de splitsingspunten en de afvoer door Veessen-Wapenveld en het Reevediep. Hieronder wordt een korte beschrijving van het doel en de conclusies opgesomd. Het onderzoek is uitgevoerd met het destijds meest actuele model: *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Het volledige onderzoek is terug te lezen in (Berends, Maas en Gensen, 2024) (Bijlage A).

De uitgevoerde onderzoeken met bijbehorende conclusies zijn:

- 1 Onderzoeken of de in 1D gemodelleerde afvoer door hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en het Reevediep dichterbij die van 2D kan komen door enerzijds de kalibratie met OpenDA uit te voeren met een geopend Reevediep en anderzijds de afvoer door Veessen-Wapenveld en het Reevediep te kalibreren middels de breedte van de inlaatkunstwerken. Uit het onderzoek is gebleken dat:
 - De afvoer in Veessen-Wapenveld op de piek goed is in validatie, maar na de piek hoger in 1D dan in 2D. Een mogelijke oorzaak is een gebrek aan berging in de profielen.
 - De afvoer naar het Reevediep te laag is in 1D. Een mogelijke oorzaak is te weinig stroomvoerend oppervlak in de profielen.
- 2 Onderzoeken of een groter gewicht toekennen aan de afvoerverdeling op de splitsingspunten in de configuratie van OpenDA de kalibratie- en validatieresultaten verbetert. Uit het onderzoek is gebleken dat:
 - Extra gewicht voor de afvoerverdeling in de configuratie van OpenDA de afvoerverdeling in validatie licht verbetert, maar de nauwkeurigheid van de waterstand vermindert.

- 3 Onderzoeken of een langere modelinitialisatie en een langzamer olopende afvoerrandvoorwaarde in de kalibratie van het model tot verbeterde kalibratie- en validatieresultaten leiden. Uit het onderzoek is gebleken dat:
 - Er geen significante (netto) verbetering van de modelresultaten waarneembaar is. Omdat de nieuwe randvoorwaarde zorgt voor een significante verhoging van de rekentijd (toename van ruim 50%) zonder significante winst in modelresultaten, bevelen we op basis hiervan aan om de afvoerrandvoorwaarde in de kalibratiesom niet aan te passen.

- 4 Onderzoeken of een aanpassing van de afvoerniveaus in de ruwheden, voornamelijk het aanpassen van hogere niveaus, tot verbeterde kalibratie- en validatieresultaten leidt. Uit het onderzoek is gebleken dat:
 - Een aanpassing van het vijfde kalibratieniveau tot een verbetering van de modelresultaten leidt.
 - Het toevoegen van een zesde, zeer hoog afvoerniveau voor de IJssel tot een kleinere fout bij modelkalibratie leidt, maar tot een grotere fout bij validatie op nagenoeg alle LMW-stations leidt. Dit is een teken van overparametrisatie. Hierbij wordt de gekalibreerde ruweidskromme teveel afgeregeld op de specifieke kalibratiesimulatie, waardoor deze afwijkt van een meer algemene toepasbare ruweidskromme die in de meeste gevallen tot goede modelresultaten leidt. Daarom raden wij niet aan om het zesde extreme niveau te handhaven.

Aanbevelingen voor toekomstige kalibratie

- Wijzig de huidige hoogste twee afvoerniveaus, maar voeg geen zesde niveau toe. Tabel 2.1 toont de afvoerniveaus die gebruikt zijn voor de kalibratie van *sobek-rijn-j24_6-v1a1*.

Tabel 2.1 Toegepaste afvoerniveaus ter kalibratie van *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. De groen gekleurde afvoeren zijn aangepast ten opzichte van voorgaande jaren.

# afvoerniveau	BR	WA	PK	NRLEK	IJ
1	450	300	150	100	50
2	3.800	2.600	1.280	850	420
3	6.850	4.700	2.310	1.540	770
4	10.000	6.500	3.500	2.010	1.490
5	16.000	10.150	5.860	3.380	2.480

- Voer geen andere veranderingen door in de kalibratiemethodiek.

De bovenstaande aanbevelingen zijn toegepast bij de kalibratie¹ van *sobek-rijn-j24_6-v1a1*.

¹ Tijdens kalibratie van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* is gebleken dat een aanpassing aan het gewicht van de afvoerverdeling weldegelijk tot betere resultaten leiden. Dit was niet voorzien tijdens het hier uitgevoerde onderzoek met *sobek-rijn-j22_6-v1a2* doordat er gebruik gemaakt is van een andere methode voor het genereren van profielen (2.1.2). De afweging voor het gewicht tijdens kalibratie op de afvoerverdeling wordt verder onderzocht in HYRIDEM-411

2.1.2 Nieuwe methode voor genereren profielen (aanpassing in FM2PROF software)

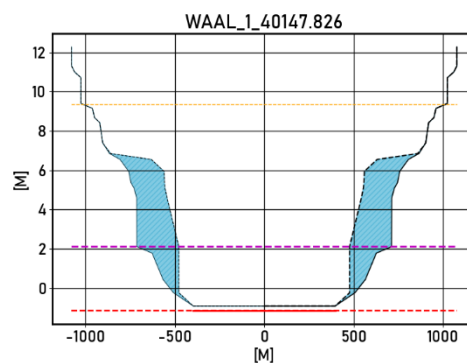
Dit onderzoek beschouwd een alternatief criterium voor stroomvoering in FM2PROF. Het huidige criterium leidt voor diverse profielen tot onderschattingen en overschattingen van het bergend volume. Met het alternatieve criterium wordt gepoogd dergelijke profielen te verbeteren. De methodeanalyse en eerste testen staan beschreven in paragraaf 2.4 van de bijgevoegde memo Berends, Maas en Gensen (2024) in Bijlage A. Vervolgens is er een verschilanalyse met zowel het 2D model als het 1D model met de oude profielen (FM2PROF 2.2) uitgevoerd (Maas, 2024). Deze is toegevoegd als Bijlage B. In de hoofdtekst zijn de probleemstelling en belangrijkste conclusies beschreven.

Probleemstelling en aanpassingen in stroomvoeringscriteria

Tijdens het operationeel gebruik van *sobek-rijn-j22_6-v1a1* is lokaal een negatief verhang ('omhoog stromend water') waargenomen ter hoogte van overnachtingshaven IJzendoorn (zie Figuur 2.1). Uit bestudering van de door FM2PROF gemaakte profielen (met name "waal_1_40147.826") blijkt dat de 'Main Section Width' – de breedte waarover de zomerbedruwheid geldt – voor sommige profielen aanzienlijk groter is dan bij omliggende profielen. Rondom *waal_1_40147.826* is een stroomvoerende breedte van 250-300 meter normaal, terwijl dit profiel een stroomvoerende breedte heeft van bijna 1000 meter (Figuur 2.2).



Figuur 2.1 De Waal ter hoogte van IJzendoorn. Ten noorden van de hoofdgeul is de overnachtingshaven IJzendoorn te zien.



Figuur 2.2 Profiel *Waal_1_40147.826*. Het blauw gearceerde deel is bergend oppervlak.

In de rapportage van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (Maas, Gensen en Berends (2023), paragraaf 2.1.4) is dit probleem uitgeschreven en zijn potentiële verbeterpunten aangedragen. Omdat dit probleem in stroomvoerende breedte niet beperkt bleef tot dit profiel, was de aanbeveling om de stroomvoercriteria in FM2PROF te bestuderen om zo een duurzame oplossing te vinden. In voorliggend onderzoek wordt deze analyse uitgevoerd.

In FM2PROF 2.2.8 en lager zijn de stroomvoeringscriteria als volgt. Een cel wordt aangemerkt als stroomvoerend indien:

- De waterdiepte groter is dan nul EN
- De stroomsnelheid groter is dan het absolute stroomvoeringscriterium EN
- De stroomsnelheid groter is dan de gemiddelde stroomsnelheid maal het relatieve stroomvoeringscriterium.

Voor de nieuwe methode is besloten om het absolute stroomcriterium te laten vervallen en berging te laten bepalen op een percentage van de *maximale* stroomsnelheid. Deze methode zorgt er zowel voor dat voorkomen wordt dat profielen te weinig bergend volume hebben als dat profielen juist te veel bergend volume toegewezen krijgen. Dit geldt op de op takken die enkel onder hoge afvoer meestromen zoals Reevediep en het Julianakanaal (Maas).

Het nieuwe stroomvoeringscriterium is dus als volgt. Cellen zijn stroomvoerend indien:

- De waterdiepte groter is dan nul EN
- De stroomsnelheid groter is dan $x\%$ van de maximale stroomsnelheid² op die uitvoertijdstep, waarbij 'x' het relatieve stroomvoeringscriterium is OF de stroomsnelheid is groter dan 'y', waarbij 'y' het absolute stroomvoeringscriterium is.

Deze nieuwe methode noemen we de '*max_method*' en de huidige methode (in FM2PROF 2.2.8 en lager) de '*mean_method*'.

Aanpassing FM2PROF

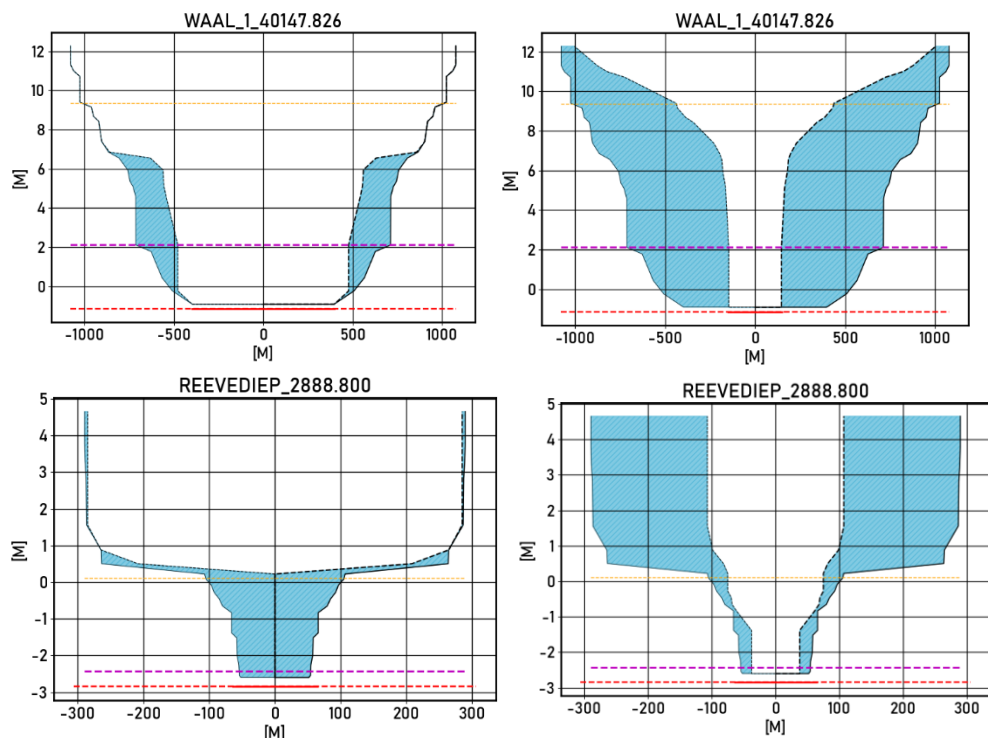
In FM2PROF 2.3 is deze nieuwe '*max_method*' optie geïmplementeerd om dwarsprofiel specifieke data uit te voeren. Hierdoor kunnen op dwarsprofielniveau testen worden uitgevoerd met een methodische aanpassing voor stroomvoeringsbepaling. Vervolgens is een testbank samengesteld van verschillende type profielen om het effect van een aanpassing te testen (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Testbank dwarsprofielen in FM2PROF 2.3.

Model	Profielnaam	Beschrijving
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	waal_1_40147.826	Waal ter hoogte van overnachtingshaven IJzendoorn
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	nederrijn_20011.855	Nederrijn ter hoogte van rkm 899 – standaard rivierprofiel
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a1</i>	veessenwapenveld_3519.948	Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a1</i>	twentekanaal_941.714	Twentekanaal – zijtak met relatief weinig stroming
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a1</i>	reevediep_2888.800	Reevediep – met weinig stroming aan begin van de som
<i>sobek-rijn-j22_6-v1a1</i>	ketelmeer02_0.000	Profiel in het Ketelmeer

² Om de kans op uitschieters te verkleinen wordt het gemiddelde over de drie grootste stroomsnelheden genomen (max3)

De verandering van de methodiek leidt hierdoor in sommige gevallen tot meer stroomvoering en in andere tot minder. In Figuur 2.3 zien we hoe deze aanpassing doorwerkt in de aangemaakte profielen. In het Waalprofiel is te zien dat de stroomvoering sterk is verminderd onder in het profiel: van bijna 1000 meter tot 300 meter. De totale breedte blijft onveranderd. De vluchthaven is aangetakt en voorziet daarom wel in een bergend effect. De overige figuren uit de testbank zijn opgenomen in Bijlage B van Berends, Maas & Gensen (2024) (zie Bijlage A).



Figuur 2.3 Profielen aangemaakt met de conveyance methode op de 'mean_method' (links) en 'max_method' (rechts) manier.

Effect op modelresultaten

Aangezien deze aanpassing niet enkel beperkt blijft tot de profielen in de testbank, maar deze alle profielen in het riviersysteem beïnvloedt is er een verschilanalyse uitgevoerd om te controleren of de nieuwe methode niet tot onverwachte wijzigingen leidt. Dit is gedaan door een ongekalibreerde vergelijking met het 2D model (*dlfowfm2d-rijn-j22_6-v1a*) en *sobek-rijn-j22_6-v1a2* uit te voeren. In de hoofdttekst zijn enkel de conclusies opgenomen. De volledige verschilanalyse is opgenomen in Bijlage B.

Waterstanden en afvoer

Bij het vergelijken van 1D met 2D komen de resultaten van de (ongekalibreerde) waterstanden op alle drie de Rijntakken beter overeen wanneer de nieuwe methode (*max_method*) wordt gebruikt dan wanneer de oude methode (*mean_method*) wordt gebruikt. Met de nieuwe profielen neemt de waterstand toe t.o.v. de *mean_method*. Dit komt doordat de nieuwe methode over het algemeen aan de "gewone" rivierprofielen een groter percentage bergend toewijst. Een inspectie van de langspromen laat geen onverwachte pieken zien bij het gebruik van de nieuwe methode, waardoor verwacht wordt dat de waterstandsverschillen grotendeels weg gekalibreerd kunnen worden.

Afvoerverdeling

Voor de afvoerverdeling zien we met de nieuwe profielen een verandering bij alle vier de locaties. Voor de Pannerdensch Kop en de IJsselkop zijn deze echter niet dusdanig groot dat deze niet met een kalibratie verkleind kunnen worden. De afvoeren door Veessen-Wapenveld en het Reevediep verschilden met gebruik van de *mean-method* sterk tussen *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en het 2D model (*dflowfm2d-j22_6-v1a*) als gevolg van onnauwkeurige profielen in het 1D model (Berends, Maas & Gensen, 2024) (Bijlage A). De ongekalibreerde resultaten met de nieuwe profielen laten bij Veessen-Wapenveld een significant verschil zien: er stroomt meer water door Veessen-Wapenveld t.o.v. de IJssel en de resultaten liggen dichterbij de 2D-resultaten. Voor het Reevediep zijn er met de nieuwe profielen geen grote veranderingen te zien in de afvoer t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*, enkel een kleine toename bij hoge afvoeren. In het gebruikte 2D model staat het Reevediep nog dicht.

Ook de problematische profielen die opgenomen waren in de testbank (o.a.. IJzendoorn en Reevediep) laten betere uitkomsten zien door de nieuwe methode van profielgeneratie, met name bij hoge afvoeren. De grootste winst lijkt behaald te zijn bij de profielen die in de oude methode als te veel stroomvoerend werden geclassificeerd.

De nieuwe methode is vanaf FM2PROF 2.3 de *default* manier om profielen te maken. De oude methode is nog steeds beschikbaar via een instelling in de FM2PROF configuratie.

2.1.3 Effect en aanpassing van gebiedsvakken IJssel, Reevediep en Veessen-Wapenveld op het genereren van profielen

Tijdens het onderzoek naar de nieuwe methode voor het genereren van profielen (paragraaf 0) zijn er enkele profielen aan het licht gekomen die t.o.v. de werkelijke situatie te smal of te breed zijn in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en in voorgaande versies. Dit heeft als gevolg dat deze profielen ervoor zorgen dat er te weinig afvoer of juist te veel afvoer over de takken gaat. Dit lag vermoedelijk ten grondslag aan het niet nauwkeurig kunnen kalibreren van de afvoeren over het Reevediep en Veessen-Wapenveld in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en in voorgaande versies.

Bij het genereren van de profielen wordt gebruikgemaakt van zogenaamde gebiedsvakken die resultaten van de 2D afleidsom verdelen aan de hand van de SOBEEK takken. Waar de grenzen van de gebiedsvakken liggen is bepalend voor de uiteindelijke breedte van het profiel. Controle van de gebiedsvakken wijst uit dat de gebiedsvakken Reevediep en Veessen-Wapenveld aan respectievelijk de bovenstroomse en benedenstroomse rand niet (meer) goed overeenkomen met de werkelijke situatie (Figuur 2.4 & Figuur 2.6). Dit heeft grote invloed op de profielen dichtbij de rand van het gebiedsvak, waardoor de modelresultaten worden beïnvloed. Deze controle is uitgevoerd m.b.v. de stromingspatronen in de 2D-afleidsom.

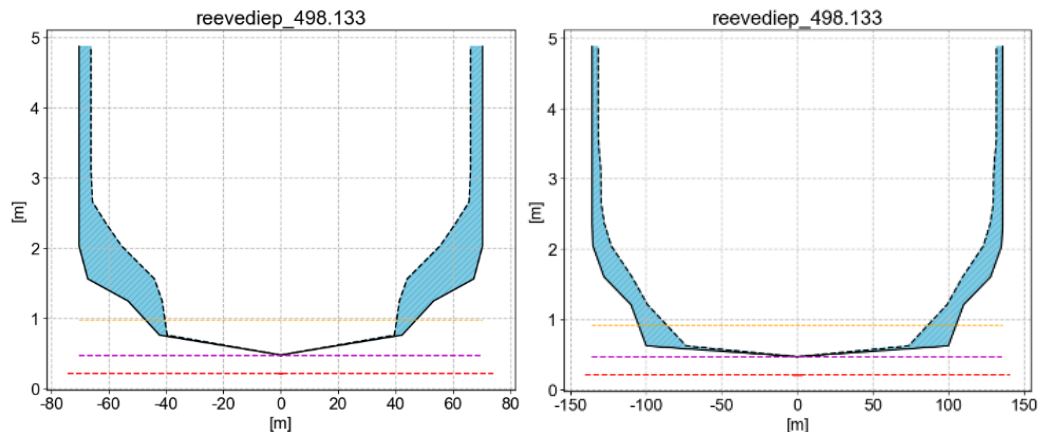
Aanpassing van gebiedsvakken

De huidige gebiedsvakken zijn afgeleid tijdens de Rijn pilotstudie (Berends, Domhof en Visser, 2022) en daarna niet meer gewijzigd. Bij de bouw van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* is het Reevediep “open” gezet, zodat het meestroomt bij hoge afvoeren. Hierdoor is het belangrijker geworden dat de profielen op het Reevediep zo gegenereerd worden dat de correcte afvoeren door het Reevediep kunnen stromen. Bij de validatie van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* bleek dat de afvoer door het Reevediep zo'n 200 m³/s te laag is in vergelijking met 2D en dit niet rechtgetrokken kon worden door kalibratie.

In de huidige gebiedsvakken ligt de grens tussen de gebieden IJssel en Reevediep op de voormalige IJsseldijk. Na het openen van het Reevediep dient het gebiedsvak in oostelijke richting verlegd te worden naar de inlaatdrempel (Figuur 2.4). Hierdoor ontstaat er meer ruimte rondom het profielpunt *Reevediep_498.133* waardoor de profielgeneratie in FM2PROF niet meer beperkt wordt door de grenzen van het gebiedsvak. Het nieuwe profiel heeft nu een breedte van 250 m wat overeenkomt met de brug (N763) over het Reevediep net benedenstrooms en dus overeenkomt met de werkelijke doorstroombreedte (Figuur 2.5).



Figuur 2.4 Gebiedsvakken IJssel en Reevediep. Links de gebiedsvakken als gebruikt bij *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en voorgaande versies. Rechts de aangepaste gebiedsvakken waar de grens op de inlaatdrempel gelegd is. In paars de fixed weirs uit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.



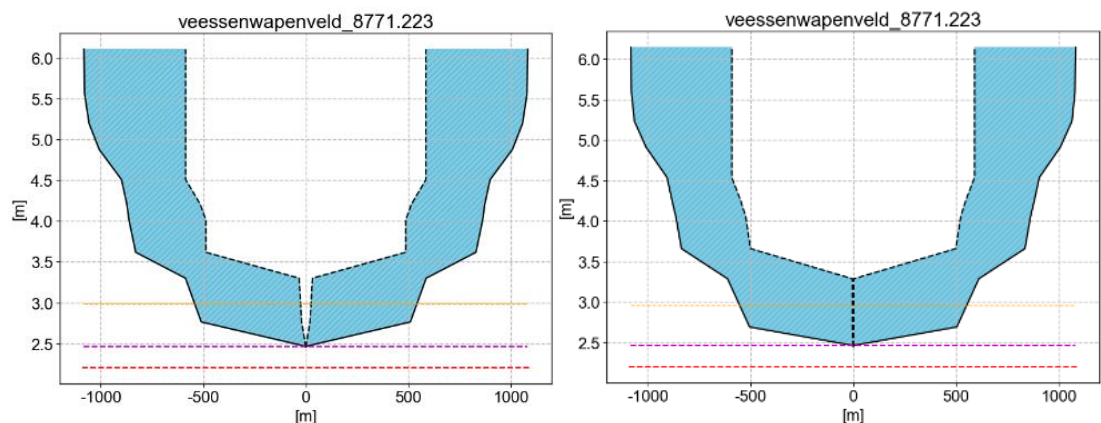
Figuur 2.5 Links: profiel met huidige gebiedsvakken. Rechts: profiel met nieuwe gebiedsvakken.

Profielen benedenstrooms op de tak Veessen-Wapenveld worden juist als te breed gegenereerd waardoor er mogelijk te veel afvoer over de tak stroomt i.p.v. naar de IJssel. Dit is enkel het geval bij de benedenstroomse profielen *veessenwapenveld_8771.223* en *veessenwapenveld_9248.611*. Dit komt doordat er in de 2D afleidsom initieel water op het maaiveld staat in het westelijke deel van het gebiedsvak. Dit water wordt bij het genereren van de profielen beschouwd als bergend volume van het profiel. Dit water is echter afkomstig uit de IJssel dat bij hoge afvoeren ter hoogte van Hattum in bovenstroomse richting naar Veessen-Wapenveld stroomt. Deze stroming is in 1D niet mogelijk en zal dus ook niet bij de desbetreffende Veessen-Wapenveld profielen meegenomen moeten worden.

De vergelijking met het stromingspatroon van de 2D afleidsom laat echter zien dat de breedte van het profiel wel verklaarbaar is. Bij afvoeren groter dan 13.000 m³/s te Lobith (waterstand Veessen-boven ≥ 5.65 m +NAP) stroomt het water vanaf de uitlaat van de hoogwatergeul uit over een breed gebied. Om het 2D model te volgen dienen daarom de profielen op deze locatie een vergelijkbare breedte te hebben. Daarom is er enkel een kleine aanpassing gedaan aan het gebiedsvak Veessen-Wapenveld om de stroomlijnen beter te volgen (Figuur 2.6). Het resultaat is dat de profielen niet aantoonbaar gewijzigd zijn t.o.v. van het gebiedsvak gebruikt in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (zie Figuur 2.7).



Figuur 2.6 Gebiedsvakken IJssel en Veessen-Wapenveld. Links de gebiedsvakken als gebruikt bij *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en voorgaande versies. Rechts de aangepaste gebiedsvakken waar de grens op de inlaatdrempel gelegd is. In paars de fixed weirs uit *dflowm2d-rijn-j24_6-v1a*.



Figuur 2.7 Profielen voor VeessenWapenveld_8771.223. Links: profiel met huidige gebiedsvakken. Rechts: profiel met nieuwe gebiedsvakken.

Naast de weergegeven profielen zijn meerdere profielen tot op zekere hoogte beïnvloed door de aanpassing van de gebiedsvakken t.o.v. de profielen in *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Enkel profielen dichtbij de aanpassing (op minder dan een kilometer afstand) zijn aangepast. In totaal gaat het om 16 profielen verdeeld over de IJssel, Veessen-Wapenveld en het Reevediep. Om te controleren of de aangepaste profielen niet tot onwenselijke en onverwachte resultaten leiden is er een verschilanalyse uitgevoerd met het 2D model (*dflowm2d-rijn-j22_6-v1a*) en het 1D model (*sobek-rijn-j22_6-v1a2*). Hieronder worden de belangrijkste conclusies beschreven. De verschilanalyse en de beïnvloede profielen zijn opgenomen in Bijlage C.

Conclusies

Door twee wijzigingen aan te brengen aan de gebiedsvakken – 1) ter hoogte van de inlaat Reevediep en 2) ter hoogte van de uitlaat Veessen-Wapenveld – is de breedte van 16 profielen gewijzigd. De verandering van de profielen verschilt van enkele meters tot tientallen meters in vergelijking met de huidige gebiedsvakken, die gebruikt zijn voor *sobek-rijn-j22_6-v1a1* en *-v1a2*. Visuele controle laat zien dat de profielen nu beter overeenkomen met de werkelijke situatie dan voorheen.

Daarnaast tonen de ongekalibreerde vergelijkingen (1D vs 2D) en (1D vs 1D) geen onverwachte wijzigingen in de waterstanden en afvoeren. De wijzigingen die optreden door aanpassing van de profielen zijn als verwacht:

- Er stroomt meer water door het Reevediep vanaf het moment dat er water over de inlaatdrempel stroomt, doordat het eerste profiel (*Reevediep_498.133*) nu 100 meter breder is. Hierdoor is het profiel nu niet meer beperkend voor de afvoer naar het Reevediep.
- De profielen op de tak Veessen-Wapenveld zijn niet noemenswaardig veranderd. Wel zien we bij hoge afvoeren (> 3200 m³/s op de IJssel) een verlaging van de afvoer. Deze verlaging kan toegewezen worden aan de nieuwe profielaanmaak methode waardoor er nu netto meer berging aanwezig is in de profielen.

Beide wijzigingen zijn meer in lijn met de waterstanden en afvoerverdeling in de 2D resultaten.

Aan de hand van de bovenstaande bevindingen is besloten om de aangebrachte wijzigingen in de gebiedsvakken te gebruiken bij de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1*.

2.2 Aanpassingen aan schematisatie

Het 1D model wordt geheel gebaseerd op het 2D model. In principe is de naamgeving van objecten, randvoorwaarden en het RTC model (tenzij niet mogelijk) identiek aan die van het 2D model. Bij de bouw van het geactualiseerde 2D model (*dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*) is er gebruikt gemaakt van de geüpdatet Baselineschematisatie: *baseline-nl_land-j24_6-v1*. Dit betreft aanpassingen aan de bathymetrie, vegetatie en grootschalige winterbedaanpassingen. Naast de doorgevoerde aanpassingen in Baseline is in de 2D schematisatie een nieuwe vaste laag bij Spijk opgenomen met ruwheidscode 2033, aansluitend op de nieuwe overnachtingshaven Spijk. Deze vaste laag is in de *sobek-rijn-j24_6-v1a1* actualisatie niet expliciet meegenomen. De volledige aanpassingen staan beschreven in van den Hoek (2024) hoofdstuk 2 en bijbehorende bijlage: A.1 (Van Renswoude, Vos, & Beyer, 2024), bijlage A.2 (*aangeleverde Baseline maatregellijsten*) en bijlage B (*Ruwheid vaste laag Spijk*).

Verder zijn bij de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* zijn de volgende specifieke 1D aanpassingen doorgevoerd aan de schematisatie en is de volgende nabewerking van de resultaten gedaan:

2.2.1 1D-2D mapping in FM2PROF

De eerste aanpassing betreft een kleine bug-fix in FM2PROF. Voorheen bleek dat er langs de IJssel incorrecte afvoerraaien uit het 2D model werden gebruikt ter validatie van het 1D model.

De aanpassingen in de gebruikte 1D-2D map file, die gebruikt is tijdens de validatie met FM2PROF, zorgen er voor dat de 1D uitvoerpunten overal correct gekoppeld zijn aan de overeenkomende 2D uitvoerpunten.

De aangepaste map file is vanaf nu onderdeel van de mappenstructuur van de huidige en toekomstige Sobek-rijn modellen.

2.2.2 RTC sturing voor leeglopen Veessen-Wapenveld na hoogwater

Vanaf een waterstand van 5,65 m +NAP bij *IJ_961.2_L_ov_Inlaat-Veessen-boven* gaat de inlaat open en stroomt de hoogwatergeul mee wat zorgt deze voor een verlaging van de waterstand bovenstrooms van Wapenveld. Wanneer de waterstand weer daalt blijft er in het model (*sobek-rijn-j22_6-v1a2* en voorgaande versies) water in de geul staan. In werkelijkheid stroomt de hoogwatergeul leeg via een uitwateringssluis, via duikers en m.b.v. gemaal Doornbos. Tijdens operationeel gebruik binnen RWsOS is het niet wenselijk dat er na een hoogwater water blijft staan in de geul, omdat het effect van de geul hierdoor onderschat wordt.

Bij de modelbouw van *sobek-rijn-j22_6-v1a1* (Berends, Domhof, & Visser, 2022) is dit probleem reeds onderzocht en is er voor gekozen om twee lateralen toe te voegen die gebruikt kunnen worden om de geul leeg te pompen door het opleggen van een negatieve afvoer. Dit bleek tijdens gebruik echter geen praktische oplossing. Daarom is er dit jaar voor gekozen om de bestaande lateraal "Leegloop_hoogwatergeul_VW" te koppelen aan een RTC sturing (*VeWa_leegloop*). Een soortgelijke RTC sturing was eerder al onderdeel van *sobek-rijn-j19_5-v1* (Agtersloot, Michels, & Van der Veen, 2019).

Voorwaarden RTC

Voor de werking van de RTC zijn de volgende besluiten genomen:

- De RTC wordt aangestuurd door het observatiepunt met de laagste bodemhoogte. Dit is observatiepunt *VW_968.00* met een initiële bodemhoogte van 1,35 m +NAP.

- Het uitstroompunt blijft op dezelfde locatie liggen als aangebracht in *sobek-rijn-j22_6-v1a1* (Berends, Domhof & Visser, 2022). Dit is profiel *veessenwapenveld_6384.280*.
- Het water stroomt niet terug naar de IJssel. In overleg met de gebruikers van de operationele modellen is besloten om het uitgepompte water niet terug te laten stromen naar de IJssel. Dit zorgt mogelijk voor foutieve waterstanden op de IJssel en is niet wenselijk. Het water uit Veessen-Wapenveld verdwijnt dus uit het model.
- De uitstroom volumes zijn gebaseerd op de werkelijke situatie ter verifieerbaarheid van de functionaliteit. De waterstanden zijn gebaseerd op gegevens van het waterschap (Vallei en Veluwe, 2024). Dit resulteert in de uitstroom debieten die zijn opgenomen in de lookupTable *ontrekken1* (Tabel 2.3).

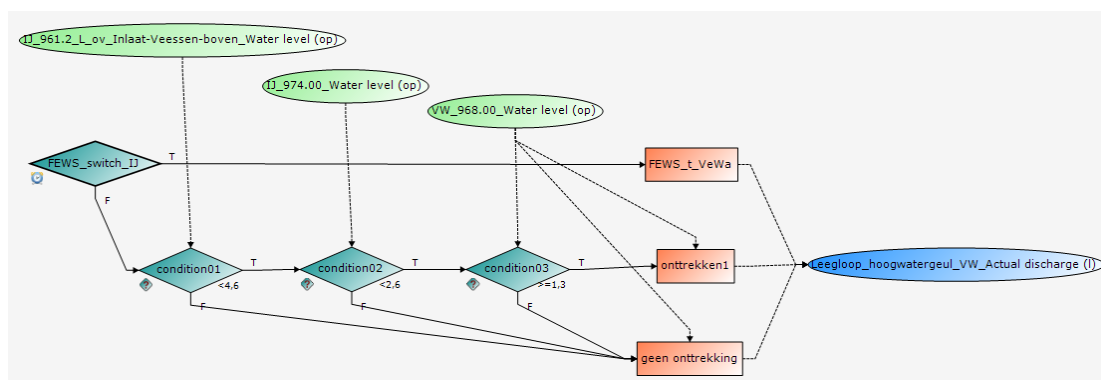
Tabel 2.3 Aangepaste sturing voor uitpompen Veessen-Wapenveld.

Waterstand (m +NAP)	Debiet (m ³ /s)	Motivatie
≤ 1,35	0	Minimale bodemhoogte; VW is droog
< 1,6	-2,9	Maximale capaciteit van gemaal Doornbos
≥ 1,6	-12	Aannemelijke capaciteit van uitwateringssluis gegeven de waterstand en gemiddelde stroomsnelheid

De RTC structuur is gebaseerd op de structuur zoals gepresenteerd in Agtersloot, Michels & van der Veen (2019). De condities waaraan voldaan moet worden zijn gecontroleerd en zijn in overeenstemming met de werkelijke situatie. Voordat de RTC actief wordt, moet worden voldaan aan de volgende voorwaarden:

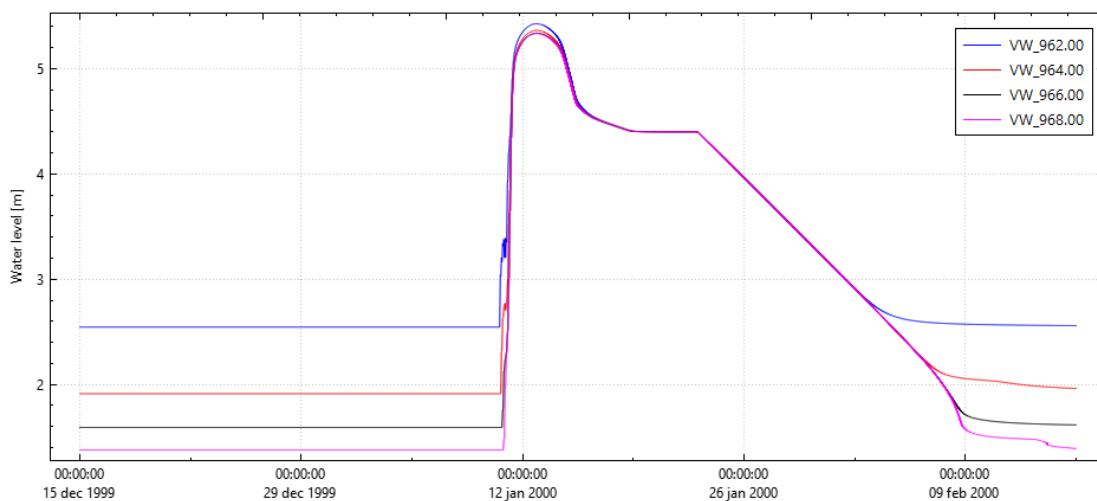
- De waterstand bij observatiepunt *IJ_961.2_L_ov_Inlaat-Veessen-boven* is lager dan 4,60 m +NAP. Inlaat Veessen-Wapenveld is weer dicht bij deze waterstand.
- De waterstand bij observatiepunt *IJ_974.00* is lager dan 2,60 m +NAP.
- De waterstand bij observatiepunt *VW_968.00* is hoger dan 1,30 m +NAP.

Wanneer één van de voorwaarden niet gehaald wordt, wordt er geen water uit de hoogwatergeul gepompt. Daarnaast is er een FEWS-switch toegevoegd, zodat de RTC ook in RWsOS te gebruiken en aan te passen is. De RTC-structuur is weergegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.8 RTC-sturing VeWa_leegloop.

Met de ingebouwde RTC loop de hoogwatergeul leeg wanneer het water op de IJssel weer zakt. In Figuur 2.9 is voor verschillende observatiepunten weergegeven hoe de hoogwatergeul leegloopt.



Figuur 2.9 Leeglopen hoogwatergeul Veessen-Wapenveld na een hoogwatergolf.

Deze functionaliteit is niet opgenomen in *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*, hiermee verschillen beide modellen in de schematisatie en functionaliteit. Het inbouwen van de nieuwe RTC “VeWa_leegloop” heeft geen consequenties voor de modelkalibratie aangezien de condities om de leegloop te starten niet gehaald kunnen worden in de gebruikte kalibratiesom.

2.2.3 RTC sturing Aanpassing RTC Driel

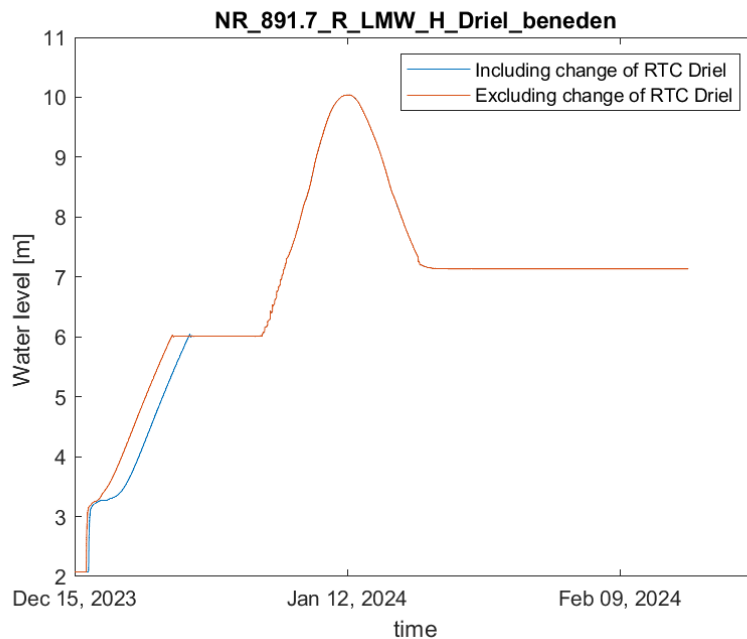
Bij de bouw van *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* is er een aanpassing in de RTC Driel doorgevoerd ter verbetering van de stuwsturing bij lage afvoeren. Een uitgebreide beschrijving van de wijzigingen in het stuwprogramma is terug te vinden als bijlage C van het rapport over de bouw van *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* (Van den Hoek, 2024) onder de naam: *Implementatie WKC Amerongen en wijziging stuwprogramma Driel*. Deze aanpassing is daarna ook overgenomen in de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* en wordt hieronder beschreven.

De stuw bij Driel stuurt bij hoge waterstanden op de waterstand bij Driel-Boven en bij lage waterstanden op afvoeren door de Nederrijn. Het streefpeil of de streefafvoer hangt in de huidige modelschematisatie (*sobek-rijn-j22_6-v1a2*) af van de waterstand bij Lobith. Hierdoor kan echter de sturing worden beïnvloed door eventuele veranderingen in de relatie tussen de waterstand bij Lobith en de waterstand bij Driel-Boven (of de afvoer naar de Nederrijn) bij lage afvoeren. Om de sturing bij lage afvoeren robuuster te maken is er voor gekozen om de het stuwcomplex aan te sturen op basis van de waterstand bij Driel-Boven. Dit betekent dat in het model de volgende wijzigingen hebben plaatsgevonden (wijziging voor *DrielL* en *DrielR* zijn exact hetzelfde):

- Input Stuwprogramma_DrielQ verandert naar NR_891.2_R_LMW_H_Driel-boven_Waterlevel in plaats van BR_862.2_R_LMW-H_Lobith_Waterlevel
- Bijbehorende wijziging in stuwprogramma_DrielQ.

Het effect van deze wijziging is te zien in Figuur 2.10. Hier is te zien dat na de wijziging in de RTC sturing de stuw wat later reageert op veranderingen bij lage waterstanden. Dit komt omdat de sturing nu gebaseerd is op basis van de waterstand bij *NR_891.2_R_LMW_H_Driel-boven_Waterlevel* in plaats van bij *BR_862.2_R_LMW-H_Lobith_Waterlevel*. Dit betekent dat de sturing gebaseerd is op een locatie verder benedenstroom en daarom wijzigingen bij de rand van het model pas later opmerkt en dus later reageert.

Deze wijziging heeft verder geen invloed op de waterstanden bovenstrooms van de stuw Driel en benedenstrooms zijn, behalve de vertraging in de RTC-sturing, de waterstanden ook gelijk aan de oude situatie.



Figuur 2.10 Waterstand voor (oranje) en na (blauw) de wijziging in RTC sturing bij Driel.

2.2.4 RTC sturing WKC Amerongen

Bij de bouw van *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* is er een aanpassing gedaan in het stuwprogramma van de RTC WKC Amerongen. Een uitgebreide beschrijving van de wijzigingen in het stuwprogramma is terug te vinden als bijlage C van het rapport over de bouw van *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* (Van den Hoek, 2024) onder de naam: *Implementatie WKC Amerongen en wijziging stuwprogramma Driel*. De aanpassing is daarna ook overgenomen in de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* en deze wordt hieronder beschreven.

In de huidige modelschematisaties (*sobek-rijn-j22_6-v1a2* en eerder) zijn de waterkrachtcentrale en de vistrap bij Amerongen wel opgenomen in het model, maar ze staan op dit moment altijd dicht. Dit komt doordat de sturingsregels voor de WKC nog niet zijn geïmplementeerd en omdat de vistrap te smal is om goed op het rooster te projecteren. In praktijk hebben de werking van de waterkrachtcentrale en de vistrap echter invloed op de afvoer door de stuw en zouden deze daarom wel mee genomen moeten worden in de modelschematisatie.

In de huidige modelschematisatie werkt de sturing van de stuw bij Amerongen als volgt:

- Bij een positief verval en een waterstand van minder dan 11.45 m +NAP bij Lobith controleert de stuw de waterstand bij Amerongen volgens het stuwprogramma.
- Bij een negatief verval of een waterstand bij Lobith van meer dan 11.45 m +NAP en een waterstand van minder dan 6 m +NAP bovenstrooms van de stuw gaat de stuw open tot een hoogte van 7 m +NAP.
- Bij een negatief verval of een waterstand bij Lobith van meer dan 11.45 m +NAP en een waterstand van meer dan 6 m +NAP bovenstrooms van de stuw gaat de stuw open tot een hoogte van 17.4 m +NAP.

In de praktijk beïnvloedt de WKC bij Amerongen ook de sturing van de bogen. De voorwaarden waar de implementatie van de WKC aan moet voldoen zijn:

- Bij een verval van minder dan 70 cm over het stuwcomplex, wat betekent dat de stuw helemaal openstaat, sluit de WKC.
- Bij een afvoer van minder dan 25 m³/s door het stuwcomplex sluit de WKC.
- In het geval dat het stuwcomplex aan het sturen is op waterstanden staat de WKC volledig open en gaat er altijd 400 m³/s door de WKC heen.
- In alle andere gevallen neemt de WKC de sturing (op waterstanden) over van de stuw en sluit de stuw.

Uit de laatste voorwaarde volgt dat in de sturing van de stuw de volgende voorwaarde toe moet worden gevoegd:

- Als de afvoer door het stuwcomplex tussen de 25 en 400 m³/s is, sluit de stuw.

Dit betekent dat in de modelschematisatie de volgende wijzigingen plaatsvinden.

Voor de RTC-sturing voor AmerongenR:

- Regel *AmerongenR_closed* toegevoegd.
- Voorwaarden *AmerongenR_High_Discharge_WKC* en *AmerongenR_low_Discharge_WKC* toegevoegd.
- Input *NR_891.7_R_LMW-H_Driel_beneden_Discharge (op)* toegevoegd.
- *FEWS_switch_AmerongenR* nu wanneer uit naar *AmerongenR_Low_Discharge_WKC* in plaats van naar *AmerongenR_test_negatief_verval*.

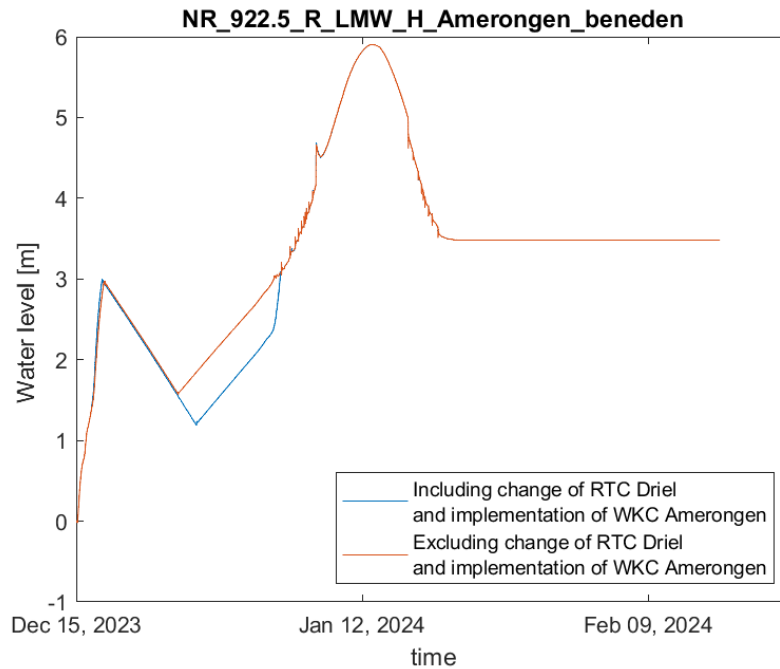
Voor AmerongenL:

- Regel *AmerongenL_closed* toegevoegd.
- Voorwaarden *AmerongenL_High_Discharge_WKC* en *AmerongenL_low_Discharge_WKC* toegevoegd.
- Input *NR_891.7_R_LMW-H_Driel_beneden_Discharge (op)* toegevoegd.
- *FEWS_switch_AmerongenL* nu wanneer uit naar *AmerongenL_Low_Discharge_WKC* in plaats van naar *AmerongenL_test_negatief_verval*.

Ook is de RTC-groep AmerongenWKC toegevoegd aan het model.

In Figuur 2.11 is het effect van de wijziging te zien op de waterstand bij *NR_922.5_R_LMW_H_Amerongen_beneden*. Hier is te zien dat er een vertraging optreedt die te maken heeft met de wijziging van de RTC sturing bij stuw Driel (sectie 2.2.3).

Verder heeft de implementatie van de WKC een kleine invloed op de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms wanneer het stuwprogramma actief is. Het stuwprogramma wordt in de nieuwe implementatie deels overgenomen door de WKC in plaats van door de stuw, wat leidt tot kleine verschillen in de waterstand tot 5 cm voor een korte periode van 5 minuten. Echter, de implementatie van de WKC vermindert wel de fluctuaties in de waterstanden wanneer het stuwprogramma wordt gevolgd en de uiteindelijke waterstand blijft bovenstrooms en benedenstrooms gelijk. Wanneer het stuwprogramma niet actief is blijven de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms van het stuwcomplex onveranderd t.o.v. de situatie zonder WKC. De opgetreden waterstandswijzigingen zijn in lijn met de wijzigingen in het 2D Rijnmodel (Van den Hoek, 2024).



Figuur 2.11 Waterstand voor (oranje) en na (blauw) de wijziging in RTC sturing bij Driel en implementatie van WKC Amerongen.

2.2.5 Toevoegen LMW-stations

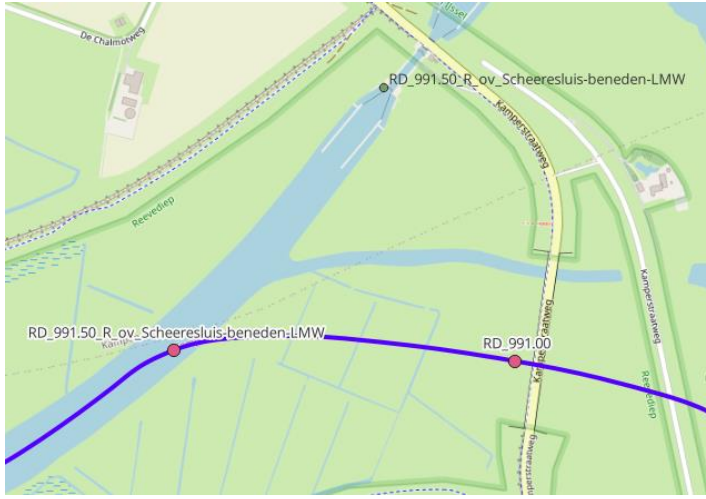
Vanuit operationeel gebruik ligt er de wens om voorspellingen te maken voor de volgende LMW-stations in het Reevediep, Drontermeer en Vossemeer:

- *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW*
- *DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord*
- *DM_70.90_L_LMW-H_Roggebotsluis-zuid-g6*
- *VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord*

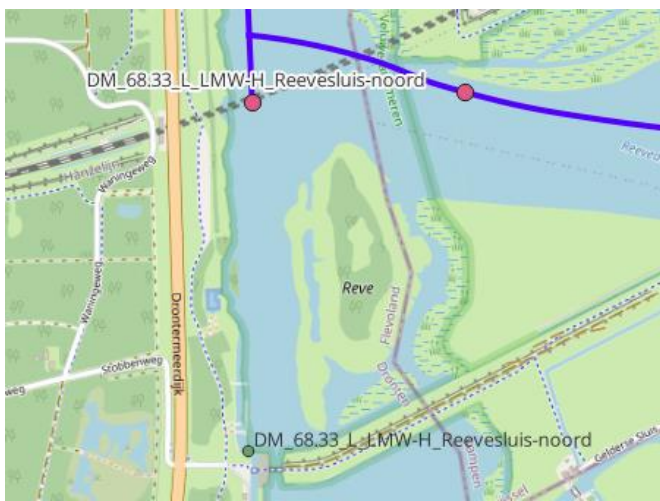
Deze LMW-stations zijn reeds onderdeel van het 2D model maar nog niet eerder overgenomen in voorgaande (RWsOS) 1D modellen. In *sobek-rijn-j24_6-v1a1* zijn deze stations toegevoegd volgens naamgeving en locatie in de 2D Baseline schematisatie.

De stations *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW* en *DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord* liggen in werkelijkheid buiten de bestaande *sobek-rijn-j24_6-v1a1* takkenstructuur. Aangezien observatiepunten in Sobek enkel aan een tak toegewezen kunnen worden zijn de locaties op het dichtstbijzijnde punt toegevoegd aan de tak (Figuur 2.12 en Figuur 2.13). *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW* is geplaatst op observatiepunt *RD_991.50* en *DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord* op de bovenstroomse rand (node) Reevemeer.

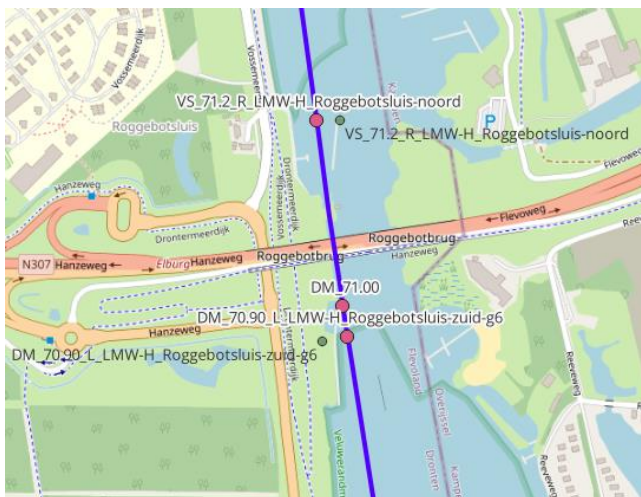
De LMW-stations Roggebotsluis Zuid en Noord zijn op dezelfde locatie toegevoegd als in 2D baseline (Figuur 2.14).



Figuur 2.12 Toevoegen van RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW. In rood de locatie in sobek-rijn-j24_6-v1a1 en in groen de Baseline locatie.



Figuur 2.13 Toevoegen van DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord. In rood de locatie in sobek-rijn-j24_6-v1a1 en in groen de Baseline locatie.



Figuur 2.14 Toevoegen van DM_70.90_L_LMW-H_Roggebotsluis-zuid-g6 en VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord. In rood de locatie in sobek-rijn-j24_6-v1a1 en in groen de Baseline locatie.

2.3 Genereren van profielen en ruwheden

De dwarsprofielen en ruwheden worden afgeleid van het 2D model met het programma FM2PROF (zie 1.2). Er is dit jaar ten opzichte van het vorige model gebruikt van een nieuwe versie van FM2PROF. Deze versie bevat een nieuwe optie om stroomvoering van berging te scheiden (0). Daardoor zijn de volgende parameters gewijzigd in het configuratiebestand voor FM2PROF:

```
ConveyanceDetectionMethod      = 1
AbsoluteVelocityThreshold      = 0.1
RelativeVelocityThreshold      = 0.15
```

Waarin `ConveyanceDetectionMethod` een nieuwe parameter is waarmee de nieuwe methodiek kan worden gebruikt (1 = nieuwe methode (*max_method*), 0 = oude methode (*mean_method*)). De twee stroomvoeringscriteria `AbsoluteVelocityThreshold` en `RelativeVelocityThreshold` hangen sterk samen met de methode voor stroomvoeringsbepaling. De bovenstaande waarden zijn bepaald op basis van het onderzoek naar de nieuwe methode (0).

Tot slot zijn vier invoerbestanden nodig: de resultaten van een 2D simulatie (2.3.1), de locaties waar een 1D dwarsprofiel en ruwheidspunt moet worden bepaald (2.3.2) en twee polygonen (2.3.3). Met deze invoerbestanden kan FM2PROF gedraaid worden (2.3.4).

2.3.1 2D afleidingssom voor FM2PROF

De zogenoemde 'afleidingssom' is een som die als doel heeft om profielen en ruwheden te genereren. Hiervoor is het van belang een zo uniform mogelijke stroming te creëren, zodat het hele profiel op elk punt in de rivier van boven tot onder doorlopen wordt. Hiervoor wordt een specifieke set randvoorwaarden gebruikt, die geen relatie heeft met randvoorwaarden die in het echt kunnen optreden. Daarnaast zijn er enkele bijzondere bepalingen voor de afleidsom:

- Het Real-Time Control (RTC) model is uitgeschakeld en alle stuwen en inlaatwerken zijn zo ingesteld dat deze maximaal geopend zijn. De regelwerken Pannerden en Hondsbroekse Pleij zijn onaangepast – deze hebben een vaste hoogte in het 2D model.
- De initiële conditie wordt aangemaakt door middel van een som met lage afvoer met een nabewerking op het BAS2FM initiële waterstandsveld.
- Voor de randvoorwaarden is gebruikt gemaakt van de speciale randvoorwaardenset met een langzaam oplopende afvoer op de bovenrand en fictieve Q(h) relaties benedenstrooms.

De methode om een 2D afleidsom te maken wordt in meer detail beschreven in (Berends, Domhof, & Visser, 2022).

2.3.2 Dwarsprofiellocaties

De dwarsprofiellocaties zijn bepaald met FM2PROF op basis van de 1D schematisatie. Hiervoor is in (Berends, Domhof, & Visser, 2022) gebruikt gemaakt van het hulpprogramma `GenerateCrossSectionLocationFile` in `fm2prof.utils`. Omdat er geen aanpassingen zijn geweest aan de takkenstructuur, is er voor *sobek-rijn-j24_6-v1a1* geen nieuw dwarsprofiellocatiebestand aangemaakt.

2.3.3 Gebieds- en sectievakken

Gebiedsvakken worden gebruikt om het gebied van zijtakken te scheiden van het hoofdwatersysteem. Dit jaar is een kleine aanpassing doorgevoerd aan de gebiedsvakken rondom de uitstroom van Veessen-Wapenveld en de instroom van het Reevediep (zie 2.1.3).

De sectievakken bepalen de welke 2D cellen gebruikt worden voor de bepaling van de winterbedruwheid. De sectiepolygoon is gecontroleerd op verschillen met die van j22_6, en hier zijn geen verschillen geconstateerd. Daardoor is dezelfde sectiepolygoon gebruikt als in (Berends, Domhof, & Visser, 2022).

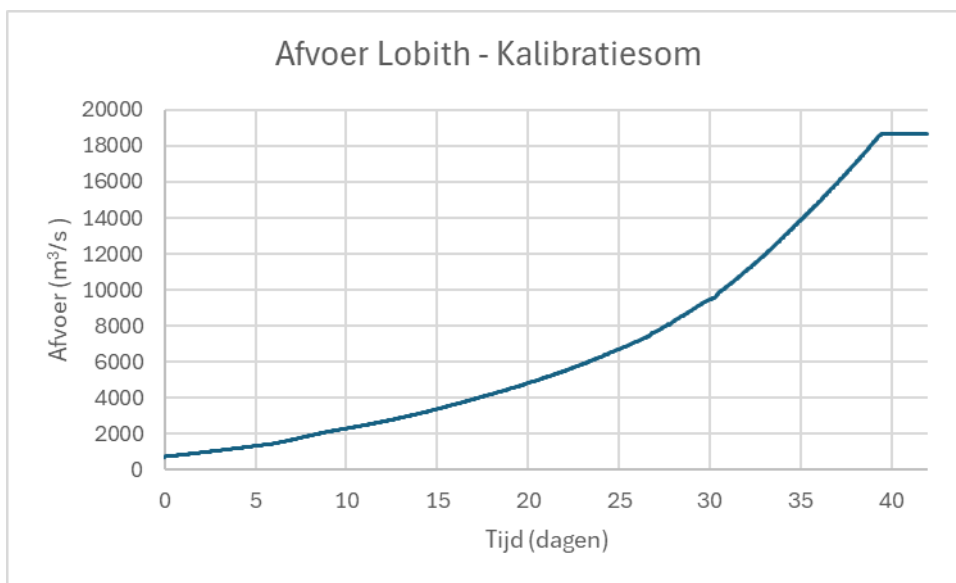
2.3.4 Draaien van FM2PROF

FM2PROF is vervolgens gedraaid. Er zijn 876 profielen en ruwheidspunten aangemaakt zonder foutmeldingen in ongeveer 5 minuten. Er werden 1131 waarschuwingen gegeven. Deze waarschuwingen betroffen voornamelijk meldingen dat de breedte van de ruwheidssectie 'main' moest worden vergroot, om te voorkomen dat deze smaller is dan het smalste profielpunt en dat er ontbrekende data aanwezig waren in het profiel. Ontbrekende data komen voor bij droogval. Dit heeft geen gevolgen voor de profielgeneratie. De controle op dwarsprofielen heeft plaatsvonden in het kader van het onderzoek beschreven in 0.

2.4 Ongekalibreerde vergelijking met 2D

Nadat de dwarsprofielen en ruwheden zijn aangemaakt, worden deze geïmporteerd in het 1D model, en wordt een berekening uitgevoerd met de 2D “kalibratiesom” – een olopende som zonder RTC Veessen-Wapenveld. De bijbehorende afvoer te Lobith is weergegeven in Figuur 2.15. De berekende waterstanden met het 1D model worden vergeleken met die van het 2D model. Dit noemen we een ‘ongekalibreerde vergelijking’, omdat we direct de zomer- en winterbedruwheden gebruiken uit FM2PROF.

Het doel van deze vergelijking is om fouten in de afleiding op te sporen. In het ideale geval, zien we een verschil tussen 1D en 2D, dat uniform is langs de rivier. Dat duidt op een consistente reproductie van 2D waterstanden. Het is bovendien aannemelijk dat een dergelijke algemene over- of onderschatting kan worden gecorrigeerd door een aanpassing in de ruwheidsparameters tijdens de kalibratie. Ziet men daarentegen plotseling verschillen en sterke gradiënten in het verschil, dan kan dit duiden op een probleem in de profiel- en ruwhedengeneratie (bijvoorbeeld een configuratiefout), schematisatiefout of een andere fout die nadere aandacht behoeft.



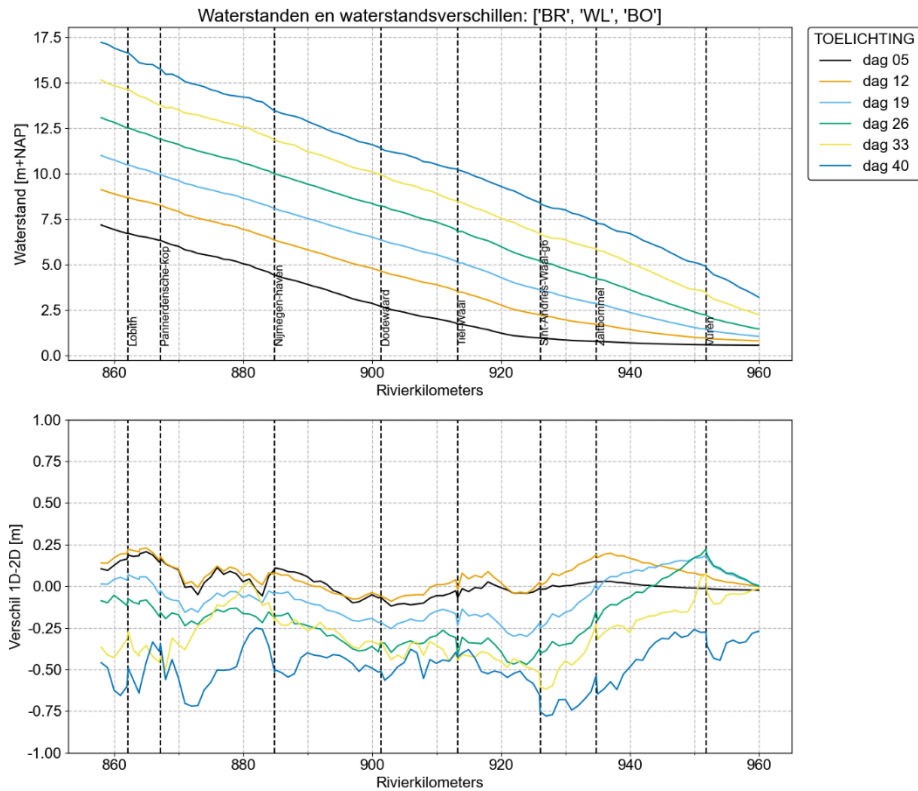
Figuur 2.15 Toenemende afvoer bij Lobith in de gebruikte kalibratiesom.

2.4.1 Waterstanden

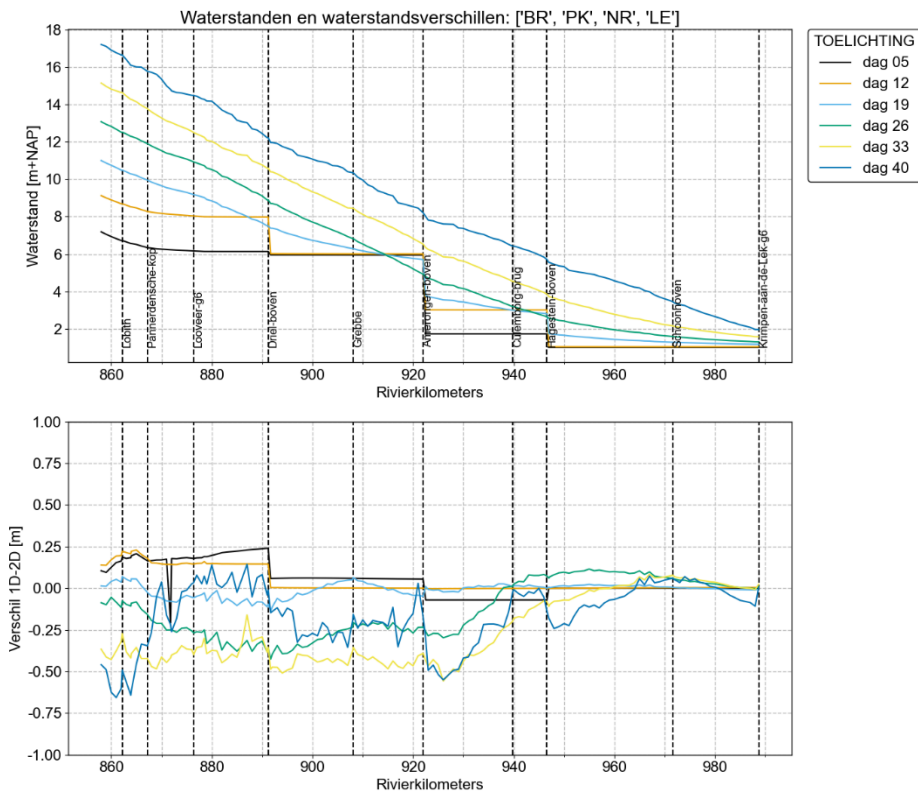
De gemiddelde afwijking tussen 1D en 2D zijn per tak weergegeven in Tabel 2.4. Over het algemeen zien we een onderschatting van de waterstanden in 1D, waarvan de grootste zichtbaar zijn op de Boven-Rijn, Waal en Nederrijn. Het waterstandsverschil tussen 1D en 2D is per afvoer weergegeven in langsrichting van de rivier (Figuur 2.16 – Figuur 2.18). In deze langsprofielen wordt gekeken naar plotselinge sprongen, die kunnen duiden op een foutief profiel. In de Boven-Rijn en Waal zien we bij WL_908 (Ijzendoorn) een daling in de waterstand terwijl dit profiel juist minder stroomvoerend volume heeft dan in j22. Op de Nederrijn ter hoogte van rkm 922 (invloed RTC WKC Amerongen) en op de IJssel bij rkm 879 (overgang PK – IJssel: IJsselkop) zijn wel sprongen zichtbaar bij de hogere afvoeren. Het geleidelijke verloop van het verschil tussen 1D en 2D kan middels kalibratie dan effectief verkleind worden. Over het algemeen zijn de waterstanden in 1D lager dan die in 2D, in toenemende mate bij hogere afvoeren. De uitzondering is de IJssel. Hier worden de waterstanden gemiddeld iets overschat, met name in het benedenstroomse deel.

Tabel 2.4 Waterstandsverschillen (standaardafwijking) met ongekalibreerd 1D model versus gekalibreerd 2D model.

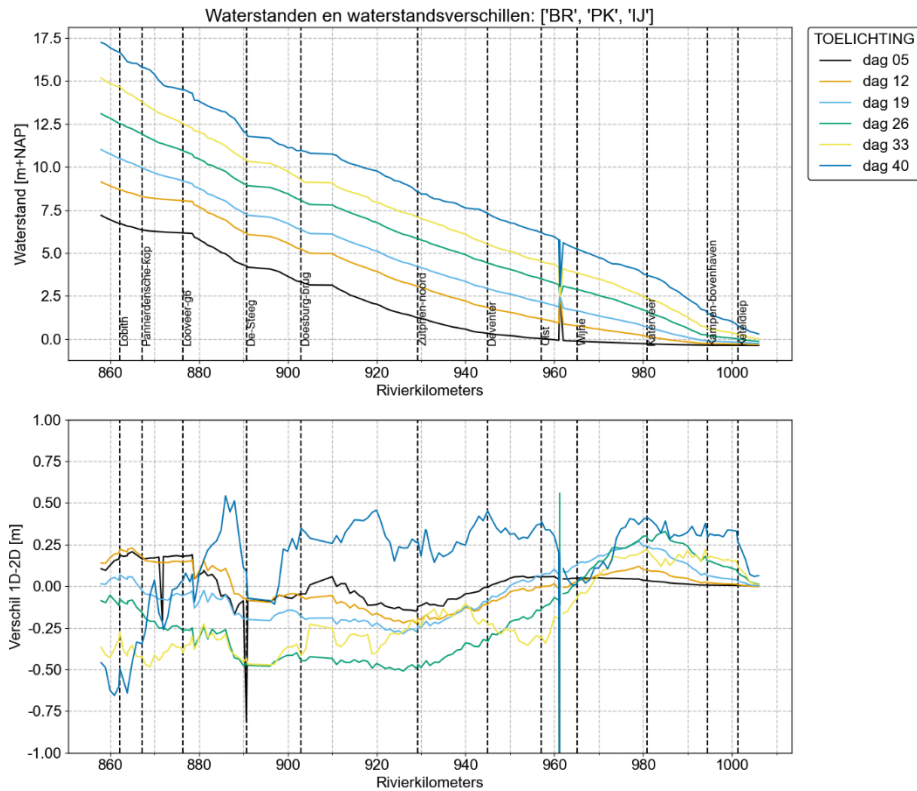
	sobek-rijn-j24-v1a1 vs dflowm2d-rijn-j24_6-v1a	
Tak	<i>Alle uitvoerpunten</i>	<i>LMW locaties</i>
Lek	-0.02±(0.11)	-0.01±(0.10)
Twentekanaal	-0.03±(0.42)	nan±(nan)
IJssel	0.02±(0.27)	0.01±(0.27)
Waal	-0.25±(0.26)	-0.25±(0.27)
Boven Merwede	-0.09±(0.20)	nan±(nan)
Duitse Rijn	-0.05±(0.24)	nan±(nan)
Boven-Rijn	-0.19±(0.31)	-0.18±(0.30)
Amsterdam-Rijnkanaal	-0.04±(0.69)	-0.16±(0.58)
Ketelmeer	0.02±(0.04)	0.02±(0.04)
Pannerdensch Kanaal	-0.11±(0.21)	-0.09±(0.22)
Vossenmeer	0.09±(0.20)	nan±(nan)
Reevediep	0.13±(0.26)	nan±(nan)
Veessen-Wapenveld	0.08±(0.69)	nan±(nan)
Nederrijn	-0.17±(0.26)	-0.17±(0.25)



Figuur 2.16 Boven: Verhanglijnen Boven-Rijn-Waal met de waterstanden van het 1D model op een gegeven dag tijdens de kalibratiesom op de riviertak. De corresponderende afvoer te Lobith is weergegeven in Figuur 2.15. Onder: Het verschil in waterstand tussen het 1D en 2D model.



Figuur 2.17 Boven: Verhanglijnen Boven-Rijn-Pannerdensch Kanaal, Nederrijn - Lek met de waterstanden van het 1D model op een gegeven dag tijdens de kalibratiesom op de riviertak. De corresponderende afvoer te Lobith is weergegeven in Figuur 2.15. Onder: Het verschil in waterstand tussen het 1D en 2D model.

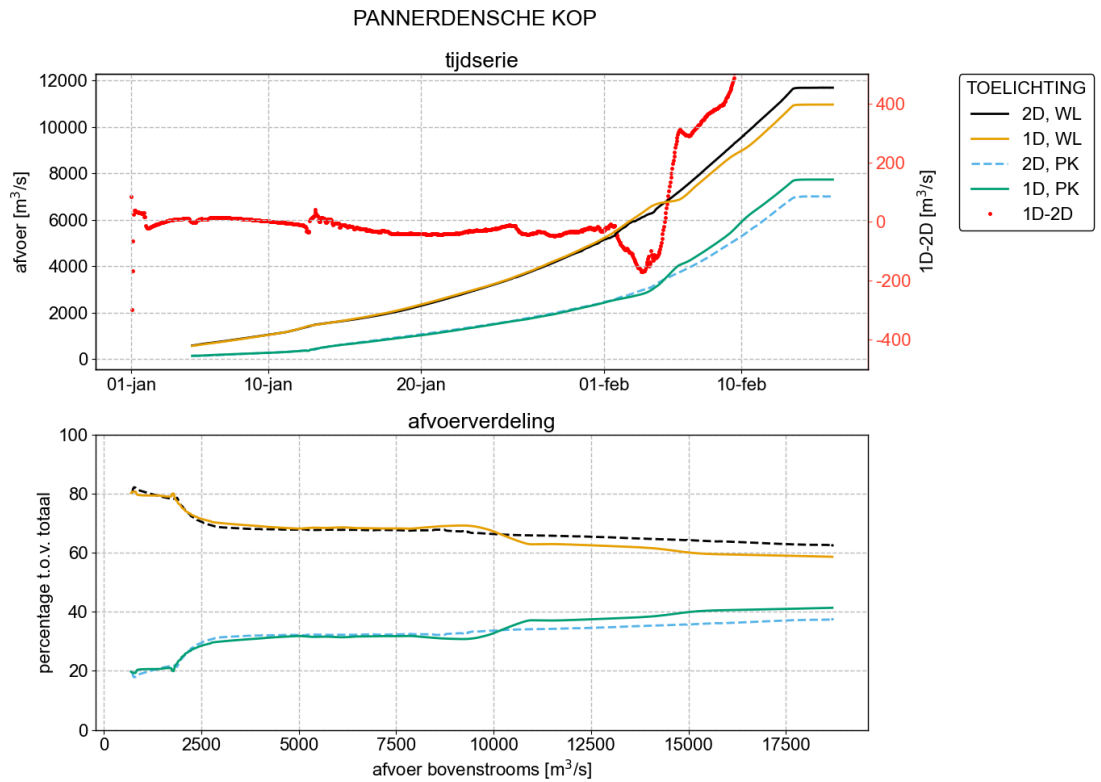


Figuur 2.18 Boven: Verhanglijnen Boven-Rijn-Pannerdensch Kanaal-IJssel met de waterstanden van het 1D model op een gegeven dag tijdens de kalibratiesom op de riviertak. De corresponderende afvoer te Lobith is weergegeven in Figuur 2.15. Onder: Het verschil in waterstand tussen het 1D en 2D model.

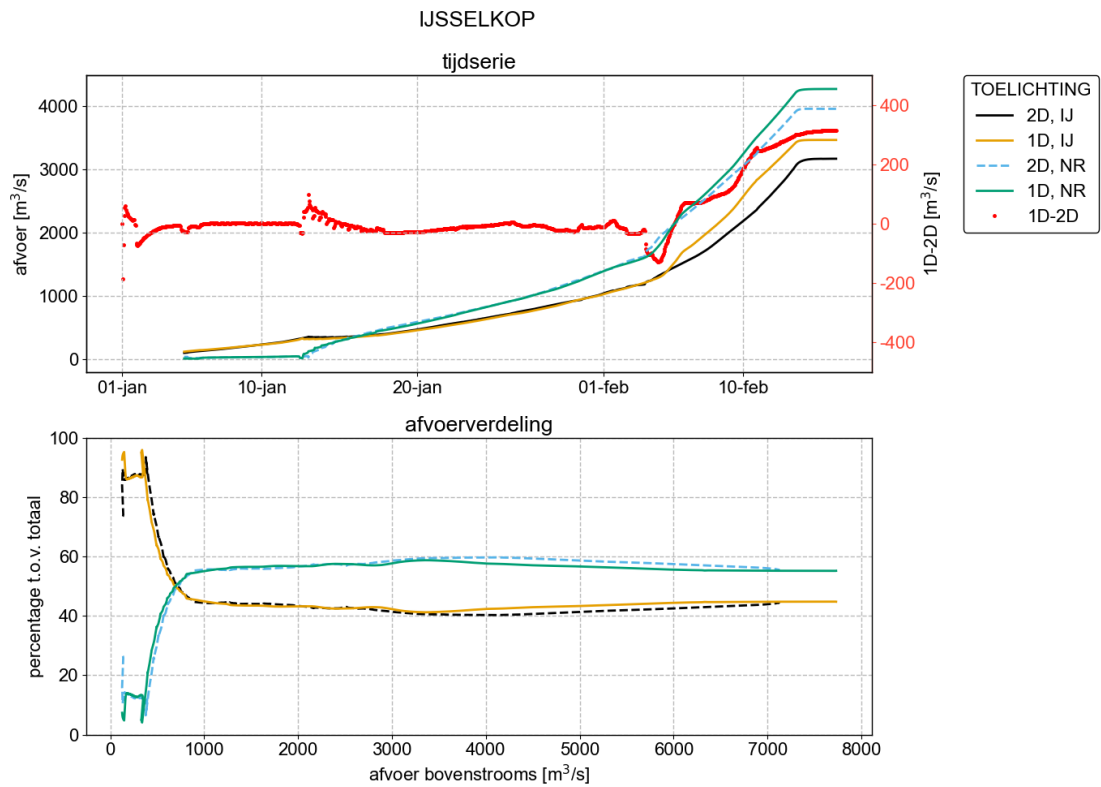
2.4.2 Afvoerverdeling

De ongekalibreerde afvoerverdeling komt grotendeels overeen met de 2D resultaten (Figuur 2.19 – Figuur 2.22). Naarmate de afvoer toeneemt beginnen de resultaten uit elkaar te lopen. Hierdoor zien we dat er te veel water richting het Pannerdensch Kanaal en de IJssel stroomt t.o.v. de Waal en Nederrijn in de vergelijking met het 2D model.

De afvoerverdeling bij de hoogwatergeulen Veessen-Wapenveld en Reevediep ligt in de buurt van het 2D model. Wel zien we een verschil in het eerste moment dat de hoogwatergeul meestroomt. Door de hogere waterstanden in het bovenstroomse deel van de IJssel in 1D stromen de hoogwatergeulen eerder mee. Verwacht wordt dat wanneer de afvoerverdelingen bij Pannerdenschekop en IJsseldiep correct gekalibreerd worden de timing van het meestromen van Veessen-Wapenveld en Reevediep gelijk trekt aan 2D.

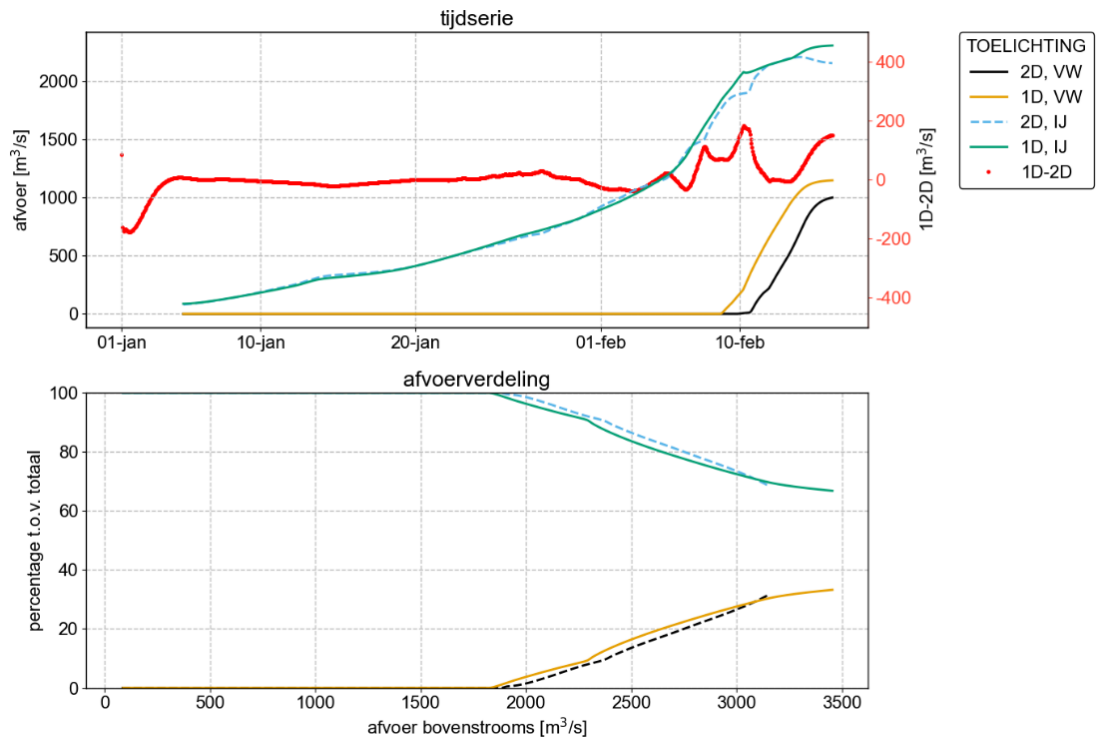


Figuur 2.19 Ongekalibreerde afvoerverdeling Pannerdensche Kop.



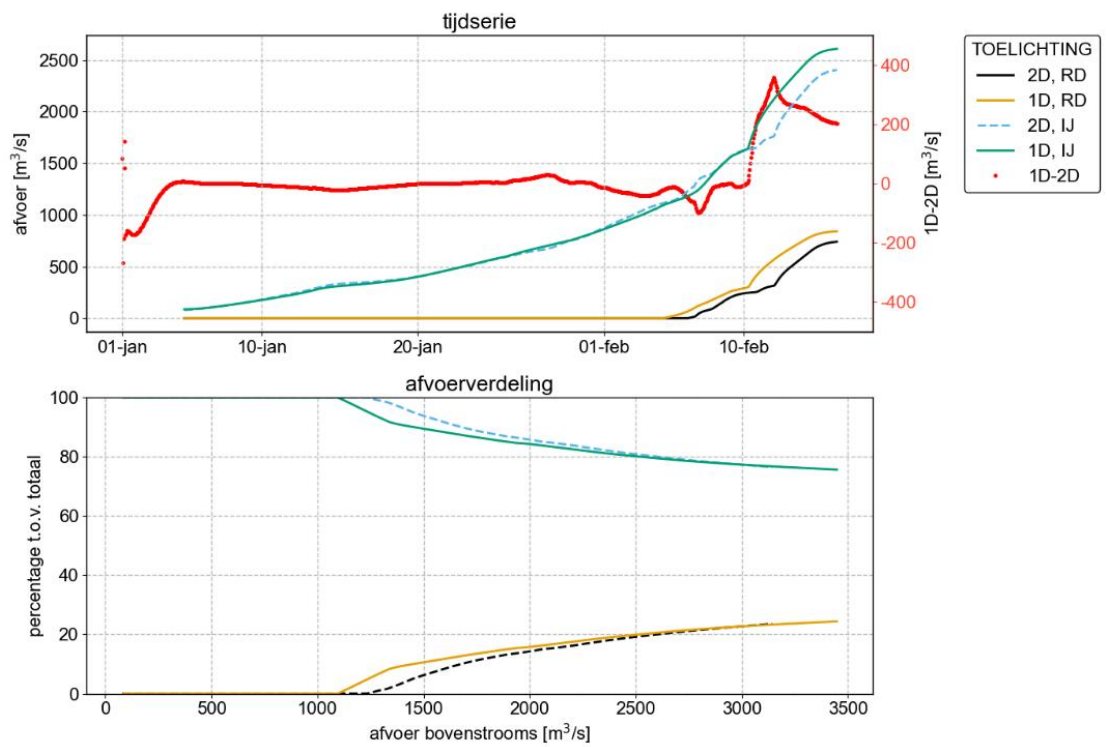
Figuur 2.20 Ongekalibreerde afvoerverdeling IJsselkop.

VEESSEN WAPENVELD



Figuur 2.21 Ongekalibreerde afvoerverdeling Veessen-Wapenveld.

REEVEDIEP



Figuur 2.22 Ongekalibreerde afvoerverdeling Reevediep.

2.4.3 Conclusie

Uit deze ongekalibreerde vergelijking concluderen we dat de resultaten over het algemeen plausibel zijn. De waterstanden zijn over het algemeen te laag vergeleken met het 2D model, maar dit wordt niet gezien als een schematisatiefout. Dit is tevens iets dat in kalibratie hersteld kan worden door verlaging van de ruwheidscoëfficiënt. Andersom geldt dit ook voor de takken waar de waterstanden te hoog zijn. De afvoerdeling komt grotendeels overeen, maar loopt bij oplopende afvoeren uit elkaar. Ook hier wordt verwacht dat in de kalibratie de afvoerdeling rechtgetrokken kan worden.

2.5 RWsOS variant

Naast de basis variant wordt er ook een variant voor RWsOS opgeleverd: *sobek-rijn-j24_6-v1a1-rwsos*. De volledige aanpassingen ten opzichte van de basisvariant zijn beschreven in Bijlage D en omvatten onder meer de volgende wijzigingen:

- De tak *DuitseRijn* is uit het model geknipt. De knoop *Lobith* is nu de bovenstroomse rand van het model.
- Takken in het Ketelmeer zijn verwijderd. Hierdoor zijn er drie knopen die een open rand vormen. Deze randvoorwaarden worden hernoemt naar: *Kattendiep*, *Ketelhaven_1* en *Ketelhaven_2*.
- Op de open randen zijn de volgende constante afvoeren en waterstanden opgelegd:
 - Lobith: 2000 m³/s.
 - Hardinxveld en Krimpen_ad_Leek: 0.5 m+NAP
 - Ketelbrug: -0.2 m+NAP
- Bepaalde configuratie-instellingen zijn gewijzigd. Zo schrijft de rwsos-variant restart files weg.

3 Kalibratie

3.1 Methode

Bij de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* is dezelfde algemene kalibratiemethode gebruikt als bij de bouw van *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. De onderstaande methode beschrijving is daarom overgenomen uit Maas, Gensen & Berends (2023).

3.1.1 Algemene methode voor kalibratie & validatie

Omdat het 1D model wordt gebouwd als een afgeleid model van het 2D model, is het doel van de kalibratie van het 1D model om de resultaten van het 2D model over het gehele afvoerbereik³ te reproduceren. We bereiken dat door de bodemruwheid van het zomerbed⁴ zo aan te passen dat de fout tussen het 1D en 2D model geminimaliseerd wordt. Het aanpassen van de zomerbedruwheid wordt programmatisch gedaan door het programma OpenDA, dat beschikt over een krachtig optimalisatiealgoritme⁵.

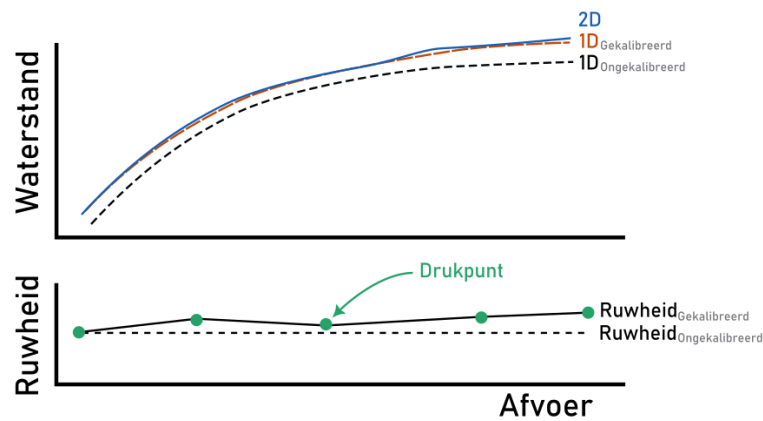
De fout tussen 1D en 2D wordt uitgedrukt middels de zogenaamde kostfunctie. Invoer van deze kostfunctie is de waterstandsfout op LMW stations en de afvoerfout op het Pannerdensch Kanaal en IJssel benedenstrooms van de splitsingspunten Pannerdensch Kop respectievelijk IJsselkop.

De kalibratiesom bestaat uit een langzaam, monotoon stijgende afvoerrand en QH relaties op de benedenranden. Deze afvoerrand is gelijk aan de FM2PROF afleidsom. Hierdoor wordt er voor elke afvoer één waterstand berekend, en wordt een quasi-stationaire QH relatie benaderd. Uit pilotonderzoek is gebleken dat het kalibreren van het 1D model op zo'n quasi-stationaire QH relatie ook goede resultaten geeft bij dynamische sommen (Berends, Domhof, & Visser, 2021). Figuur 3.1 geeft een schematisch overzicht van de methodiek. Door de ruwheid aan te passen op enkele drukpunten ('afvoerniveaus') wordt een ruwheidsfunctie gezocht die leidt tot de kleinste kostfunctie tussen 1D en 2D. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat Figuur 3.1 een versimpelde weergave is. In werkelijkheid wordt het gehele ruwheidsveld (alle afvoerniveaus en alle locaties) afgeregeld om de gehele kostfunctie (waterstand en afvoeren voor het hele afvoerbereik) te minimaliseren.

³ Hiermee bedoelen we van zeer laag tot extreem hoog. De hoogste afvoer waarmee gerekend wordt is dermate hoog, dat in werkelijkheid de dijken vermoedelijk overstroomd zijn. Hoewel dit fysisch onrealistisch is – zowel het 1D als 2D model hebben hun modelgrens bij de dijken en kunnen overstrooming dus niet simuleren – is het doel om 1D en 2D ook gelijk te laten extrapoleren – tot (en voorbij) het punt waarin in werkelijkheid de dijken overstroomd raken.

⁴ Dit is de 'Main' sectie van het ruwheidsveld.

⁵ We maken gebruik van het zogenaamde Dud-algoritme. De volledige configuratie van dit algoritme en de kostfunctie is onderdeel van de oplevering van het model.

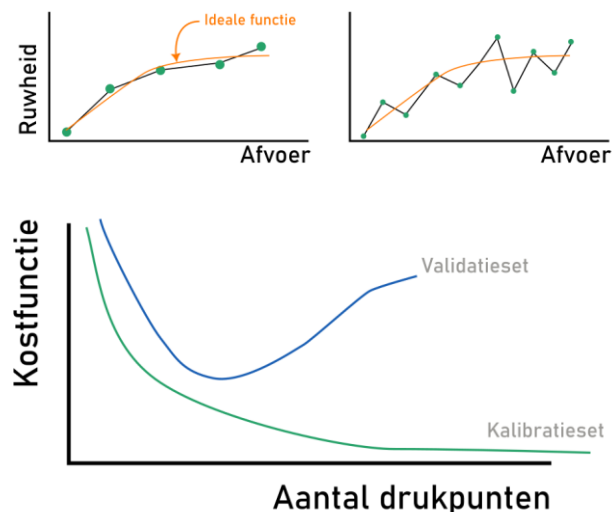


Figuur 3.1 Schematisch overzicht van de kalibratiemethode. De ruwheidsfunctie (onder paneel) wordt op enkele drukpunten (in dit rapport zijn dat met name 'afvoerniveaus', maar dit zou ook het aantal locaties kunnen zijn) aangepast.

Een andere manier om tegen deze manier van kalibratie aan te kijken, is dat we zoeken naar een ideale ruwheidsfunctie die onder alle omstandigheden (niet alleen kalibratie, maar ook alle validatiesommen) de fout minimaliseert. De vorm van deze functie is onbekend: kalibratie is een manier om deze te benaderen. We benaderen de ideale vorm middels een zogenaamde 'stuksgewijs lineaire functie' door lineaire interpolatie tussen de drukpunten van de functie (het onderste paneel van Figuur 3.1 beschrijft zo'n functie).

Door meer drukpunten toe te voegen, kan de functie een complexere vorm krijgen en kan tijdens kalibratie een nauwkeuriger resultaat worden verkregen. Echter zit hier een limiet aan. Bij te hoge complexiteit kan overparametrisatie plaatsvinden. De omstandigheden van de kalibratiesom worden dan heel precies nagebootst ten koste van de nauwkeurigheid in validatie. Een schematische illustratie hiervan is gegeven in Figuur 3.2. Dit fenomeen is welbekend in het afleiden van statistische modellen. Uit onderzoek (Domhof, 2018) bleek dat dit fenomeen niet zo extreem aanwezig is bij stromingsmodellen, maar dat er wel een punt is waarbij meer drukpunten leidt tot geringe verbetering of zelfs verslechtering van de validatie.

De validatie die wordt uitgevoerd in Hoofdstuk 4 is een zogenaamde kruis- of alfavalidatie (Berends, Diermanse, & de Jong, 2021). Dat wil zeggen dat er wordt gevalideerd onder gelijke omstandigheden: geen systeemverandering, geen extrapolatie en dezelfde manier om foutstatistieken te bepalen. Deze validatietest is geschikt om te testen op overparametrisatie. Het effect van veranderingen in de kalibratiemethodiek zoals het toevoegen van een extra drukpunt kan daardoor worden getoetst.



Figuur 3.2 Het toevoegen van drukpunten (figuur boven, rechts) om de kalibratiesom nauwkeuriger te benaderen kan leiden tot een ruwheidsfunctie die precies is afgestemd op de kalibratiesom, maar verder van de ideale functie afwijkt dan de som met minder drukpunten (figuur links).

3.1.2 Kalibratie *sobek-rijn-j24_6-v1a1*

Op basis van het onderzoek beschreven in paragraaf 2.1.1 (Tabel 2.1) en Bijlage A zijn het vierde en vijfde afvoerniveau aangepast in de kalibratiemethode. Daarnaast is ook het gewicht op de afvoerverdeling verhoogt (standaarddeviatie verlaagt van 10 naar 2,5) om de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop en IJsselkop beter overeen te laten komen met *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*. Bij de keuze voor de zwaarte op de afvoerverdeling hebben we de opties 10, 5, 2,5 en 1 overwogen. Hoe lager het getal, des te meer nadruk er wordt gelegd op de afvoerverdeling. Een hogere waarde betekent een betere afvoerverdeling, maar kan resulteren in een grotere afwijking van de waterstanden met 2D.

Door analyse van zowel de waterstanden als de afvoerverdeling statistieken, zijn we tot de conclusie gekomen dat een middenweg de beste oplossing is. Een gewicht van 2,5 levert beduidend betere resultaten voor de afvoerverdeling op in vergelijking met een zwaarte van 5, terwijl de waterstanden vergelijkbaar blijven. Daarom is besloten om door te gaan met de bouw van het model *sobek-rijn-j24_6-v1a1*, met een aangepast gewicht op de afvoerverdeling van 2,5 in plaats van 10 (standaard). Met het oog op aankomende actualisaties is het wenselijk om te onderzoeken hoe effectief het aanpassen van het gewicht van de afvoerverdeling is en waar een optimum gevonden kan worden voor zowel waterstanden als afvoerverdeling. Dit onderzoek is inmiddels opgenomen: [HYRIDEM-411](#).

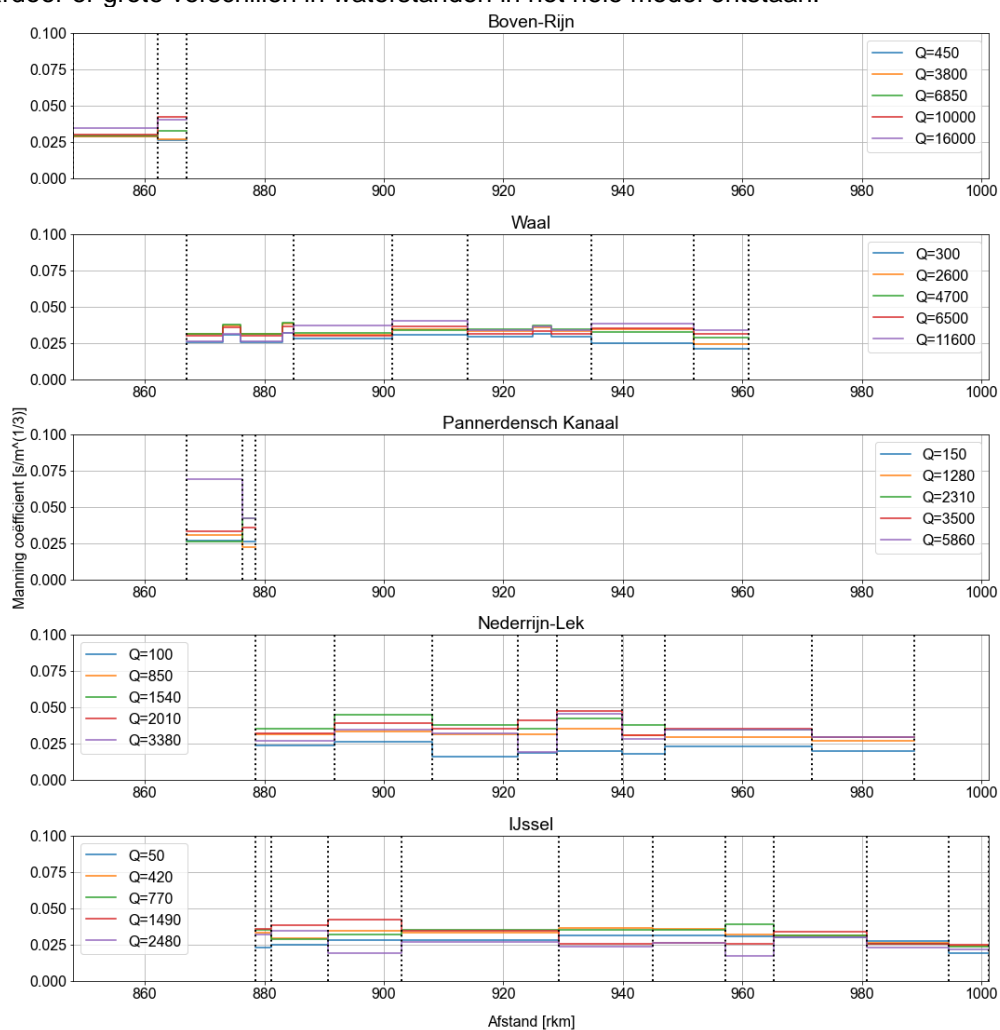
Het model wordt met OpenDA gekalibreerd op een 2D modelresultaat met een geleidelijk stijgende afvoer. Er wordt gebruik gemaakt van vijf afvoerniveaus waarmee de waterstanden in de gehele tijdserie van de kalibratiesom worden geoptimaliseerd (zie Tabel 2.1 voor de gebruikte afvoerniveaus). Dit betekent dat er enkele aanpassingen nodig zijn in het model:

- De randvoorwaarden gelijkstellen aan het *dflowfm2d-rijn-j24-v1a* model.
- Het inlaatwerk voor Veessen-Wapenveld sluiten en de D-RTC sturing voor Veessen-Wapenveld uitzetten.
- De D-RTC sturing voor “VeWa_leegloop” uitzetten. Deze is namelijk niet opgenomen in 2D en heeft geen functie met de gebruikte kalibratie randvoorwaarden.

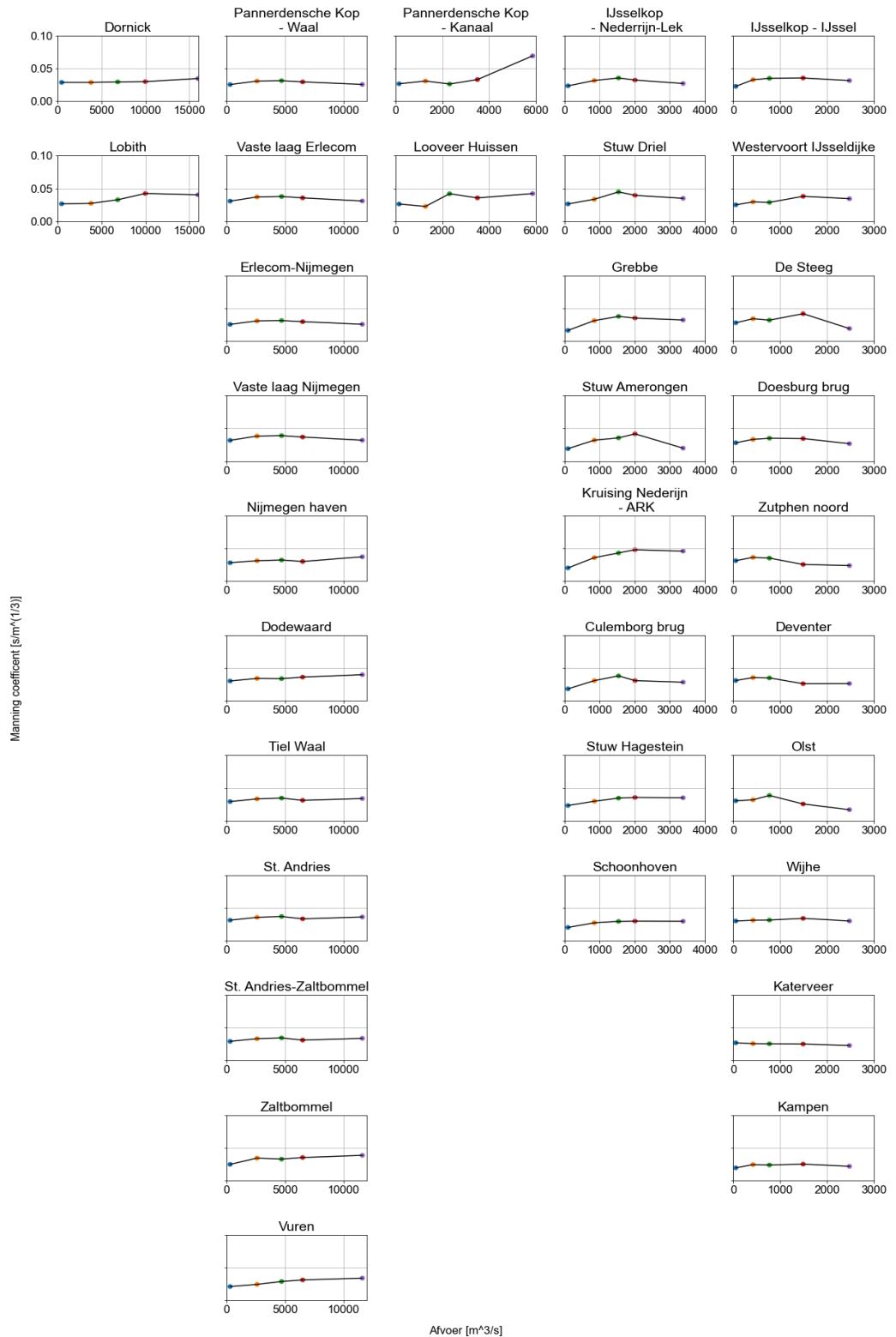
3.2 Resultaten kalibratie

3.2.1 Ruwheden

Figuur 3.3 toont het langspatief van gekalibreerde zomerbedruwheden. Figuur 3.4 toont dezelfde ruwheden maar dan per ruwheidstraject als ruwheidsfunctie. Over het algemeen zien we in beide figuren dat de ruwheden tussen de verschillende ruwheidstrajecten vergelijkbaar zijn over de riviertakken. Over het algemeen neemt de ruwheid bij toenemende afvoer toe in de Waal en Nederrijn-Lek, terwijl in de IJssel de ruwheid meer constant blijft over het afvoerbereik. Ten opzichte van de ruwheden in het *j22*-model blijven de ruwheden nu meer constant tussen de ruwheidstrajecten en zien we geen grote uitschieters naar boven meer (Berends, Domhof, & Visser, 2022). Dat betekent dat de nieuwe profielen minder “bijgestuurd” dienen te worden om de 2D waterstand te benaderen. Een uitzondering hierop het bovenstroomse ruwheidstraject op het Pannerdensch Kanaal bij de afvoer van 16.000 m³/s. De hoge Manning coëfficiënt van 0.07 zorgt er voor dat de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop het 2D model kan volgen. In de ongekalibreerde vergelijking is namelijk te zien dat er 600 m³/s te veel naar het Pannerdensch Kanaal stroomt (Figuur 2.19), waardoor er grote verschillen in waterstanden in het hele model ontstaan.



Figuur 3.3 Langspatief van gekalibreerde zomerbed ruwheden. Van boven naar onder: Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek en IJssel. Zwarte verticale stippellijnen geven grenzen tussen ruwheidstrajecten weer. De bodembeschermingsconstructies bij Erlecom, Nijmegen en St. Andries zorgen voor een afwijking in de ruwheid binnen eenzelfde traject vanwege hoe deze in de kalibratiemethode zijn meegenomen. Iedere riviertak heeft een ander afvoerbereik waarop is gekalibreerd dus let op de legenda per plot.



Figuur 3.4 Gekalibreerde zomerbed ruwheidsfuncties per ruwheidstraject. Elke kolom toont een riviertak. Van boven naar onder worden de ruwheidstrajecten in benedenstroomse richting getoond. De functies voor bodembeschermingsconstructies bij Erlecom, Nijmegen en St. Andries worden apart getoond, maar zijn niet apart gekalibreerd aangezien deze zijn opgenomen in een algeheel ruwheidstraject (voor Erlecom en Nijmegen in traject PK tot Nijmegen haven en voor St. Andries in traject Tiel Waal tot Zaltbommel). De y-as heeft dezelfde schaal in alle subplots, maar de x-as schaal verschilt per rij vanwege verschillende afvoer bereiken per riviertak.

3.2.2 Waterstanden

3.2.2.1 Waterstandsverschil met 2D

Het doel van de kalibratie is om het verschil in waterstand tussen de 1D en de 2D modelresultaten te minimaliseren ter hoogte van de LMW-meetstations. Aangezien met de 2D modelresultaten er ook observaties zijn tussen de LMW-meetstations in, kan gecontroleerd worden hoe het 1D model zich op iedere willekeurige locatie en tijd verhoudt tot het 2D model.

In vergelijking met het ongekalibreerde resultaat zien we dat de fout en bias aanzienlijk is verkleind (Tabel 3.1). Op alle takken is zowel de bias als de standaardafwijking afgenomen. De grootste verbetering zijn terug te vinden op de Boven-Rijn, Waal en Nederrijn. Voor de Lek en IJssel is de verbetering in de bias geringer, maar de standaardafwijking is aanzienlijk afgenomen.

Tabel 3.1 Gemiddelde afwijking (bias) en standaardafwijking voor alle uitvoerpunten, en voor enkel de LMW locaties ten opzichte van de 2D model.

	Alle uitvoerpunten		LMW locaties	
	Voor kalibratie	Na kalibratie	Voor kalibratie	Na kalibratie
Boven-Rijn	-0.19±(0.31)	-0.03±(0.10)	-0.18±(0.30)	-0.02±(0.11)
Waal	-0.25±(0.26)	-0.04±(0.08)	-0.25±(0.27)	-0.04±(0.06)
Pannerdensch Kanaal	-0.11±(0.21)	-0.02±(0.12)	-0.11±(0.21)	-0.01±(0.11)
Nederrijn	-0.17±(0.26)	-0.02±(0.09)	-0.17±(0.25)	0.00±(0.08)
Lek	-0.02±(0.11)	0.00±(0.05)	-0.01±(0.10)	-0.01±(0.05)
IJssel	0.02±(0.27)	-0.01±(0.08)	0.01±(0.27)	-0.01±(0.06)

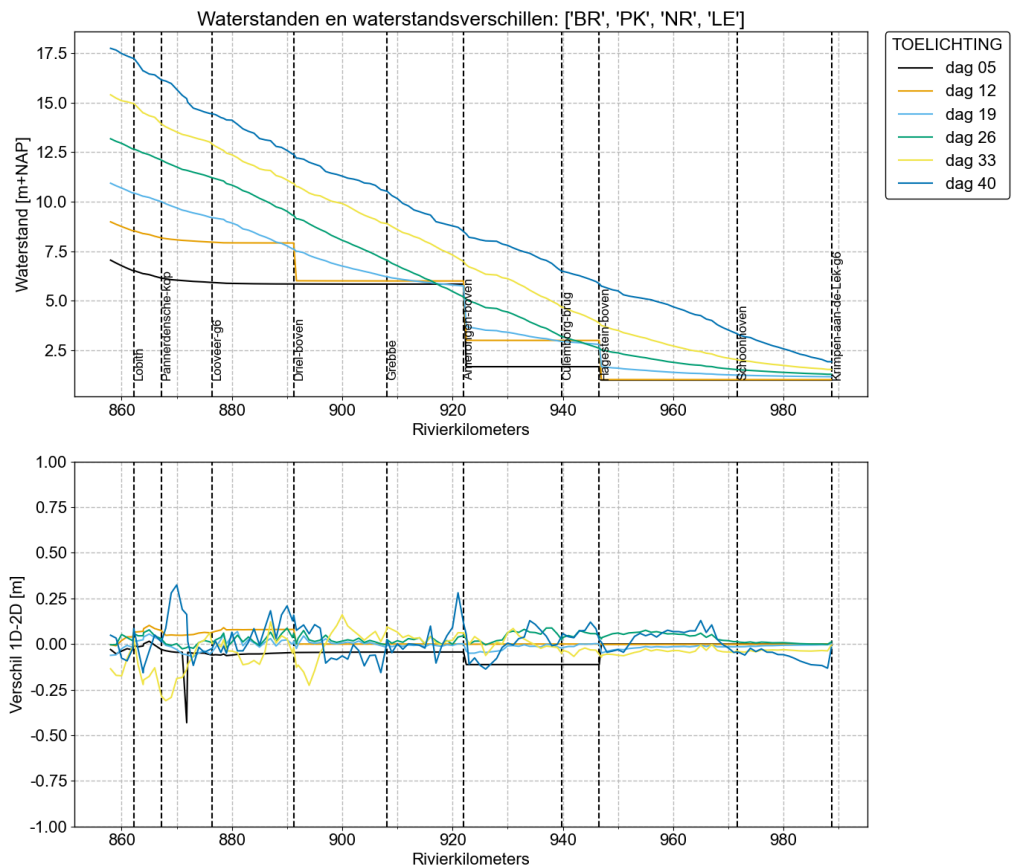
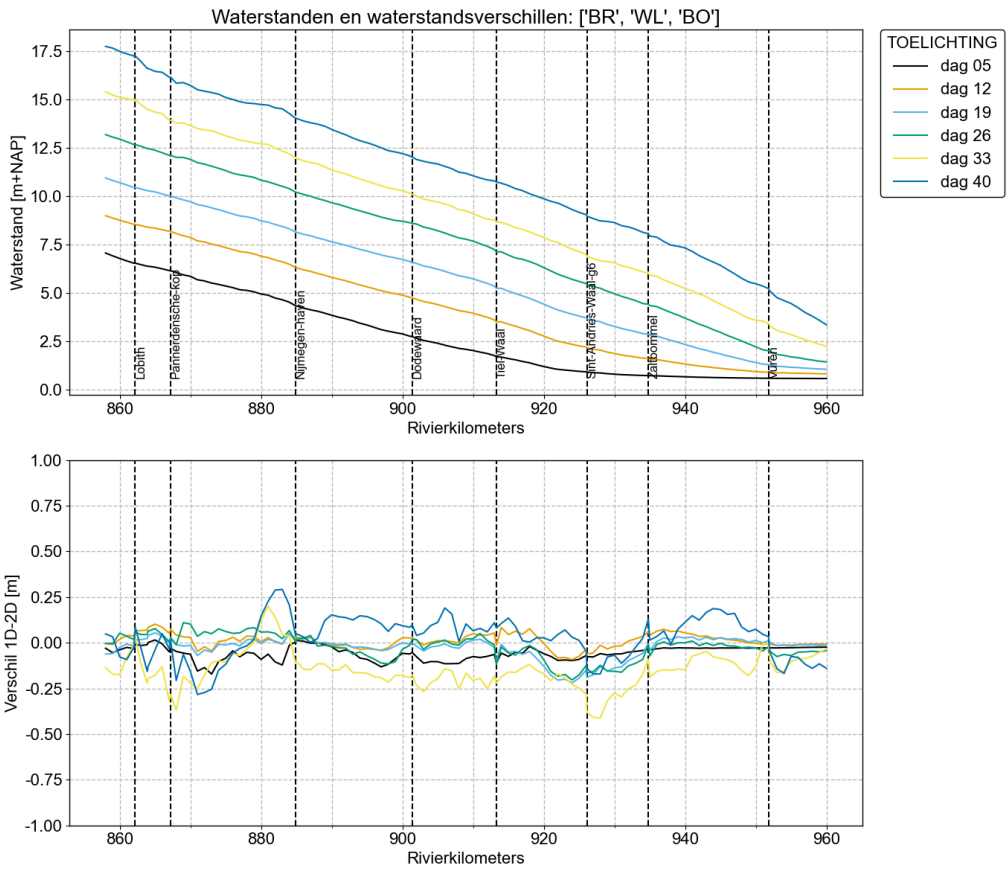
Vervolgens kijken we naar de resultaten tussen de kalibratiestations in om mogelijke systematische tekortkomingen in de schematisatie vast te stellen (Figuur 3.5). Er zijn meerdere punten die al reeds naar voren kwamen bij de bouw van *sobek-rijn-j22-v1a1(/2)* (Berends, Domhof, & Visser, 2022) en (Maas, Gensen, & Berends, 2023). Deze punten zijn hier vastgesteld en voor meer informatie wordt verwezen naar het desbetreffende onderzoek. Nieuwe punten worden niet verder onderzocht in dit rapport. Ze worden ter aanbeveling opgenomen voor volgend jaar.

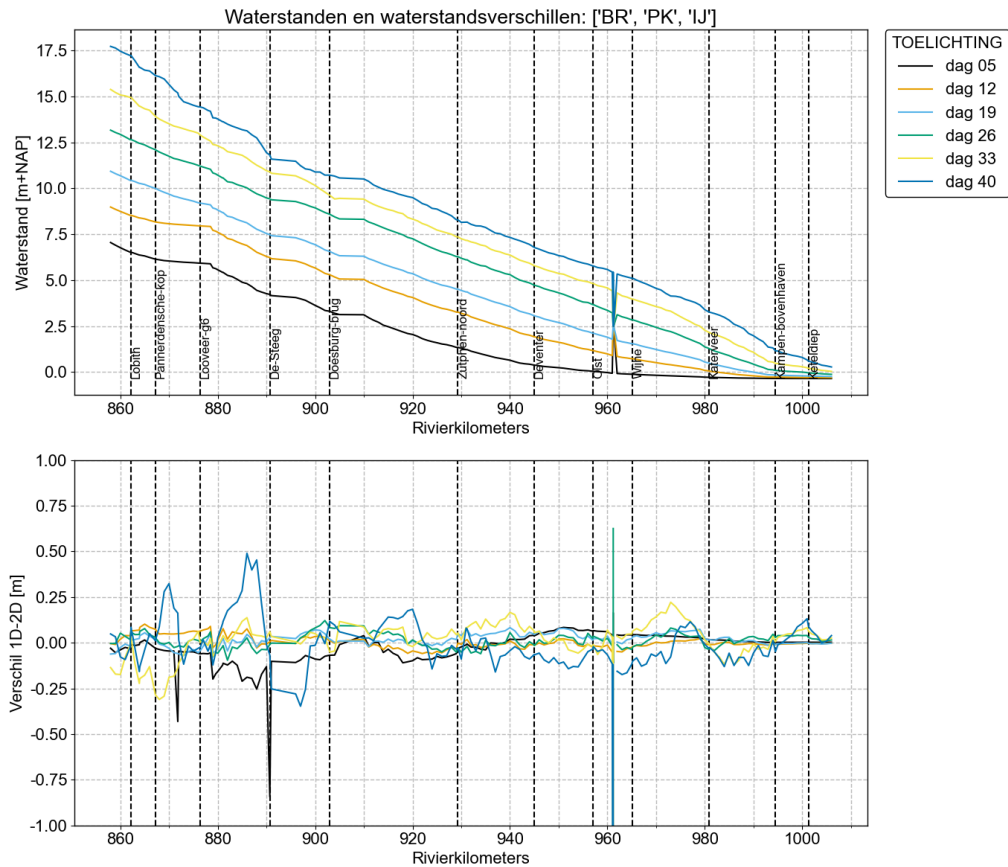
Nederrijn-Lek

- Rkm 910 – 920: Hier zien we een relatieve lagere waterstand in het stuwpannd Amerongen bij een afvoer op de Nederrijn van tussen de 1800 en 2200 m³/s (~8000 m³/s bij Lobith). Deze waterstanden zijn vergelijkbaar met de ongekalibreerde som, echter zijn de waterstanden bij lagere en hogere afvoeren tijdens de kalibratie meer gelijk getrokken met de 2D resultaten.

IJssel

- Rkm 885 – 900: Tussen de Steeg en Doesburg Brug neemt het verhang op de IJssel toe bij hogere afvoeren (> 8000 m³/s bij Lobith) (Figuur 3.5). Een mogelijke verklaring is het meestromen van Rhederlaag bij deze afvoeren ter hoogte van de Steeg. In het 1D model bestaan de profielen hier voor een groot deel uit bergend volume wat zorgt voor een verlaging van de waterstand benedenstrooms. Dit geeft een bekend notoir verschil tussen het 1D en 2D model. Het lijkt er dus op dat op dit traject de profielen, ook met de nieuwe profielmethode, nog steeds een aanzienlijk verschil met 2D opleveren.





Figuur 3.5 Boven: Verhanglijnen van de verschillende Rijntakken met de waterstanden van het 1D model op een gegeven dag tijdens de kalibratiesom op de riviertak. De corresponderende afvoer te Lobith is weergegeven in Figuur 2.15. Onder: Het verschil in waterstand tussen het 1D en 2D model.

3.2.2.2 Waterstandsverschil met sobek-rijn-j22_6-v1a2

De verschillen in waterstanden ten opzichte van het 2D model zijn vergelijkbaar met het *sobek-rijn-j22_6-v1a2* model, ondanks dat er nu gebruik gemaakt is van een ander 2D model waarmee vergeleken wordt (Tabel 3.2). Wel is voor Waal en Pannerdensch Kanaal de gemiddelde afwijking voor alle stations 1 cm groter geworden. Daar tegenover staat dat de Nederrijn, Lek en IJssel deels verbeterd zijn t.o.v. 2D. De grootste verbetering is zichtbaar bij de LMW stations op de IJssel waar de fout met 4 cm is afgenomen en de standaardafwijking met 11 cm. De nieuwe profiel methode resulteert na kalibratie dus niet per se in betere nog veel slechtere waterstanden.

Tabel 3.2 Vergelijking gekalibreerde model met desbetreffende 2D model tussen *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en het nieuwe *sobek-rijn-j24-v1a1*.

	Alle uitvoerpunten		LMW locaties	
	<i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	<i>sobek-rijn-j24-v1a1</i>	<i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>	<i>sobek-rijn-j24-v1a1</i>
Boven-Rijn	-0.03±(0.08)	-0.03±(0.10)	-0.02±(0.09)	-0.02±(0.11)
Waal	-0.03±(0.08)	-0.04±(0.08)	-0.04±(0.06)	-0.05±(0.06)
Pannerdensch Kanaal	-0.01±(0.07)	-0.02±(0.12)	0.00±(0.06)	-0.01±(0.11)
Nederrijn	-0.01±(0.08)	-0.01±(0.09)	0.02±(0.07)	0.00±(0.08)
Lek	0.02±(0.06)	0.00±(0.05)	0.00±(0.04)	-0.01±(0.05)
IJssel	0.00±(0.08)	-0.01±(0.08)	-0.04±(0.17)	-0.00±(0.06)

3.2.3 Afvoerverdeling

In de kalibratie is er extra gewicht toegekend aan de afvoerverdeling Pannerdensch Kop en IJsselkop om deze beter overeen te laten komen met de afvoerverdeling in *dflow2d-rijn-j24_6-v1a*. Dit heeft geresulteerd in de volgende resultaten.

3.2.3.1 Afvoerverdeling verschil met 2D

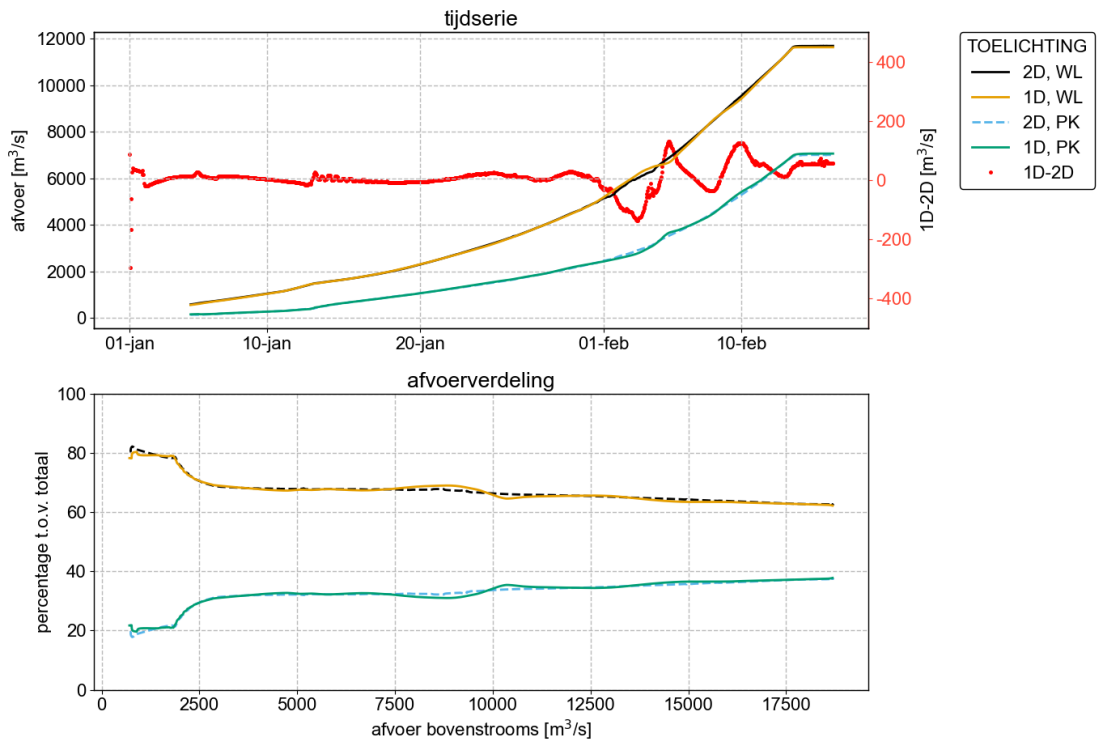
Figuur 3.6 t/m Figuur 3.9 geven de afvoerverdeling weer na kalibratie. De focus ligt hier op Pannerdensch Kop en IJsselkop aangezien deze actief beïnvloed worden tijdens de kalibratie. Visueel en ook statistisch (Tabel 3.3) gezien komt de afvoerverdeling sterk overeen met 2D. Voor de Pannerdensch Kop zijn er rond een afvoer van 9000, 11.000 en 15.000 m³/s afwijkingen zichtbaar. Deze afwijkingen zijn een bekend fenomeen en kwamen ook voor in *sobek-j22*. Dit heeft te maken met het zogenaamde “zomerdijkeffect” wanneer de uiterwaarden volstromen. Dit is namelijk niet mogelijk in Sobek 1D. Het verschil in afvoerverdeling wordt weer recht getrokken naarmate de afvoer dichterbij de gebruikte kalibratieniveaus komt. Voor de Boven-Rijn zijn deze: 6850, 10.000 en 16.000 m³/s. In de ongekalibreerde vergelijking loopt de afvoerverdeling vanaf 8500 m³/s verder uit elkaar met oplopende afvoer (Figuur 2.19).

Dit jaar is voor het eerst een open Reevediep meegenomen in de kalibratie. We zien dat de afvoer door het Reevediep onderschat wordt ten opzichte van 2D. Het verschil neemt toe naarmate de IJsselafvoer stijgt. Om te bepalen hoe deze onderschatting tot stand komt is er een aanbeveling gedaan voor extra onderzoek (HYRIDEM-412). De afvoerverdeling bij Veessen-Wapenveld is in deze kalibratie nog niet representatief aangezien de inlaat is dichtgezet in zowel het 1D als 2D model tijdens kalibratie.

Tabel 3.3 Statistieken van het kalibratieresultaat afvoerverdeling ten opzichte van het 2D model behorend bij Pannerdensch Kop, IJsselkop, Veessen-Wapenveld en Reevediep (Figuur 3.6 t/m Figuur 3.9). Alle getallen zijn in m³/s.

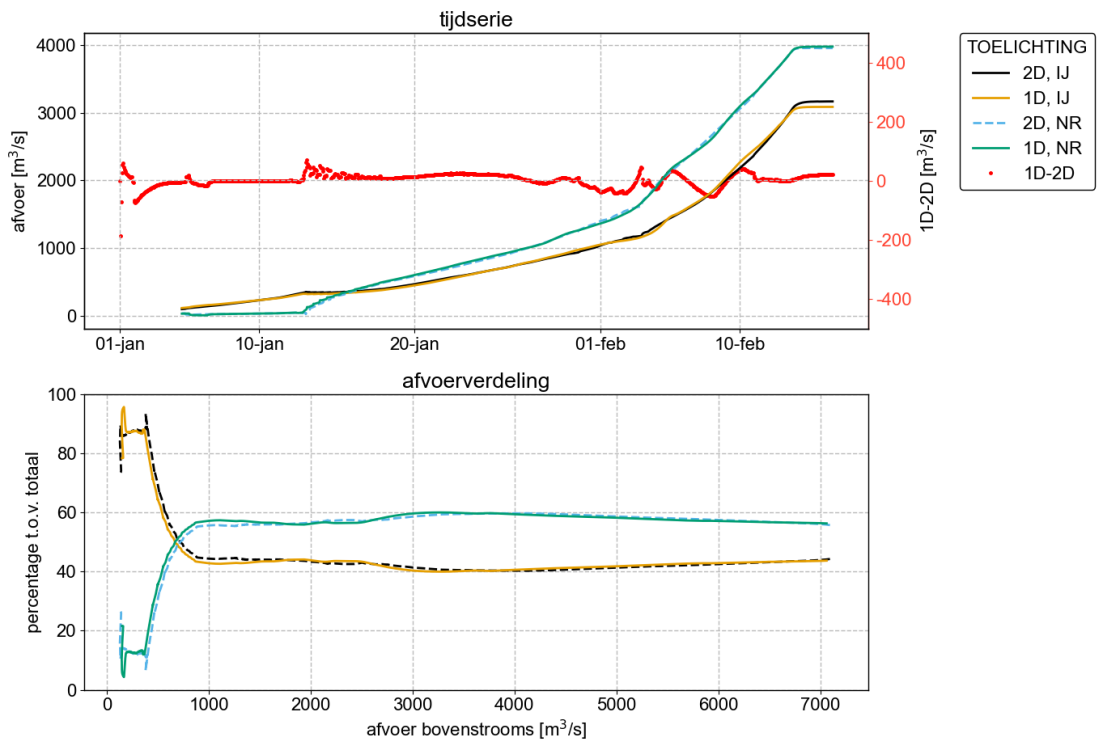
	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.00	IJ_962.00	VW_962.00	IJ_991.00	RD_991.00
Bias	-10	10	4	-1	24	-25	16	-16
Standaardafwijking	56	39	21	30	82	83	55	43
Maximaal absoluut verschil	201	131	72	90	330	30	182	0

PANNERDENSCH KOP



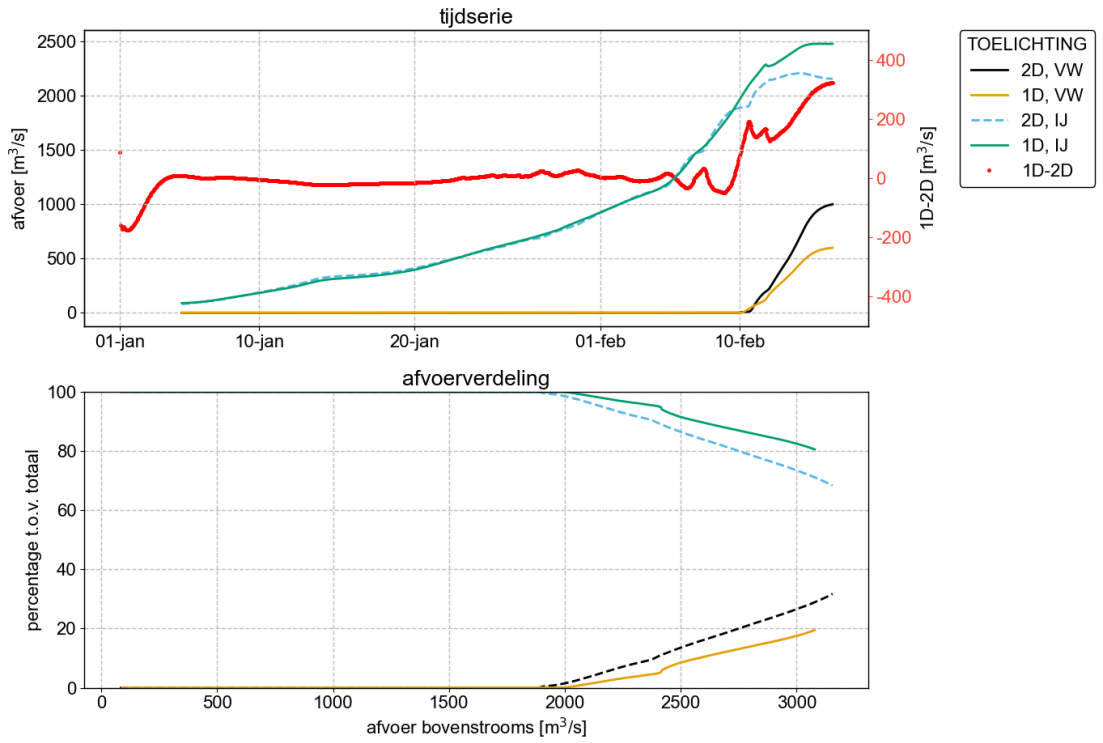
Figuur 3.6 Gekalibreerde afvoerverdeling Pannerdensche Kop. Boven: de afvoer over de twee takken bij het splitsingspunt, de rode lijn geeft het verschil weer tussen 1D en 2D. Onder: de relatieve afvoerverdeling over de twee takken.

IJSSELKOP



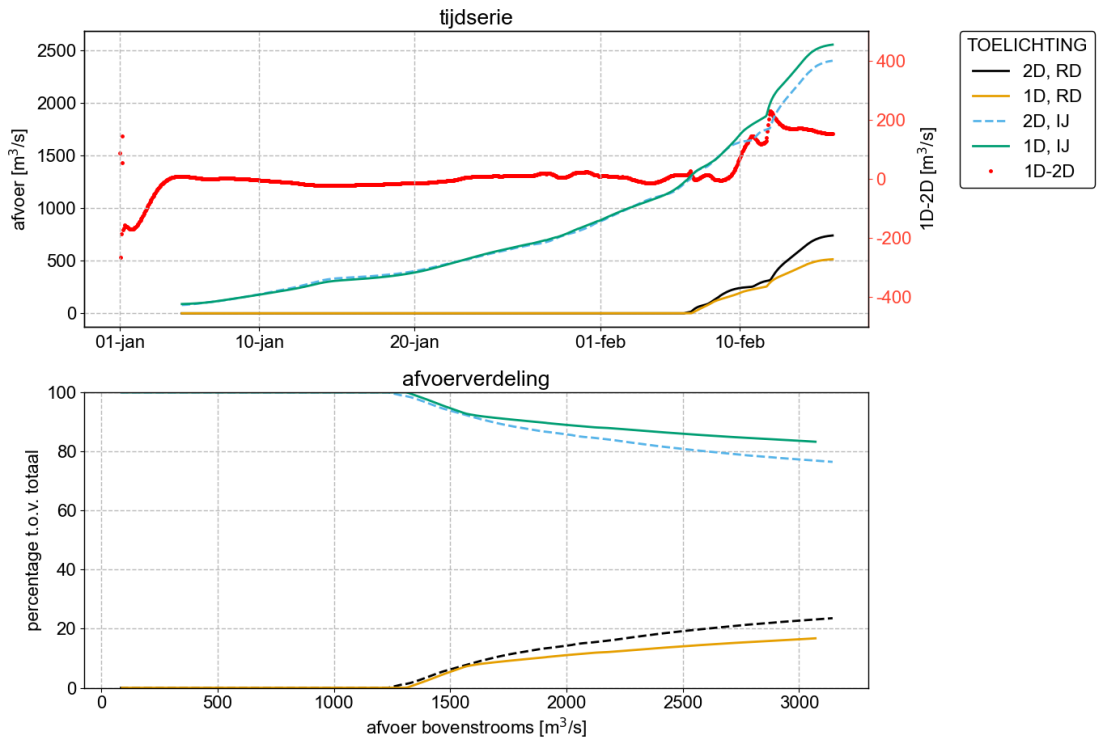
Figuur 3.7 Gekalibreerde afvoerverdeling IJsselkop. Boven: de afvoer over de twee takken bij het splitsingspunt, de rode lijn geeft het verschil weer tussen 1D en 2D. Onder: de relatieve afvoerverdeling over de twee takken.

VEESSEN WAPENVELD



Figuur 3.8 Gekalibreerde afvoerverdeling Veessen-Wapenveld. Boven: de afvoer over de twee takken bij het splitsingspunt, de rode lijn geeft het verschil weer tussen 1D en 2D. Onder: de relatieve afvoerverdeling over de twee takken.

REEVEDIEP



Figuur 3.9 Gekalibreerde afvoerverdeling Reevediep. Boven: de afvoer over de twee takken bij het splitsingspunt, de rode lijn geeft het verschil weer tussen 1D en 2D. Onder: de relatieve afvoerverdeling over de twee takken.

3.2.3.2 Afvoerverdeling verschil met sobek-rijn-j22_6-v1a2

Door extra gewicht aan de afvoerverdeling te geven is de afwijking met 2D verkleind, wanneer wordt gekeken naar het gehele afvoerbereik t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (Tabel 4.3). Met name voor de afvoerverdeling voor de midden-hoge en extreem hoge afvoeren is het verschil met 2D kleiner geworden. Wel is de maximale afwijking bij de Pannerdensche Kop rond een afvoer van 9000 m³/s toegenomen. Voor de IJsselkop is het verschil kleiner en bevat het geen uitschieters meer, welke wel in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* zichtbaar zijn. Er is hier geen vergelijking met de afvoerverdeling Veessen-Wapenveld en Reevediep gemaakt omdat 1) afvoerverdeling Veessen-Wapenveld niet representatief is tijdens kalibratie (door uitzetten RTC-sturing) en 2) in *dflowfm2d-rijn-j22-v1a* stroomde het Reevediep nog niet mee en kon deze niet vergeleken worden met 1D.

Tabel 3.4 Statistieken afvoerverdeling behorend bij Pannerdensche Kop en IJsselkop voor *sobek-rijn-j22_6-v1a2* en *sobek-rijn-j24_6-v1a1* vergeleken met gebruikte 2D kalibratiesom. Alle getallen zijn in m³/s.

	<i>sobek-rijn-j22_6-v1a2</i>				<i>sobek-rijn-j24_6-v1a1</i>			
	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.00	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.00
Bias	-34	36	15	16	-10	10	4	-1
Standaardafwijking	52	49	51	37	56	39	21	30
Maximaal absoluut verschil	140	138	111	98	201	131	71	91

4 Validatie

4.1 Resultaten validatiesommen

De validatie is uitgevoerd door de veertien standaardsommen (vijf dynamische en negen stationaire sommen) met *sobek-rijn-j24_6-v1a1* door te rekenen en te vergelijken met de resultaten van *dflow2d-rijn-j24_6-v1a* en *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. In de digitale bijlage (Bijlage E) staan de resultaten van alle validatie sommen uitgevoerd per observatiestation, de langsprofielen en de heatmaps.

4.1.1 Waterstanden

4.1.1.1 Waterstandsverschil met 2D

Over het algemeen zien we bij de dynamische sommen afwijkingen in dezelfde orde grootte als bij kalibratie (Tabel 4.1). Bij stationaire sommen is de bias meestal groter, maar is er geen standaardafwijking. Dit is te verwachten, omdat in dynamische sommen de bias wordt uitgemiddeld. Een uitzondering hierop zijn de waterstanden op de Boven-Rijn bij hoge dynamische afvoeren (> 8000 m³/s). Bij hogere afvoeren wordt de waterstand op de Boven-Rijn onderschat. Bij de stationaire afvoeren zien we bij een afvoer van 8000 m³/s op alle takken en relatief grote afwijking en bij 10.000 m³/s enkel op de BR, WL en PK (welke hieronder verder worden uitgelicht) (Figuur 4.1).

Langsprofielen met de 'max3' en 'last3' statistiek zijn opgenomen in Bijlage E (databijlage) voor alle stationaire en dynamische afvoersommen onderverdeeld in laag, midden en hoog afvoerbereik.

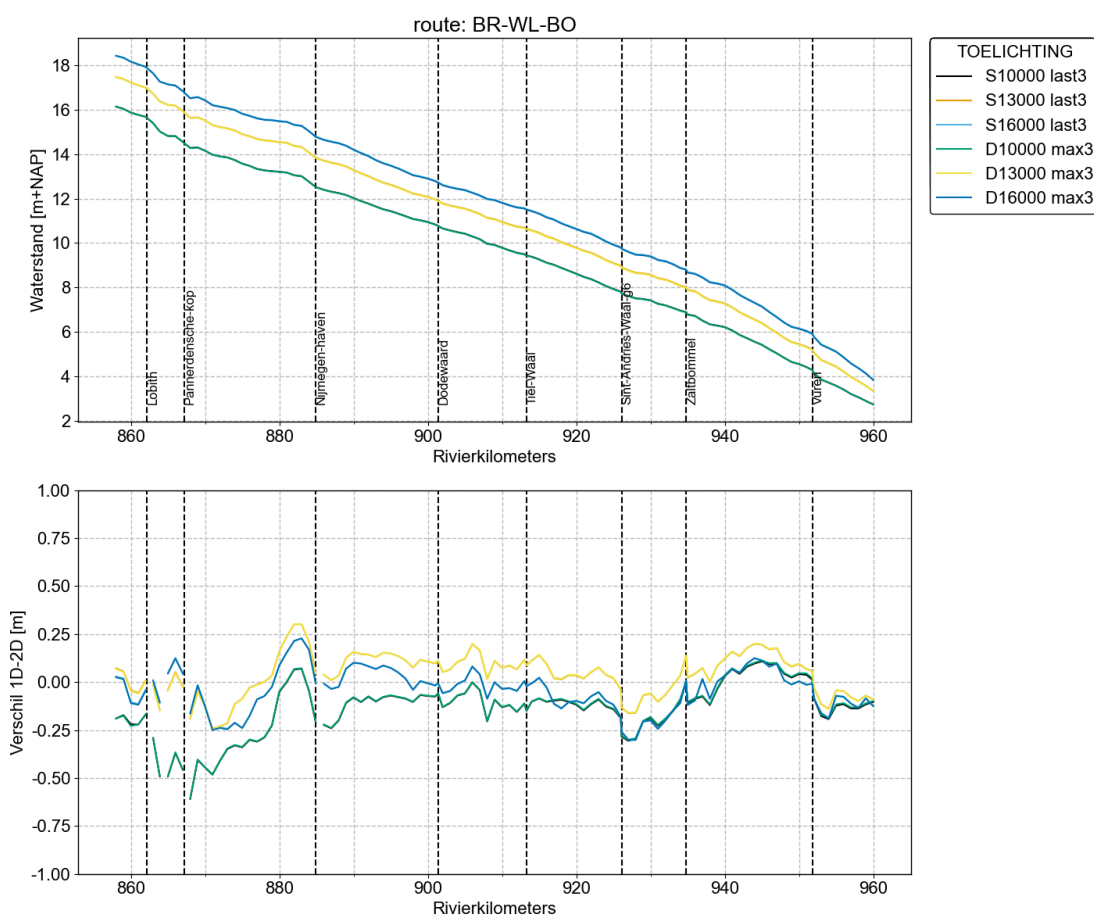
Tabel 4.1 Gemiddelden van de bias en de standaardafwijking bij alle LMW stations in de validatiesommen met het *sobek-rijn-j24_6-v1a1* model ten opzichte van *dflowm2d-rijn-j24_6-v1a*.

	BR	WL	PK	NR	LE	IJ
Kalibratie	-0.02±(0.11)	-0.04±(0.06)	-0.01±(0.11)	0.00±(0.08)	-0.01±(0.05)	-0.01±(0.06)
D_6000	0.04 ±(0.03)	0.00 ±(0.04)	0.02 ±(0.05)	0.02 ±(0.06)	0.00 ±(0.03)	0.02 ±(0.04)
D_8000	0.01 ±(0.08)	-0.03 ±(0.09)	0.04 ±(0.05)	0.07 ±(0.08)	0.04 ±(0.04)	0.04 ±(0.03)
D10000	-0.10 ±(0.17)	-0.06 ±(0.12)	-0.04 ±(0.14)	0.00 ±(0.18)	0.00 ±(0.11)	0.01 ±(0.06)
D13000	-0.11 ±(0.14)	-0.03 ±(0.11)	-0.03 ±(0.12)	0.02 ±(0.14)	0.01 ±(0.10)	0.05 ±(0.08)
D16000	-0.10 ±(0.13)	-0.04 ±(0.08)	-0.02 ±(0.14)	0.04 ±(0.12)	0.04 ±(0.07)	0.03 ±(0.07)
S_600	0.02 ±(0.00)	-0.02 ±(0.00)	-0.21 ±(0.00) [-0.03 ±(0.00) ⁶]	-0.04 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00) [0.02 ±(0.00) ⁶]
S_1020	0.02 ±(0.00)	0.02 ±(0.01)	0.00 ±(0.00)	-0.01 ±(0.03)	-0.00 ±(0.01)	0.06 ±(0.00)
S_2000	0.03 ±(0.00)	-0.08 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)
S_4000	0.03 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	-0.07 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	-0.07 ±(0.00)
S_6000	0.02 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.09 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)
S_8000	-0.17 ±(0.00)	-0.20 ±(0.00)	-0.09 ±(0.00)	-0.19 ±(0.00)	-0.11 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)

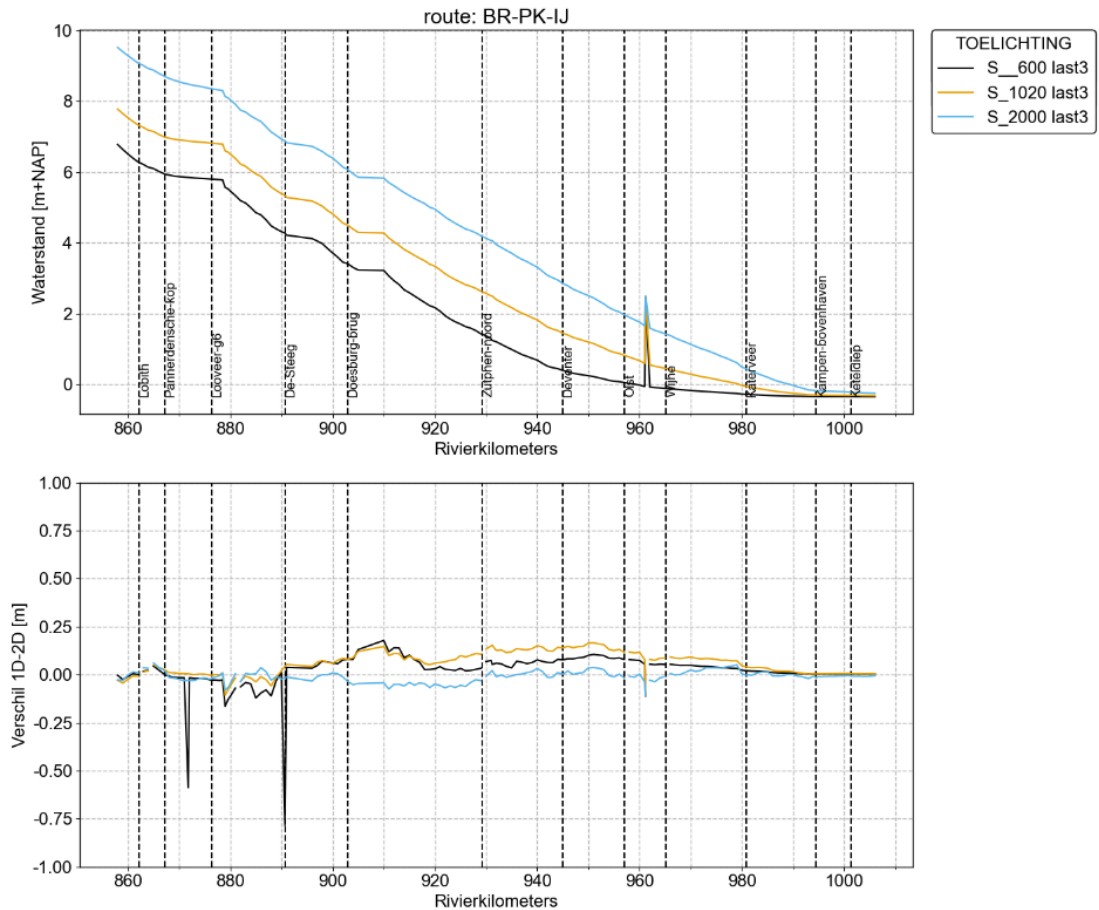
⁶ De vergelijking met 2D voor de som S_600 op PK zonder LMW-station PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden en op IJ zonder IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg. Deze zijn bij deze vergelijking niet meegenomen omdat in 2D deze stations niet in de hoofdgeul liggen. In 1D ligt dit LMW-station op de tak en heeft daarom wel een waterstand wat tot grote verschillen leidt: -0,59 m voor Pannerden en -0.79 voor De Steeg t.o.v. 2D. twee stations hebben grote invloed op de resultaten van de gehele tak, daarom voor gekozen om beiden waarden weer te geven. Zie Figuur 4.2.

	BR	WL	PK	NR	LE	IJ
S10000	-0.34 ±(0.00)	-0.11 ±(0.00)	-0.17 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	-0.00 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)
S13000	-0.00 ±(0.00)	0.05 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	0.10 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)
S16000	0.03 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00)	0.02 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.05 ±(0.00)

Tussen Lobith en Pannerdensch Kop neemt de waterstand bij hoge afvoeren (> 8000 m³/s) sneller af dan in het 2D model. Hierdoor ontstaan er lokaal verschillen tot -0,60 m bij WL_868.00 bij een afvoer van 10.000 m³/s. Bij lagere en hogere afvoeren is het verschil kleiner tot maximaal -0.25 m (Figuur 4.1). Verder is er een knik zichtbaar bij alle afvoeren (toenemend vanaf 6000 m³/s) ter hoogte van Sint-Andries en Vuren. Ten opzichte van 2D wordt de waterstand plots sterker onderschat. Bij Sint-Andries lijkt het te maken te hebben met de aanwezigheid van de uiterwaarde in de binnenbocht, welke in directe verbinding staat met de hoofdgeul en zo voor sterke waterstandsverlaging zorgt. Bij Vuren lijkt het te maken te hebben met het vollopen van de Kornsche Boezem net bovenstrooms. Dat laatste kan ook verklaren waarom er tussen rkm 940-950 hogere waterstanden waargenomen in 1D t.o.v. 2D. De manier waarop het winterbed volstroomt kan namelijk verschillen tussen 1D en 2D door het zomerdijkeffect. In 2D ontstaat er een knip in de QH-relaties wat in 1D niet mogelijk is. Benedenstrooms van de boezem wordt de waterstand weer onderschat, wat wel in lijn is met de rest van de Waal.



Figuur 4.1 Verhanglijnen Boven-Rijn-Waal-Boven Merwede voor de stationaire en dynamische sommen in het hoge afvoerbereik. Boven: De 1D waterstanden over de rivier. Onder: het verschil met de 2D waterstanden.



Figuur 4.2 Verhanglijnen Boven-Rijn-Pannerdensch Kanaal, IJssel voor de stationaire sommen in het lage afvoerbereik. Boven: De 1D waterstanden over de rivier. Onder: het verschil met de 2D waterstanden. Opvallend zijn de grote onderschatting bij S_600 voor de LMW-stations PK_871.8_L_LMW-H_Pannerden en IJ_890.7_L_LMW-H_De-Steeg.

4.1.1.2 Waterstandsverschil met sobek-rijn-j22_6-v1a2

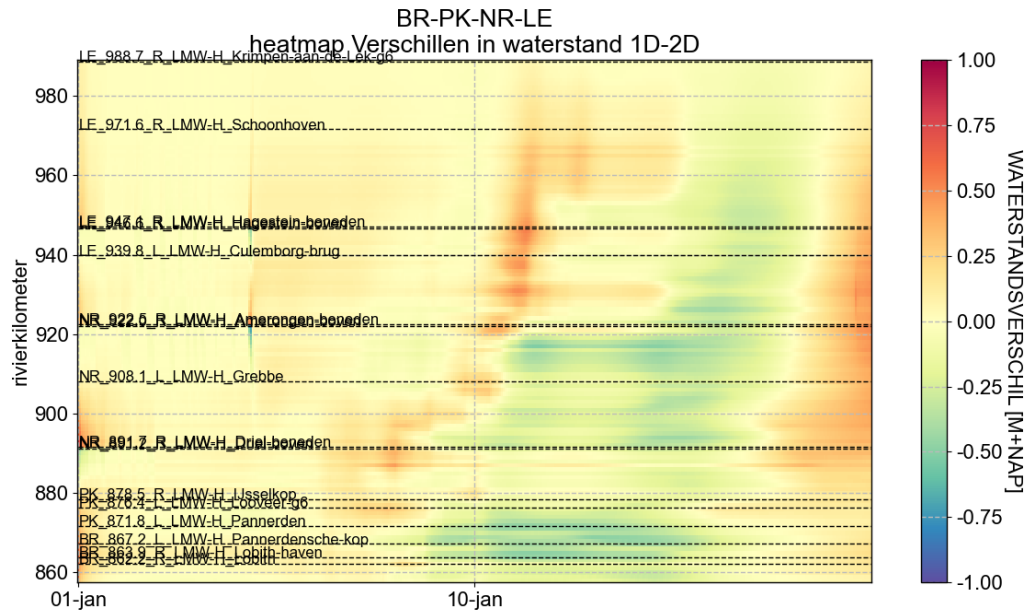
Vergeleken met *sobek-rijn-j24_6-v1a1* zien we voor *sobek-rijn-j22_6-v1a2* over het algemeen een grotere afwijking ten opzichte van 2D op de Boven-Rijn en Pannerdensch Kanaal bij zowel dynamische als stationaire afvoeren. Op de Nederrijn-Lek en IJssel is er voor *sobek-rijn-j24_6-v1a1* grotendeels een verbetering zichtbaar t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Kijkend naar het gehele model, resulteert de nieuwe methode voor profielgeneratie niet per se in een verbetering van de waterstanden maar blijven deze vergelijkbaar met de afwijking in *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.

De grootste verschillen tussen j24 en j22 zijn terug te vinden op de Boven-Rijn en het Pannerdensch Kanaal en specifiek bij een stationaire afvoer van 10.000 m³/s. Het grootste verschil is te zien rondom de Pannerdensch Kop waar de waterstand van het j24 model de 2D waterstand sterk onderschat (~0,3 m), terwijl in j22 dit verschil kleiner is (Figuur 4.3 & Figuur 4.4). Verder is wel te zien dat het waterstandsverschil tijdens het in- en uitstromen van de uiterwaarden in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* kleiner is dan in *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.

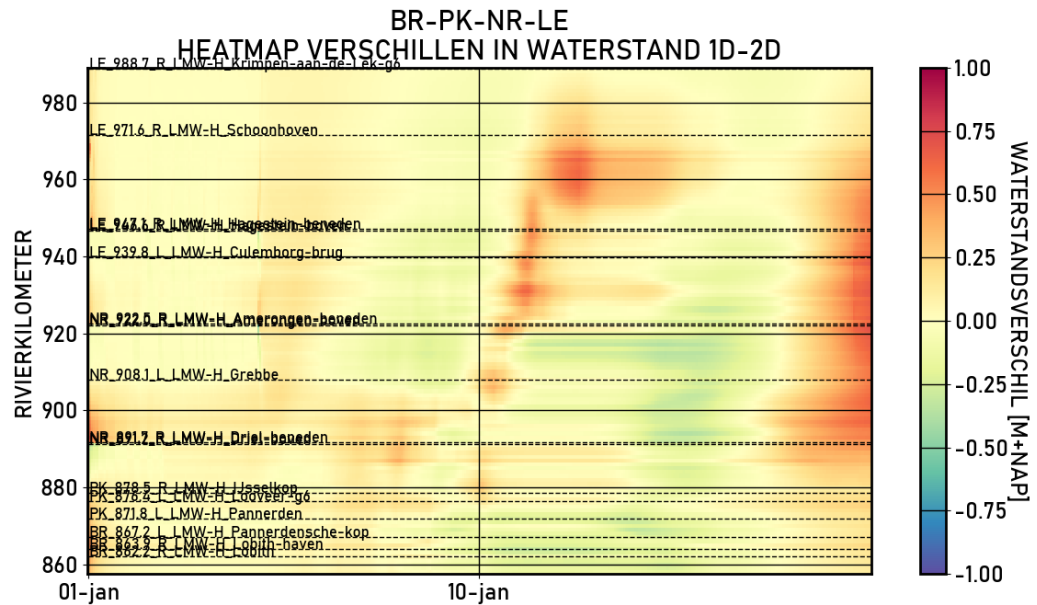
Het profiel waar het grootste verschil optreedt (-0,5 m met 2D) is weergegeven in Figuur 4.5. Het in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* gebruikte profiel heeft meer berging waardoor verwacht werd dat dit resulteert in hogere waterstanden. Echter een vergelijking van de gekalibreerde ruwheden laat zien dat in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* de ruwheden tot 50% lager liggen voor hoge afvoeren dan in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* (zie Berends, Domhof & Visser, 2022) en waardoor de waterstanden lager uitvallen.

Tabel 4.2 Gemiddelden van de bias en de standaardafwijking bij alle LMW stations in de validatiesommen van het sobek-rijn-j24_6-v1a1 model ten opzichte van dflowm2d-rijn-j24_6-v1a vergeleken met de validatieresultaten van het sobek-rijn-j22_6-v1a2 model (Maas, Berends & Gensen, 2023) ten opzichte van dflowm2d-j22_6-v1a. De gemiddelde afwijkingen waarbij j24 meer dan 2 cm verschilt met j22 zijn gearceerd: groen (kleinere afwijking t.o.v. 2D) of oranje (grotere afwijking t.o.v. 2D).

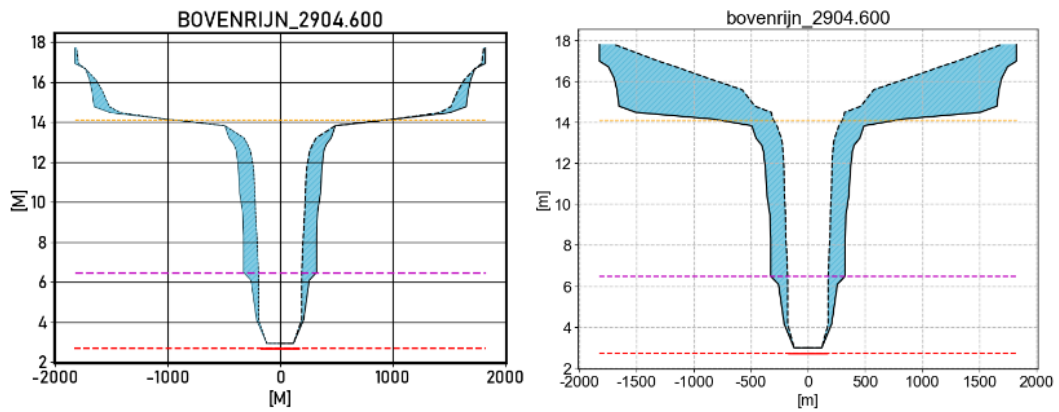
	BR		WL		PK	
	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22
Kalibratie	-0.02±(0.11)	-0.02 ±(0.09)	-0.04±(0.06)	-0.04 ±(0.06)	-0.01±(0.11)	0.00 ±(0.06)
D_6000	0.04 ±(0.03)	0.03 ±(0.04)	0.00 ±(0.04)	0.01 ±(0.04)	0.02 ±(0.05)	0.03 ±(0.05)
D_8000	0.01 ±(0.08)	0.02 ±(0.05)	-0.03 ±(0.09)	-0.03 ±(0.09)	0.04 ±(0.05)	0.05 ±(0.04)
D10000	-0.10 ±(0.17)	-0.05 ±(0.12)	-0.06 ±(0.12)	-0.07 ±(0.11)	-0.04 ±(0.14)	0.02 ±(0.09)
D13000	-0.11 ±(0.14)	-0.06 ±(0.10)	-0.03 ±(0.11)	-0.04 ±(0.10)	-0.03 ±(0.12)	-0.00 ±(0.08)
D16000	-0.10 ±(0.13)	-0.08 ±(0.08)	-0.04 ±(0.08)	-0.04 ±(0.08)	-0.02 ±(0.14)	-0.00 ±(0.08)
S_600	0.02 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	-0.02 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)	-0.21 ±(0.00) [-0.03 ±(0.00)]	-0.17 ±(0.00)
S_1020	0.02 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	0.02 ±(0.01)	0.02 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)
S_2000	0.03 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	-0.08 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	-0.02 ±(0.00)
S_4000	0.03 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	-0.07 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)
S_6000	0.02 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.02 ±(0.00)	0.09 ±(0.00)	0.09 ±(0.00)
S_8000	-0.17 ±(0.00)	-0.11 ±(0.00)	-0.20 ±(0.00)	-0.19 ±(0.00)	-0.09 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)
S10000	-0.34 ±(0.00)	-0.21 ±(0.00)	-0.11 ±(0.00)	-0.14 ±(0.00)	-0.17 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)
S13000	-0.00 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	0.05 ±(0.00)	0.05 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)
S16000	0.03 ±(0.00)	-0.08 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00)	-0.08 ±(0.00)	0.02 ±(0.00)	0.02 ±(0.00)
	NR		LE		IJ	
	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22	Sobek-j24 – dflowm2d-j24	Sobek-j22 – dflowm2d-j22
Kalibratie	0.00±(0.08)	0.02 ±(0.07)	-0.01±(0.05)	0.00 ±(0.04)	-0.01±(0.06)	-0.04 ±(0.17)
D_6000	0.02 ±(0.06)	0.06 ±(0.08)	0.00 ±(0.03)	0.03 ±(0.05)	0.02 ±(0.04)	0.03 ±(0.13)
D_8000	0.07 ±(0.08)	0.10 ±(0.13)	0.04 ±(0.04)	0.07 ±(0.11)	0.04 ±(0.03)	0.04 ±(0.09)
D10000	0.00 ±(0.18)	0.05 ±(0.18)	0.00 ±(0.11)	0.04 ±(0.12)	0.01 ±(0.06)	0.05 ±(0.09)
D13000	0.02 ±(0.14)	0.01 ±(0.12)	0.01 ±(0.10)	0.00 ±(0.07)	0.05 ±(0.08)	0.03 ±(0.10)
D16000	0.04 ±(0.12)	0.03 ±(0.11)	0.04 ±(0.07)	0.01 ±(0.08)	0.03 ±(0.07)	0.02 ±(0.09)
S_600	-0.04 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00) [0.02 ±(0.00)]	-0.35 ±(0.00)
S_1020	-0.01 ±(0.03)	-0.00 ±(0.00)	-0.00 ±(0.01)	0.00 ±(0.00)	0.06 ±(0.00)	-0.20 ±(0.00)
S_2000	0.00 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	-0.01 ±(0.00)	-0.16 ±(0.00)
S_4000	0.01 ±(0.00)	0.06 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	0.07 ±(0.00)	-0.07 ±(0.00)	-0.08 ±(0.00)
S_6000	0.04 ±(0.00)	0.10 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	0.02 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	0.14 ±(0.00)
S_8000	-0.19 ±(0.00)	-0.16 ±(0.00)	-0.11 ±(0.00)	-0.05 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)	-0.03 ±(0.00)
S10000	-0.01 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	-0.00 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)
S13000	0.10 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)	-0.02 ±(0.00)	0.03 ±(0.00)	-0.04 ±(0.00)
S16000	0.03 ±(0.00)	0.06 ±(0.00)	0.01 ±(0.00)	0.00 ±(0.00)	0.05 ±(0.00)	0.04 ±(0.00)



Figuur 4.3 Vergelijking van de waterstandsverschillen tussen 1D en 2D (j24) voor het traject Boven-Rijn, Waal, Nederrijn-Lek bij een dynamische afvoer van 10.000 m³/s.



Figuur 4.4 Vergelijking van de waterstandsverschillen tussen 1D en 2D (j22) voor het traject Boven-Rijn, Waal, Nederrijn-Lek bij een dynamische afvoer van 10.000 m³/s.



Figuur 4.5 Profiel Bovenrijn_2904.600 links sobek-rijn-j22_6-v1a2 en rechts sobek-rijn-j24_6-v1a1. Dit profiel ligt ter hoogte van BR_863.9_R_LMW-H_Lobith-haven waar grote verschillen zichtbaar zijn in sobek-rijn-j24_6-v1a1.

4.1.2 Afvoerverdeling

4.1.2.1 Afvoerverdeling verschil met 2D

Over het algemeen zien we goede overeenkomsten tussen *sobek-rijn-j24_6-v1a1* en *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* voor de afvoerverdeling bij Pannerdensche Kop en IJsselkop. De resultaten zijn ook in lijn met de kalibratieresultaten (Tabel 4.3). Bij lage afvoeren is de bias zelfs kleiner dan bij de kalibratie, maar bij hoge afvoeren neemt het verschil toe. Voor alle validatiesommen is de bias kleiner dan 2% t.o.v. het 2D model. Ook bij de afvoerverdeling zijn de afwijkingen het grootst rond de dynamische en stationaire afvoeren 8000 en 10.000 m³/s, wat overeenkomt met de beschreven waterstandsverschillen. In Tabel 4.4 is een vergelijking gemaakt voor Pannerdensche Kop en IJsselkop voor de maximale afvoeren voor de dynamische validatiesommen. Het grootste verschil is hier ook zichtbaar bij de afvoeren 8000 en 10.000 m³/s. Met name bij de Pannerdensche Kop is het verschil bij hoge afvoeren enkele tientallen m³/s.

Voor de afvoerverdeling bij Veessen-Wapenveld en Reevediep zien we grote verschillen met het 2D model en de kalibratiesom (Tabel 4.5). Dit verschil neemt toe met toenemende afvoer. Bij beide hoogwatergeulen stroomt er in 1D te veel water door de IJssel. De onderschatting van de afvoeren door Veessen-Wapenveld en Reevediep kwam al naar voren uit de kalibratieresultaten en bevindingen tijdens de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. Het grote verschil (324,4 m³/s) bij de validatiesom D13000 wordt veroorzaakt doordat in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* de waterstand op station *IJ_961.2_L_ov_Inlaat-Veessen-boven* precies even hoog is als het openingscriterium voor de inlaat Veessen-Wapenveld waardoor deze niet opengaat. Hierdoor ontstaat er een sterke onderschatting t.o.v. het 2D model bij deze specifieke validatiesom.

Tabel 4.3 Statistieken van de validatiesommen (bias, standaard afwijking (maximale afwijking)) over de gehele afvoergolf met het sobek-rijn-j24_6-v1a1 model ten opzichte van dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a voor afvoerverdeling behorend bij Pannerdensch Kop, IJsselkop, Veessen-Wapenveld en het Reevediep.

	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.00	IJ_962.00	VW_962.00	IJ_991.00	RD_991.00
Kalibratie	-10±56 (201)	10±39 (131)	4±21 (71)	-1±30 (91)	23±80 (324)	-24±81 (30)	18±61 (231)	-18±49 (- 0)
D_6000	-0±18 (38)	7±13 (40)	13±17 (87)	-5±12 (15)	17±18 (104)	-0±0 (0)	23±20 (125)	0±0 (0)
D_8000	21±47 (206)	-2±30 (55)	3±24 (57)	-0±14 (51)	17±12 (59)	-0±0 (0)	24±14 (79)	0±0 (0)
D10000	34±71 (329)	-9±50 (86)	6±38 (166)	-4±23 (51)	13±25 (68)	-0±0 (0)	20±27 (91)	-3±6 (11)
D13000⁷	12±73 (358)	2±67 (289)	-1±51 (266)	5±30 (100)	123±153 (416)	-93±133 (0)	47±41 (211)	-9±19 (43)
D16000	-16±84 (342)	28±77 (310)	6±51 (270)	23±39 (104)	3±108 (401)	42±100 (363)	89±58 (227)	-35±44 (40)
S_600	-17±0 (- 17)	17±0 (17)	0±0 (0)	17±0 (17)	11±0 (11)	-0±0 (0)	11±0 (11)	0±0 (0)
S_1020	-10±0 (- 10)	11±0 (11)	-0±0 (0)	11±0 (11)	11±0 (11)	-0±0 (0)	11±0 (11)	0±0 (0)
S_2000	-10±0 (- 10)	12±0 (12)	33±0 (33)	-21±0 (- 21)	-21±0 (- 21)	-0±0 (0)	-21±0 (- 21)	0±0 (0)
S_4000	-5±1 (-3)	11±0 (12)	25±0 (27)	-14±0 (- 13)	-14±0 (- 14)	-0±0 (0)	-14±0 (- 14)	0±0 (0)
S_6000	3±1 (4)	5±1 (6)	-8±0 (-8)	13±0 (13)	13±1 (13)	-0±0 (0)	13±1 (14)	0±0 (0)
S_8000	79±0 (79)	-70±0 (- 70)	-50±0 (- 50)	-20±0 (- 20)	-21±1 (- 20)	-0±0 (0)	-17±1 (- 16)	-4±0 (-4)
S10000	-67±3 (- 62)	76±1 (78)	47±0 (47)	29±0 (30)	29±2 (29)	-0±0 (0)	27±1 (27)	2±1 (2)
S13000⁸	31±0 (31)	-19±0 (- 19)	-33±0 (- 33)	14±0 (14)	-165±0 (- 164)	178±4 (179)	69±3 (70)	-56±2 (- 56)
S16000	-40±0 (- 39)	53±0 (54)	12±0 (12)	41±0 (41)	86±1 (86)	-46±4 (- 45)	159±3 (160)	-119±2 (- 118)

⁷ Bij de validatiesom D13000 is in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* de waterstand op station IJ_961.3_L_ov_Inlaat-Veessen-boven precies even hoog als het openingscriterium voor de inlaat Veessen-Wapenveld waardoor deze niet opengaat. Hierdoor ontstaat er een sterke onderschatting t.o.v. het 2D model.

⁸ Bij de validatiesom S13000 is in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* zorgt de lokale waterstand ervoor dat de inlaat Veessen-Wapenveld open gaat. In het 2D model zijn de waterstanden lager aldaar waardoor er een grote overschatting te zien is.

Tabel 4.4 Vergelijking van de afvoerverdeling op de splitsingspunten tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 en dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a voor dynamische berekeningen (max3 sobek / max13 dflowfm) met een piek van 6000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		BR_864.00	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.0
D_6000	sobek-j24	5994.8	4055.5	1933.8	1082.1	846.8
	dflowfm2d-j24	5995.2	4061.6	1928.1	1094.4	832.9
	Vershil	-0.4	-6.1	5.7	-12.3	13.9
D_8000	sobek-j24	8002.9	5484.3	2511.4	1436.6	1076.2
	dflowfm2d-j24	7976.4	5370.6	2580.0	1469.8	1080.0
	Vershil	26.5	113.7	-68.6	-33.2	-3.8
D10000	sobek-j24	9998.4	6555.9	3435.9	2034.3	1371.2
	dflowfm2d-j24	9995.4	6617.8	3371.9	2002.6	1364.7
	Vershil	3.0	-61.9	64.0	31.7	6.5
D13000	sobek-j24	12998.7	8475.8	4518.1	2650.6	1866.8
	dflowfm2d-j24	13000.0	8451.2	4543.4	2687.7	1857.3
	Vershil	-1.3	24.6	-25.3	-37.1	9.5
D16000	sobek-j24	16000.4	10122.4	5872.8	3357.2	2518.1
	dflowfm2d-j24	16001.7	10174.4	5822.3	3350.1	2473.8
	Vershil	-1.3	-52.0	50.5	7.1	44.3

Tabel 4.5 Vergelijking van de afvoerverdeling Veessen-Wapenveld en Reevediep tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 en dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a voor dynamische berekeningen (max3 sobek / max13 dflowfm) met een piek van 10.000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		IJ_962.00	VW_962.00	IJ_991.00	RD_991.00
D10000	sobek-j24	1471.2	0.0	1409.1	73.1
	dflowfm2d-j24	1453.1	0.0	1385.1	80.5
	Vershil	18.1	0.0	24.0	-7.4
D13000	sobek-j24	1920.0	129.7	1727.9	217.4
	dflowfm2d-j24	1870.8	454.1	1673.2	264.8
	Vershil	49.2	-324.4	54.7	-47.4
D16000	sobek-j24	1972.3	969.5	2261.7	422.9
	dflowfm2d-j24	1889.8	1068.6	2099.4	533.2
	Vershil	82.5	-99.1	162.3	-110.3

4.1.2.2 Afvoerverdeling verschil met sobek-rijn-j22_6-v1a2

Een vergelijking van de afvoerverdelingstatistieken (t.o.v. het 2D model) van *sobek_rijn-24_6-v1a* met *sobek-rijn-j22_6-v1a2* laat een sterke verbetering zien in de afvoerverdeling voor *sobek_rijn_j24_6-v1a* voor het midden en hoge afvoerbereik (Tabel 4.6). We zien vooral dat de afwijking op Pannerdensche Kop met *sobek-rijn-j24_6-v1a1* meer gelijk getrokken is waardoor de afvoer op het Pannerdensch Kanaal over het algemeen wat is afgenomen en daarmee ook de afvoer naar de Nederrijn en IJssel. Dit is ook terug te zien in Tabel 4.7. Met uitzondering van de D13000 som stroomt er meer water richting de Waal, wat meer in lijn is met 2D. Ook zien we een afname van de afvoer richting de IJssel. Voor de afvoer van 10.000 m³/s (Lobith) is dit 99 m³/s wat neerkomt op een afname van 7%, wat meer in lijn is met 2D (Tabel 4.7).

In Tabel 4.8 zien we grote verschillen bij de afvoerverdeling Veessen-Wapenveld. In het nieuwe model is de maximale afvoer door de hoogwatergeul afgenomen. Het effect voor de afvoeren op de IJssel is beperkter aangezien in het nieuwe model de afvoerverdeling bij de IJsselkop in *sobek_rijn-24_6-v1a* nu meer overeenkomt met de 2D. Het grootste verschil doet zich voor bij de D13000 som (-500 m³/s). Echter, zoals eerder genoemd in 4.1.2.1 is de afvoerverdeling bij D13000 niet geheel representatief. Bij de validatiesom D16000 is het verschil reeds kleiner geworden. De afvoer door het Reevediep is juist toegenomen waardoor er een minder groot verschil met 2D ontstaat.

Tabel 4.7/Tabel 4.8 en Tabel 4.9/Tabel 4.10 geven respectievelijk de absolute en relatieve verschillen (met 2D) tussen *sobek-rijn-j24_6-v1a1* en *sobek-rijn-j22_6-v1a2* weer. Hierin is te zien dat de afvoerverdeling in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* voor de meeste afvoeren dicht bij het 2D model ligt. De uitzondering hierop is de afvoer door Veessen-Wapenveld.

Tabel 4.6 Gemiddelden van de bias, de standaardafwijking en maximale afwijking over de gehele afvoergolf ten opzichte van het 2D model. In deze tabel zijn de afwijkingen voor zowel sobek-rijn-j24_6-v1a1 t.o.v. dflowm2d-rijn-j24-v1a als sobek-rijn-j22_6-v1a2 t.o.v. dflowm2d-rijn-j22-v1a gegeven. De gemiddelde afwijkingen die meer dan 20 m³/s verschillen met sobek-rijn-j22_6-v1a2 zijn gearceerd: groen (kleinere afwijking t.o.v. 2D) of oranje (grotere afwijking t.o.v. 2D).

	WL_869.00		PK_869.00		NR_880.00		IJ_880.00	
	S-j24 – 2D-j24	S-j22 – 2D-j22	S-j24 – 2D-j24	S-j22 – 2D-j22	S-j24 – 2D-j24	S-j22 – 2D-j22	S-j24 – 2D-j24	S-j22 – 2D-j22
D_6000	-0±18 (38)	-47±41 (39)	7±13 (40)	55±36 (116)	13±17 (87)	43±29 (98)	-5±12 (15)	13±25 (50)
D_8000	21±47 (206)	-20±61 (164)	-2±30 (55)	39±49 (118)	3±24 (57)	15±54 (99)	-0±14 (51)	29±27 (98)
D10000	34±71 (329)	-32±62 (273)	-9±50 (86)	56±67 (269)	6±38 (166)	16±63 (212)	-4±23 (51)	48±40 (166)
D13000	12±73 (358)	-20±66 (321)	2±67 (289)	34±78 (381)	-1±51 (266)	-11±74 (326)	5±30 (100)	47±40 (247)
D16000	-16±84 (342)	-35±72 (311)	28±77 (310)	47±80 (398)	6±51 (270)	-1±73 (334)	23±39 (104)	49±39 (255)
S_600	-17±0 (-17)	-17±0 (-17)	17±0 (17)	17±0 (17)	0±0 (0)	0±0 (0)	17±0 (17)	17±0 (17)
S_1020	-10±0 (-10)	-9±0 (-9)	11±0 (11)	10±0 (10)	-0±0 (0)	0±0 (0)	11±0 (11)	10±0 (10)
S_2000	-10±0 (-10)	-1±0 (-1)	12±0 (12)	3±0 (3)	33±0 (33)	21±0 (21)	-21±0 (-21)	-18±0 (-18)
S_4000	-5±1 (-3)	-82±0 (-81)	11±0 (12)	87±0 (88)	25±0 (27)	87±0 (88)	-14±0 (-13)	-0±0 (0)
S_6000	3±1 (4)	-54±0 (-53)	5±1 (6)	62±0 (62)	-8±0 (-8)	12±0 (13)	13±0 (13)	49±0 (49)
S_8000	79±0 (79)	72±0 (73)	-70±0 (-70)	-64±0 (-64)	-50±0 (-50)	-94±0 (-93)	-20±0 (-20)	30±0 (30)
S10000	-67±3 (-62)	-123±0 (-122)	76±1 (78)	132±0 (133)	47±0 (47)	21±0 (22)	29±0 (30)	111±0 (112)
S13000	31±0 (31)	70±0 (70)	-19±0 (-19)	-58±0 (-58)	-33±0 (-33)	-75±0 (-74)	14±0 (14)	16±0 (16)
S16000	-40±0 (-39)	-81±0 (-80)	53±0 (54)	94±0 (94)	12±0 (12)	48±0 (49)	41±0 (41)	45±0 (46)

Tabel 4.7 Vergelijking van de afvoerverdeling op de splitsingspunten tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 en sobek-rijn-j22_6-v1a2 voor dynamische berekeningen (max3) met een piek van 6000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		BR_864.00	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.0
D_6000	sobek-j24	5994.8	4055.5	1933.8	1082.1	846.8
	sobek-j22	5992.8	4005.9	1985.2	1108.6	876.3
	Verschil	2.1	49.6	-51.4	-26.4	-29.5
D_8000	sobek-j24	8002.9	5484.3	2511.4	1436.6	1076.2
	sobek-j22	7994.2	5477.9	2505.7	1386.3	1117.7
	Verschil	8.7	6.4	5.7	50.2	-41.5
D10000	sobek-j24	9998.4	6555.9	3435.9	2034.3	1371.2
	sobek-j22	9986.5	6476.4	3503.3	2033.1	1470.1
	Verschil	11.9	79.5	-67.4	1.3	-98.8
D13000	sobek-j24	12998.7	8475.8	4518.1	2650.6	1866.8
	sobek-j22	12996.3	8505.6	4491.6	2629.6	1863.6
	Verschil	2.4	-29.8	26.5	21.0	3.2
D16000	sobek-j24	16000.4	10122.4	5872.8	3357.2	2518.1
	sobek-j22	15999.4	10084.5	5916.4	3419.3	2499.6
	Verschil	1.0	37.8	-43.6	-62.1	18.5

Tabel 4.8 Vergelijking van de afvoerverdeling Veessen-Wapenveld en Reevediep tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 en sobek-rijn-j22_6-v1a2 voor dynamische berekeningen (max3) met een piek van 10.000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		IJ_962.00	VW_962.00 ⁷	IJ_991.00	RD_991.00
D10000	sobek-j24	1471.2	0.0	1409.1	73.1
	sobek-j22	1576.9	0.0	1525.5	63.7
	Verschil	-105.7	0.0	-116.4	9.4
D13000	sobek-j24	1920.0	129.7	1727.9	217.4
	sobek-j22	1838.6	630.3	1858.9	149.4
	Verschil	81.4	-500.5	-131.0	68.0
D16000	sobek-j24	1972.3	969.5	2261.7	422.9
	sobek-j22	1954.2	1038.3	2357.2	302.6
	Verschil	18.2	-68.7	-95.5	120.3

Tabel 4.9 Vergelijking van het verschil in afvoerverdeling op de splitsingspunten tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 versus dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a en sobek-rijn-j22_6-v1a2 versus dflowfm2d-rijn-j22_6-v1a voor dynamische berekeningen (max3) met een piek van 6000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		BR_864.00	WL_869.00	PK_869.00	NR_880.00	IJ_880.0
D_6000	Vershil J24-2D_j24	-0.4	-6.1	5.7	-12.3	13.9
	Vershil J22-2D_j22	-3.6	-62.2	62.1	15.7	47.0
D_8000	Vershil J24-2D_j24	26.5	113.7	-68.6	-33.2	-3.8
	Vershil J22-2D_j22	18.9	92.0	-64.1	-80.0	40.6
D10000	Vershil J24-2D_j24	3.0	-61.9	64.0	31.7	6.5
	Vershil J22-2D_j22	-8.7	-134.0	124.4	23.0	105.6
D13000	Vershil J24-2D_j24	-1.3	24.6	-25.3	-37.1	9.5
	Vershil J22-2D_j22	-3.9	62.3	-60.1	-73.9	13.8
D16000	Vershil J24-2D_j24	-1.3	-52.0	50.5	7.1	44.3
	Vershil J22-2D_j22	-2.5	-88.3	92.0	44.8	47.5

Tabel 4.10 Vergelijking van de afvoerverdeling Veessen-Wapenveld en Reevediep tussen sobek-rijn-j24_6-v1a1 versus dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a en sobek-rijn-j22_6-v1a2 versus dflowfm2d-rijn-j22_6-v1a voor dynamische berekeningen (max3) met een piek van 10.000 m³/s tot 16.000 m³/s.

		IJ_962.00	VW_962.00 ⁷	IJ_991.00	RD_991.00 ⁹
D10000	sobek-j24	18.1	0.0	24.0	-7.4
	sobek-j22	133.7	0.0	69.5	-16.8
D13000	sobek-j24	49.2	-324.4	54.7	-47.4
	sobek-j22	-44.4	182.7	-25.3	-115.4
D16000	sobek-j24	82.5	-99.1	162.3	-110.3
	sobek-j22	48.5	-12.5	-255.9	-230.6

⁹ Aangezien het Reevediep nog niet meestroomde in dflowfm2d-rijn-j22-v1a is de sobek-rijn-j22_6-v1a2 afvoer door het Reevediep vergeleken met de afvoer in dflowfm2d-rijn-j24-v1a.

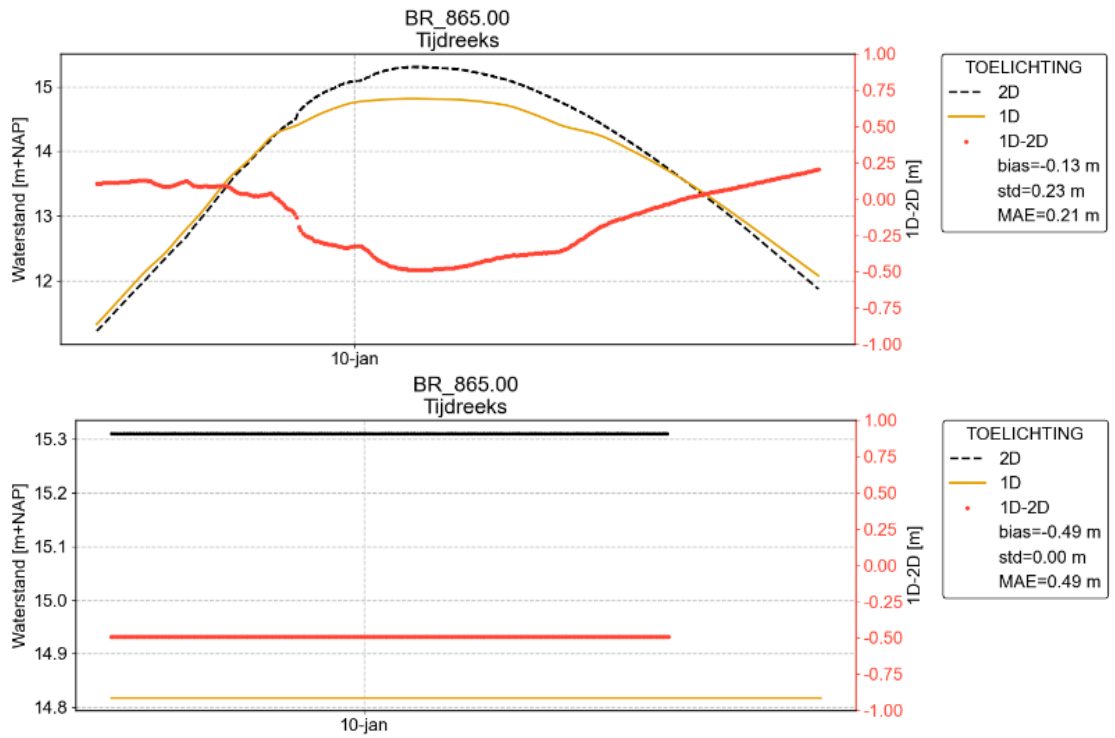
4.2 Aandachtspunten verschillen tussen 1D en 2D modelresultaten

In de validatieresultaten zien we een significante onderschatting van de waterstanden op de Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch kanaal bij de dynamische afvoeren van 10.000 m³/s en groter en bij de stationaire afvoeren van 8000 en 10.000 m³/s. De grootste verschillen tussen 1D en 2D zijn te zien op de Boven-Rijn bij een stationaire afvoer van 10.000 m³/s (Figuur 4.6). Tevens is het verschil tussen 1D en 2D in de j24-modellen hier groter dan bij de voorgaande j22-modellen.

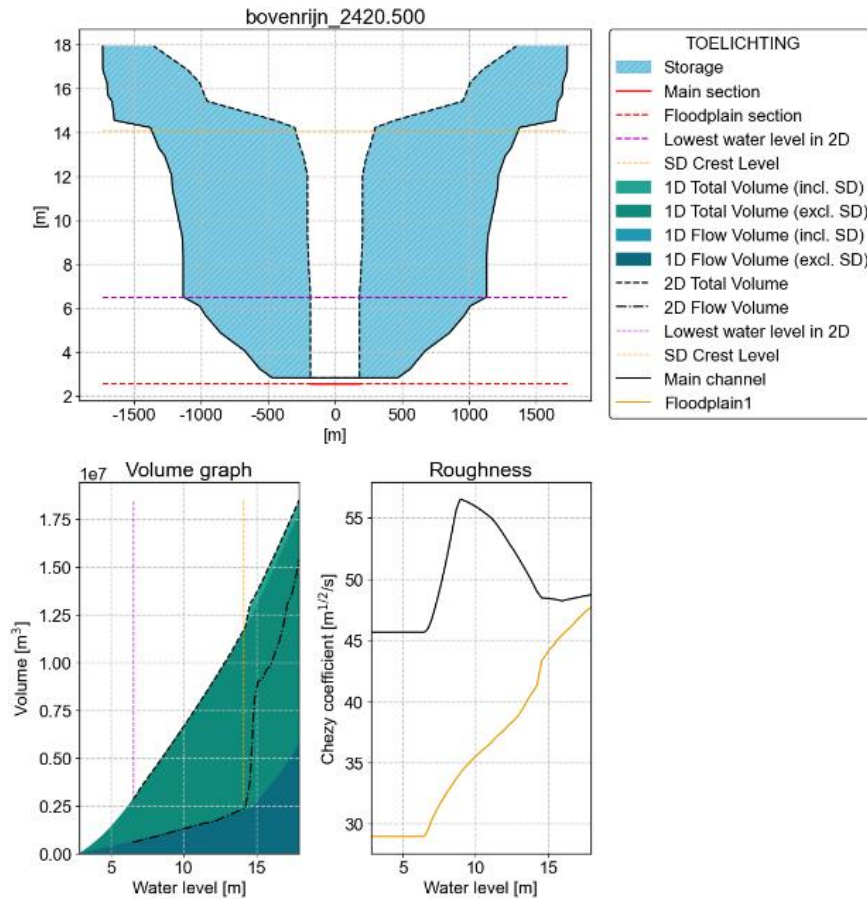
Bij de dynamische som beginnen de waterstanden vanaf 14,4 m +NAP uit elkaar te lopen tot een maximaal verschil van 0,45 m. Bij de stationaire som zien we een soortgelijk verschil. Kijkend naar het dwarsprofiel op deze locatie valt op dat rond deze waterstand het 2D stromingsvolume sterk toeneemt en dat dit bij 1D niet het geval is. Verder treedt bij deze waterstand het zomerdijk effect in werking (Figuur 4.7, linksonder). Ook bij de dynamische afvoeren van 13.000 en 16.000 m³/s is een onderschatting van de waterstand rond deze waterstanden zichtbaar, zowel bij de stijgende, als dalende trend van de golf. Daarnaast stroomt op deze locatie de kom "De Bijland" mee met de rivier vanaf een waterstand van 14,4 m +NAP. Bij toenemende afvoer stroomt het water richting regelwerk Pannerden wat zorgt voor toenemende waterstanden op de Boven-Rijn en toename van de afvoer richting de Waal. Deze mogelijkheid is niet aanwezig in *sobek-rijn-j24_6-v1a1* (en voorgaande versies). Dit kan een van de verklaringen zijn waarom de waterstand op de Boven-Rijn en Boven-Waal in 1D significant onderschat worden. Onderzoek naar modelmaatregelen in 1D kan interessant zijn om de mogelijkheden te verkennen. Hieruit lijkt te kunnen worden geconcludeerd dat het volstromen van de uiterwaarden op dit punt in de rivier significant anders verloopt in 2D dan in 1D. Door kalibratie van de ruwheden in het zomerbed wordt dit hersteld bij hogere afvoeren, waar de modellen weer bij elkaar komen.

In *sobek-rijn-j22_6-v1a2* was dit zomerdijkeffect ook al aanwezig wat resulteerde in een onderschatting van waterstanden op de Boven-Rijn en Waal. Het toegenomen verschil kan verklaard worden doordat de gekalibreerde ruwheden op dit traject lager zijn dan in *sobek-rijn-j22_6-v1a2* wat resulteert in minder opstuwing en dus lagere waterstanden.

Ondanks de nieuwe methode voor het genereren van de dwarsprofielen lijkt het zomerdijk effect nog van grote invloed te zijn rondom de waterstanden waar in het 2D model de uiterwaarden volstromen. De nieuwe profielen bestaan allen uit een groter aandeel bergend volume t.o.v. de *sobek-rijn-j22_6-v1a2* profielen. Echter door de lagere gekalibreerde ruwheid is het effect in de waterstand niet terug te zien in het model. Een mogelijkheid is om te kijken of een aanpassing aan de sobek sectie- en gebiedsvakken (zoals gedaan bij Veessen-Wapenveld en het Reevediep) kan resulteren in betere profielen waardoor de waterstanden meer in lijn komen met 2D.



Figuur 4.6 Waterstandsverschil 1D en 2D voor validatiesom D10000 (boven) en S10000 (onder).



Figuur 4.7 FM2PROF dwarsprofiel van bovenrijn_2420.500 ter hoogte van BR_865.00.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Er is een actualisatie gedaan van het zesde generatie Sobek model van de Rijntakken. Hierdoor is het versienummer gewijzigd van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* naar *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. In deze actualisatie zijn er geen wijzigingen aan de takkenstructuur doorgevoerd, maar is er wel gewerkt aan een verbetering van de dwarsprofielen, RTC en observatiepunten in de schematisatie. Van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* is een variant gemaakt voor RWsOS: *sobek-rijn-j24_6-v1a1-rwsos*. Het 1D model is gebaseerd op *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*. De kalibratie- en validatieresultaten zijn vergeleken met 2D en komen in grote lijnen goed overeen. Tevens is er een vergelijking gedaan met *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.

5.1.1 Analyse verschillen in resultaten tussen 1D en 2D

- De kalibratie van het model resulteert in mindere resultaten voor de afvoerdeling bij Veessen-Wapenveld en het Reevediep in vergelijking met de ongekalibreerde status.
- De waterstanden op de Boven-Rijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal worden sterk onderschat rond afvoeren 8000 en 10.000 m³/s. Dit heeft te maken met het zomerdijk effect dat bij de corresponderende waterstanden optreedt. Ondanks de nieuwe methode voor het genereren van de dwarsprofielen lijkt het zomerdijk effect nog van grote invloed te zijn rondom de waterstanden waar in het 2D model de uiterwaarden volstromen. Een mogelijke oorzaak is het volstromen van “De Bijland” in 2D, hiervoor is een aanbeveling gedaan voor vervolgonderzoek.
- De afvoerdeling IJssel - Reevediep wordt nog onderschat (20%, of 110 m³/s bij 16.000 m³/s) tussen 1D en 2D. Hierdoor stroomt er bij hoog water in het model minder afvoer door de bypass dan het 2D model simuleert. Het lijkt er op dat de nieuwe profielen en het verbreden van het meest bovenstroomse dwarsprofiel op het Reevediep nog niet voor de gewenste resultaten zorgen. Een mogelijke oorzaak kan zijn dat de in 2D het Reevediep via twee instroompunten volloopt en daardoor meer afvoer van de IJssel trekt. Vervolg onderzoek wordt aanbevolen (5.2)

5.1.2 Analyse verschillen in resultaten met *sobek-rijn-j22_6-v1a2*

- De nieuwe methode om profielen aan te maken heeft over het algemeen een positief effect. De variatie van de waterstanden over de loop van de rivier is na kalibratie afgenomen en er is een minder groot verschil tussen de afvoerafhankelijke ruwheden.
- Het effect van de nieuwe profielen is echter in het gekalibreerde model beperkt gebleken, er is geen significante verbetering zichtbaar in de waterstanden t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Voor sommige delen op de BR, WL en PK zijn de verschillen met 2D zelfs groter geworden.
- Door extra gewicht aan de afvoerdeling toe te kennen in de kalibratie is de afvoerdeling bij Pannerdensch Kop en IJsselkop sterk verbeterd. Het verschil tussen 1D en 2D is kleiner geworden voor iedere afvoer t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.
- De afvoerdeling Reevediep is verbeterd t.o.v. *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Er stroomt nu 150 m³/s meer water door het Reevediep bij een afvoer van 16.000 m³/s dan voorheen. Dat is een toename van 50%.

5.1.3 Modelaanpassingen en kalibratie (changelog)

De update van *sobek-rijn-j22_6-v1a2* naar *sobek-rijn-j24_6-v1a1* omvat de volgende aanpassingen:

- Er zijn nieuwe dwarsprofielen afgeleid met de aangepaste FM2PROF software (versie 2.3). Door een aanpassing in de software wordt er nu beter onderscheid gemaakt tussen bergend en stroomvoerend volume.
- De gebiedsvakken die gebruikt worden bij het afleiden van de dwarsprofielen vanuit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* zijn rondom de takken Veessen-Wapenveld en Reevediep aangepast om zo de werkelijke situatie te volgen om realistischere profielen aan te maken.
- Toevoeging en aanpassing van D-RTC sturing:
 - Toevoeging van de RTC sturing “VeWa_leegloop”. Deze RTC sturing zorgt ervoor dat de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld leeg wordt gepompt nadat er een hoogwater is gepasseerd.
 - Toevoeging van RTC sturing “WKC Amerongen”. Deze RTC sturing is toegevoegd om de werking van WKC Amerongen na te bootsen. Deze aanpassing is overgenomen uit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.
 - Aanpassing van RTC sturing “Driel”. Aanpassing van het stuurpunt voor de werking van het stuurprogramma. Deze aanpassing is overgenomen uit *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*.
- Toevoegen van de volgende LMW-stations aan schematisatie:
 - *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW*
 - *DM_68.33_L_LMW-H_Reevesluis-noord*
 - *DM_70.90_L_LMW-H_Roggebotsluis-zuid-g6*
 - *VS_71.2_R_LMW-H_Roggebotsluis-noord*
- Het model is gekalibreerd op waterstanden en afvoer van *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*. Om de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop en IJsselkop goed te laten benaderen is er voor gekozen om meer gewicht aan de afvoerverdeling te geven dan bij *sobek-rijn-j22_6-v1a1(2)*. De standaarddeviatie in OpenDA is verlaagd van 10 naar 2,5 voor kalibratie van de afvoeren op Pannerdensch Kop en IJsselkop waardoor de afvoerverdeling meer overeen komt met 2D.

5.2 Aanbevelingen

In dit project zijn enkele verbeteringen doorgevoerd ten opzichte van *sobek-rijn-j22_6-v1a2*. De meeste van deze verbeteringen hebben een positief effect gehad op de resultaten. In dit rapport zijn er enkele zaken naar voren gekomen die voor toekomstige actualisaties of onderzoeken overwogen kunnen worden:

- Met het oog op aankomende actualisaties is het wenselijk om te onderzoeken hoe effectief het aanpassen van het gewicht van de afvoerverdeling is en waar een optimum gevonden kan worden voor zowel waterstanden als afvoerverdeling. Dit om te voorkomen dat er tijdens de bouw nog vergelijkingen tussen kalibratiemethodes gedaan moeten worden. [[HYRIDEM-411](#)]
- Afhankelijk van de resultaten van bovenstaand onderzoek kan heroverwogen worden of het effectief is om de takken Veessen-Wapenveld en Reevediep mee te kalibreren. Met de nieuwe profielen lijkt het voornaamste probleem dat profielen uit te veel, dan wel te weinig bergend volume bestonden opgelost, waardoor er meer ruimte binnen de kalibratie mogelijkheden ontstaat. Ook het effect van lateralen (met name op de IJssel) kan meegenomen worden bij kalibratie en profielgeneratie. Deze lateralen kunnen op de IJssel een significante bijdrage hebben op de totale afvoer.
- Onderzoek naar het aandeel van het kalibratiegewicht of nieuwe profielen op het verkleinen van het verschil in afvoerverdeling met 2D. Tijdens de bouw van *sobek-rijn-*

j24_6-v1a1 zijn er twee grote aanpassingen gedaan t.o.v *sobek-rijn-j22_6-v1a2*: het gewicht op de afvoerverdeling is verhoogd van 10 naar 2.5 stdv en er is gebruik gemaakt van een nieuwe profiel generatie methode. De wens is om te zien wat het effect is van welke aanpassing. Een aanpak kan als volgt: Kalibreren met verschillende gewichten op de afvoerverdeling en die onderling vergelijken met huidige resultaten. Het verschil met *j22* kan daarna toegerekend worden aan de nieuwe profielen. [[HYRIDEM-415](#)]

- Onderzoek naar het effect van het meestromen van “De Bijland” en implementatie van mogelijke modelmaatregelen. Vermoed wordt dat het meestromen van de kom “De Bijland” in het 2D model zorgt voor grote waterstandsverschillen op de Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal. Daarnaast is onderzoek naar mogelijke modelmaatregelen (vergelijkbaar met 2D) interessant om te kijken of dit kan resulteren in een verbetering van de afvoerverdeling. [[HYRIDEM-413](#)]
- Nader onderzoek naar het effect van de gebiedsvakken op de afvoerverdeling. Mogelijk dat een aanpassing in de gebiedsvakken effect kan hebben op de profielen rondom de splitsingspunten en zo mogelijk de afvoerverdeling kan verbeteren. [[HYRIDEM-419](#)]
- Onderzoek naar de afvoerverdeling bij het Reevediep. Deze wijkt nog steeds significant af van 2D. Een mogelijke verklaring hiervoor is de manier waarop Reevediep in het 2D model volloopt. In 2D stroomt er zowel via de inlaatdrempel als via de Scheeresluis water het Reevediep in. De huidige aanpassingen aan het bovenstroomse profiel van Reevediep komen nu overeen met de 2D dimensies, echter ontbreekt nog het volume dat via de Scheeresluis stroomt. Dit kan onderzocht worden door afvoer door de Scheeresluis te realiseren d.m.v. een directe connectie met de IJssel via een tak of een lateraal op te leggen. [[HYRIDEM-412](#)]

Aanpassing in de schematisatie

- Tijdens de bouw van dit model viel op dat de knoop Reevemeer niet meer overeenkomt met *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a*. Dit heeft tot gevolg dat het enkele profiel [*Reevediep_0.000*] breder is dan de werkelijke situatie. Aangezien dit geen significante invloed heeft op de waterstanden is het tijdens de bouw van *sobek-rijn-j24_6-v1a1* enkel toegevoegd aan de backlog. De uit te voeren werkzaamheden zullen inhouden dat de huidige tak *Reevemeer* met 700 meter verlengd dient te worden tot de Reevesluis, er rekenpunten toegevoegd dienen te worden en vervolgens nieuwe profielen afgeleid moeten worden. Op deze manier komt de 1D schematisatie weer overeen met 2D.
- Ook moet de tak Reevediep door getrokken worden tot *RD_991.50_R_ov_Scheeresluis-beneden-LMW* om zo het station op de eigenlijke baseline locatie te kunnen plaatsen.

6 Referenties

- Agtersloot, R. C., Michels, C. H., & Van der Veen, R. (2019). *Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijntakken*.
- Berends, K. D., Domhof, B., & Visser, A. J. (2022). *Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model 1D*. Deltarres: 11208053-003-ZWS-0006.
- Berends, K., Diermanse, F., & de Jong, J. (2021). *Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat*. Deltares, rapport 11206813-018-ZWS-0003.
- Berends, K., Domhof, B., & Visser, A. (2021). *Pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Rijn: Modelopzet, kalibratie en validatie o.b.v. FM2PROF*. 11206813-004-ZWS-0002: Deltares.
- Domhof, B. (2018). *Discharge and location dependency of calibrated main channel roughness: case study on the river Waal and IJssel*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006038>: University of Twente.
- Maas, B., Gensen, M., & Berends, K. (2023). *Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijn 2023: sobek-rijn-j22_6-v1a2*. Deltares: 11209233-003-ZWS-0007.
- Vallei en Veluwe. (2024, Juni 1). *Hoe stroomt het water uit de hoogwatergeul?* Opgehaald van <https://www.vallei-veluwe.nl/toptaken/bij-mij-in-de-buurt/afgerond/veessen-wapenveld/informatieborden/stroomt-water/>
- Van den Hoek, A. (2024). *Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijn 2024*. Deltares.
- Van Renswoude, R. C., Vos, T. C., & Beyer, D. (2024). *Toelichting toegeleverde gegevens Rijntakken en Vechtdelta j24_6*. RWS Oost-Nederland.

A Memo: Modelonderzoek Rijn 1D Q1

Modelonderzoek Rijn 1D Q1 (Berends, Maas en Gensen, 2024).

Memo is meegestuurd bij oplevering van dit rapport.

02_Memo/Bijlage_A-11210333-003-ZWS-0001_v1.0-Modelonderzoek Rijn 1D Q1.pdf

B Memo: Verschilanalyse FM2Prof 2.3

Effect van nieuwe methode voor aanmaken dwarsprofielen met FM2PROF 2.3 (Maas, 2024).

Memo is meegestuurd bij oplevering van dit rapport.

02_Memo/Bijlage_B-11210333-003-ZWS-0004_v1.0-Effect van nieuwe methode voor aanmaken dwarsprofielen met Fm2Prof 2.3.pdf

C Verschilanalyse aanpassing gebiedsvakken

De aanpassing van de gebiedsvakken Veessen-Wapenveld en Reevediep hebben de onderstaande profielen gewijzigd (Tabel C-1). Enkel profielen dichtbij de aanpassing (op minder dan een kilometer afstand) zijn aangepast. In totaal gaat het om 16 profielen verdeeld over de IJssel, Veessen-Wapenveld en het Reevediep. Om te controleren of de aangepaste profielen niet tot onwenselijke en onverwachte resultaten leiden is er een verschilanalyse uitgevoerd met het 2D model (*dlfowfm2d-rijn-j22_6-v1a*) en *sobek-rijn-j22_6-v1a2*.

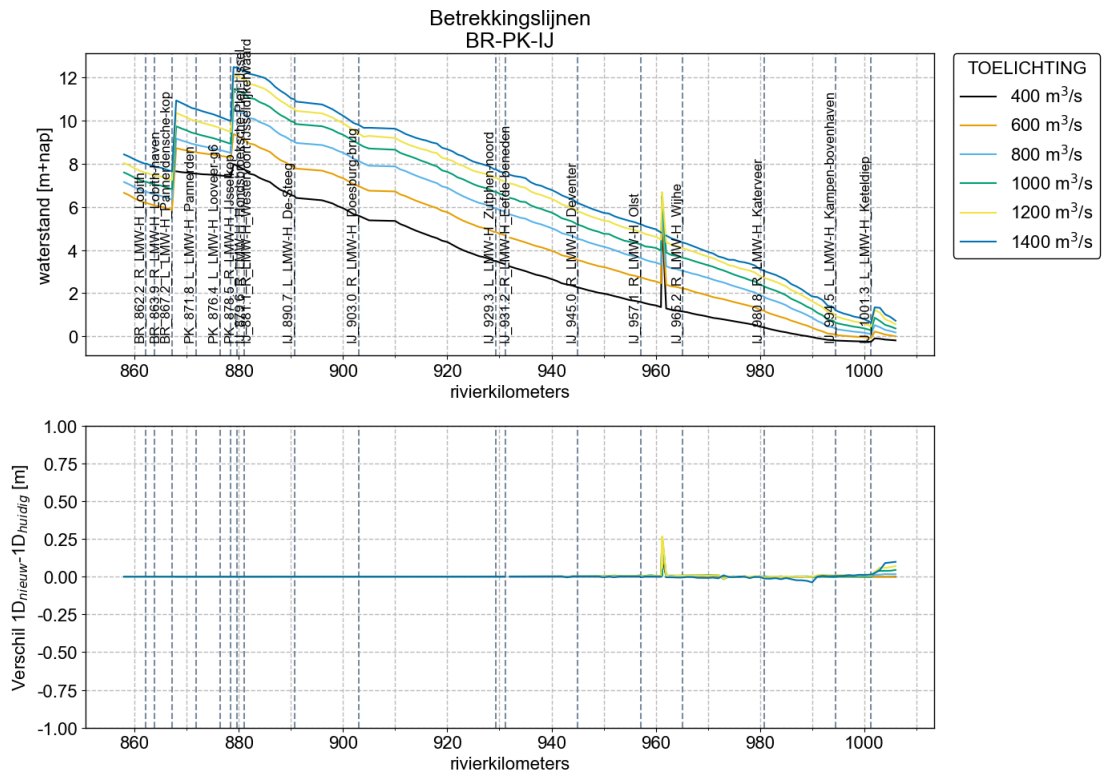
Hoe dichterbij de aanpassing van het gebiedsvak hoe groter de verandering is geweest.

Tabel C-1 Profielen beïnvloed door aanpassing gebiedsvakken.

Tak	Chainage
IJssel_3	10298.75
IJssel_3	10789.17
IJssel_3	11279.58
IJssel_3	11770.0
IJssel_4	0.0
IJssel_5	9596.19
IJssel_6	0.0
IJssel_6	482.53
IJssel_6	965.05
IJssel_6	1447.58
Reevediep	498.13
Reevediep	976.27
VeessenWapenveld	7816.45
VeessenWapenveld	8293.22
VeessenWapenveld	8771.22
VeessenWapenveld	9248.61

Effect op waterstand en afvoerverdeling

Er zijn voor *sobek-rijn-j22_6-v1a2* kleine verschillen zichtbaar op de IJssel ter hoogte van Veessen-Wapenveld en Reevediep ten opzichte van het 1D *sobek-rijn-j24_6-v1a1*. Ter hoogte van Veessen-Wapenveld is er een toename van maximaal 2 cm zichtbaar en bij Reevediep een waterstandsdaling van maximaal 5 cm. Daarnaast is er ook een kleine toename op het Ketelmeer. Het Reevediep komt nu beter overeen met de 2D resultaten.

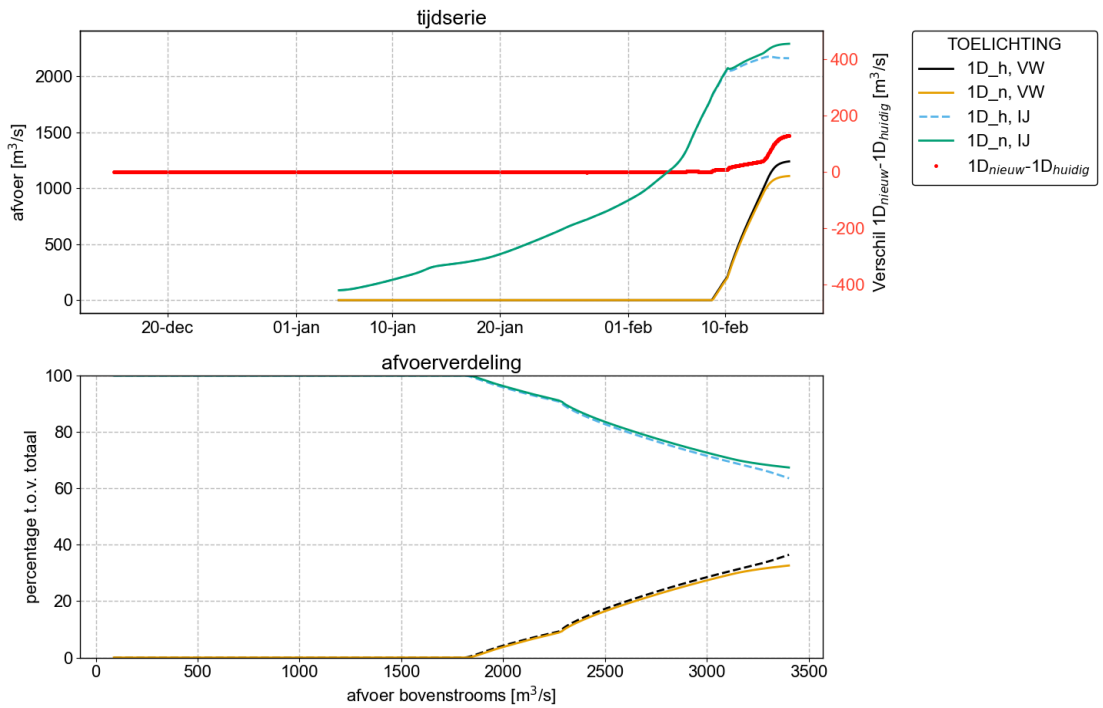


Figuur C.1 Waterstandsverschillen veroorzaakt door aanpassen van de gebiedsvakken Veessen-Wapenveld en Reevediep. Dit is een vergelijking tussen de gebiedsvakken als gebruikt in sobek-rijn-j22_6-v1a2 (1D-huidig) en sobek-rijn-j24_6-v1a1 (1D-nieuw).

Afvoerverdeling [ongekalibreerd]

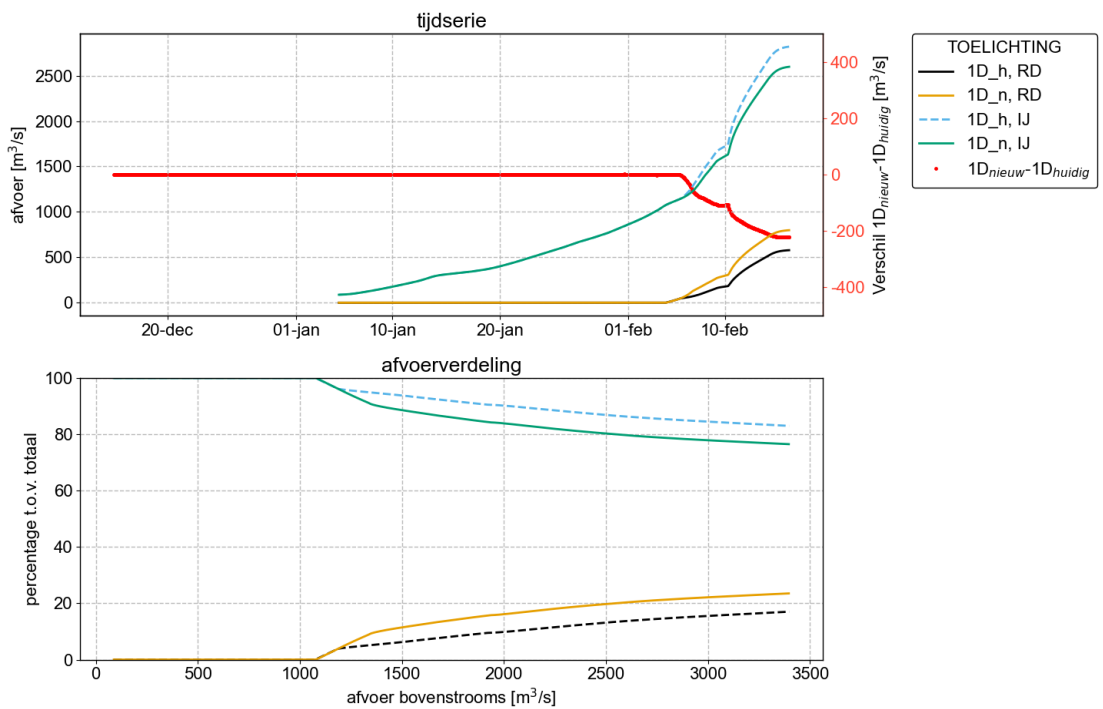
De afvoerverdeling voor Veessen-Wapenveld en Reevediep komt na de aanpassingen dichter in de buurt van het 2D resultaat. In *sobek-rijn-j22_6-v1a2* stroomde er te veel water door Veessen-Wapenveld en juist te weinig door het Reevediep. Met de aanpassingen is de afvoer door Veessen-Wapenveld afgenomen en de afvoer door Reevediep juist toegenomen.

VEESSEN WAPENVELD



Figuur C.2 Afvoerverdeling Veessen-Wapenveld door aanpassen van benedenstroomse deel van het gebiedsvak.

REEVEDIEP



Figuur C.3 Afvoerverdeling Reevediep door aanpassen van bovenstroomse deel van het gebiedsvak.

D Aanpassingen voor RWsOS

Deze bijlage beschrijft welke aanpassingen moeten worden gedaan aan het basis 1D model om de variant te maken, die binnen RWsOS gebruikt wordt. De paragrafen E.1 en E.2 zijn deels overgenomen uit de memo "11200564-000-ZWS-0012", getiteld "Requirements SOBEK3 models for use in RWsOS-Rivieren" d.d. 30 juni 2017, van Matthijs den Toom en Aukje Spruyt. Paragraaf 0. beschrijft de aanpassingen aan de schematisatie.

Algemene aanpassingen

D.1.1 Restart read and write

Delft-FEWS maakt gebruik van restart files. In het *.md1d bestand moeten de parameters *UseRestart* en *WriteRestart* op '1' (=true) staan. Onder 'AdvancedOptions', zet "CacheMode" op "Read".

D.1.2 Randvoorwaarden en lateralen

Zowel randvoorwaarden als lateralen worden door Delft-FEWS als een tijdserie opgelegd. Leg bij alle lateralen een afvoer van 0 m³/s op. Leg op de randen een tijdserie op met een standaardwaarde van -0.2 m (Ketelmeerranden), 0.5 m (Krimpen a/d Lek & Hardinxveld), 0 m³/s (Eefde) en 2000 m³/s (Lobith, zie 0).

D.1.3 Uitvoertijdstep

Delft-FEWS leest de uitvoer enkel per uur. Zet de uitvoertijdstep (MapOutputTimeStep en HisOutputTimeStep) op 3600 s.

D.1.4 Uitvoerparameters

De volgende uitvoerparameters moeten op "Current" staan. Alle overige moeten op "None".

ResultsNodes/Grid points

- Water level
- Water depth

ResultsObservations/Observation points

- Water level (op)
- Discharge (op)
- Velocity (op)

ResultsBranches/Reach segments

- Discharge
- Velocity
- Flow area
- Subsection parameters (*FP1, *FP2, *Main. Bijvoorbeeld ChezyFP1).

ResultsStructures/Structures

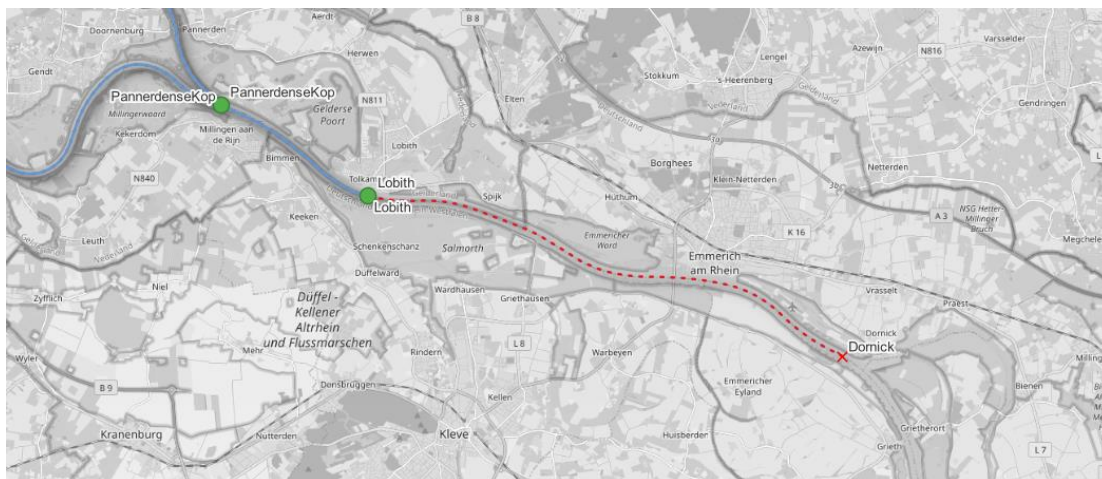
- Crest level (s)
- Crest width (s)
- Gate lower edge level (s)
- Gate Opening height (s)

D.2 Aanpassing aan de schematisatie

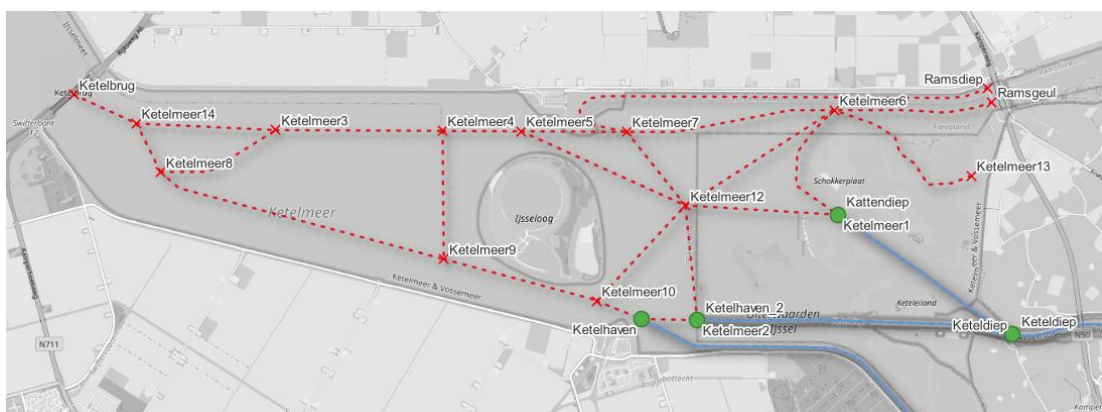
Het basis model (*sobek-rijn-j24_6_v1a1*) heeft dezelfde modelranden als het 2D model (*dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a1*). De RWsOS variant (*sobek-rijn-j24_6_v1a1-rwsos*) heeft een aangepaste schematisatie, die gebruikt kan worden binnen de configuratie van RWsOS-Rivieren.

De schematisatie verschilt op de volgende punten van het basismodel:

- 1 De tak *DuitseRijn* tussen de knopen Dornick en Lobith wordt verwijderd (Figuur D.1). Hierdoor wordt Lobith de bovenrand van het model, in plaats van Dornick.
- 2 De takken in het Ketelmeer worden grotendeels verwijderd (Figuur D.2). Hierdoor vervalt de knoop Ketelbrug als benedenrand. De benedenrand op het Ketelmeer wordt nu gevormd door drie knopen: Ketelhaven, Ketelhaven 2 (zie punt 3) en Kattendiep (zie punt 3). Alle drie de randen worden binnen RWsOS geforceerd met de databron "Ketelhaven".
- 3 Hernoemen van de knopen:
 - "Ketelhaven" naar "Ketelhaven_1"
 - "Ketelmeer2" naar "Ketelhaven_2"
 - "Ketelmeer1" naar "Kattendiep"



Figuur D.1 Verwijdering van de tak *DuitseRijn*. De rode elementen zijn wel aanwezig in het basismodel, maar niet in de RWsOS variant.



Figuur D.2 Verwijderde takken in het ketelmeer. De rode elementen zijn wel aanwezig in het basismodel, maar niet in de RWsOS variant.

E Resultaten – Digitale bijlage

De resultaten zijn aangeleverd als databijlage bij oplevering van dit rapport.

De digitale databijlage is als volgt gestructureerd:

Structuur data aanlevering bij oplevering sobek-rijn-j24_6-v1a1

01_Rapport

- Het hoofdrapport in PDF formaat: Maas, B.F & Berends, K.D. (2024) Actualisatie Modellen Rijn 2024: sobek-rijn-j24_6-v1a1.

02_Memo

- Bevat twee onderzoeksmemo's welke in het rapport naar verwezen wordt als Bijlage A en Bijlage B.

03_Model

- Bevat het gekalibreerde en gevalideerde model: *sobek-rijn-j24_6-v1a1*.
- Bevat de RWsOS variant: *sobek-rijn-j24_6-v1a1-rwsos*.

04_Resultaten_FM2PROF

- Bevat de dwarsprofielen welke zijn opgenomen in het model. Aangemaakt met FM2PROF 2.3.

05_Resultaten_ongekalibreerd

- Bevat data over de vergelijking met *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* in de vorm van *error_statistics.csv* (waterstand per observatiepunt), afvoerverdeling en figuren:
 - Afvoerverdeling
 - Heatmaps (waterstand)
 - Langsprofielen (waterstand)
 - Stations (waterstandsverschil per observatiepunt)

06_Resultaten_kalibratie

- Bevat data over de vergelijking met *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* in de vorm van *error_statistics.csv* (waterstand per observatiepunt), afvoerverdeling en figuren:
 - Afvoerverdeling
 - Heatmaps (waterstand)
 - Langsprofielen (waterstand)
 - Stations (waterstandsverschil per observatiepunt)

07 Resultaten validatie

- Bevat een overzicht van alle validatiesommen in de volgende bestanden:
 - Heatmaps per validatiesom
 - Langsprofielen (waterstand), statistiek max3 en last3, onderverdeeld in Laag, Midden en Hoog afvoerbereik.
 - master_summary_lmww.csv – de gemiddelde bias, standaardafwijking en maximale afwijking t.o.v. *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* voor alle LMW stations.
 - master_summary_all_stations.csv - de gemiddelde bias, standaardafwijking en maximale afwijking t.o.v. *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* voor alle stations
 - afvoerverdeling_statistiek.csv - de gemiddelde bias, standaardafwijking en maximale afwijking t.o.v. *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* voor de afvoerverdeling bij Pannerdensche Kop, IJsselkop, Veessen-Wapenveld en Reevediep.
 - Tabellen_vergelijking_afvoerverdeling_j24_j22.xlsx – Tabellen zoals opgenomen in hoofdstuk 4 van het hoofdrapport ter vergelijking van de afvoerverdeling bij Pannerdensche Kop, IJsselkop, Veessen-Wapenveld en Reevediep.
- Bevat per standaard som (14 in totaal) data over de vergelijking met *dflowfm2d-rijn-j24_6-v1a* in de vorm van error_statistics.csv (waterstand per observatiepunt), afvoerverdeling en figuren:
 - Afvoerverdeling
 - Heatmaps (waterstand)
 - Langsprofielen (waterstand)
 - Stations (waterstandsverschil per observatiepunt)

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