

Verschilanalyse overstap zesde- generatie modellering Rijn- Maasmonding

Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden



Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijn-Maasmonding
Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en
modelrandvoorwaarden

Auteur(s)

Lennard Spaans

Sam Bom

Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijn-Maasmonding

Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL
Contactpersoon	Martin Scholten
Referenties	
Trefwoorden	Verschilanalyse, vijfde-generatie, zesde-generatie, WAQUA, D-HYDRO, Rijn-Maasmonding

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-07-2024
Projectnummer	12209233-004
Document ID	12209233-004-ZWS-0010
Pagina's	138
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Sam Bom	Svašek Hydraulics
	Lennard Spaans	Svašek Hydraulics

Samenvatting

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende modelschematisaties van de rijkswateren. Eén keer in de ongeveer zes jaar wordt er een nieuwe generatie modelschematisaties ontwikkeld, waarin geaccepteerde nieuwe data, kennis en technieken worden toegepast. Met de ontwikkeling van de zesde-generatie modellen voor de Rijn-Maasmonding wordt er weer een actueel en 'state of the art' basismodelinstrumentarium verkregen voor alle toepassingen.

Bij iedere overstap naar een nieuwe modelgeneratie wordt een uitgebreide verschilanalyse uitgevoerd, waarbij verschillende componenten bij deze overstap zoveel mogelijk los van elkaar worden beschouwd. Deze rapportage beschrijft alleen de feitelijke verschillen door de overstap van de vijfde naar de zesde generatie modelschematisaties van RWS voor de Rijn-Maasmonding en gaat alleen over de onderdelen die in het kader van de modelontwikkeling van belang zijn. De eventuele consequenties voor de toepassing binnen de verschillende primaire processen van RWS en andere zaken die specifiek binnen deze toepassingen eventueel worden aangepast (zoals de overstap naar een andere afvoerstatistiek binnen BOI) worden buiten beschouwing gelaten. Er worden dus vooral waarden van verschillen gepresenteerd, maar hier worden geen harde conclusies aan verbonden, omdat deze per toepassing kunnen verschillen. Daarbij is zowel gekeken naar meer 'normale' en maatgevende omstandigheden als ook de hoekpunten met extreme omstandigheden, om zo over het hele toepassingsbereik een globaal beeld te krijgen van de verschillen.

De verschilanalyse in deze rapportage is ingedeeld volgens de vijf bouwstenen uit het Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart van RWS:

- 1 Software**
De overgang naar de nieuwe rekensoftware: van WAQUA naar D-HYDRO Suite.
- 2 Rekenrooster**
De overgang naar een ander soort rekenrooster: van gestructureerd naar ongestructureerd.
- 3 Parameters en Modelconcepten**
Het gebruik van andere modelconcepten en parameters voor horizontale viscositeit, overlaatformulering (verschil tussen Tabellenboek en Villemonte-formulering) en windschuifspanningscoëfficiënt.
- 4 Schematisatie**
Het gebruik van een andere schematisatie (o.a. actualisatie).
- 5 Modelrandvoorwaarden**
Het gebruik van andere BOI-modelrandvoorwaarden.

Daarnaast is het waterstandseffect voor BOI2023 in beeld gebracht voor een aantal afvoerniveaus, zeewaterstanden en windsnelheden (zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI).

Iedere verschillanalyse is in voorliggende rapportage individueel gerapporteerd en de resultaten worden zoveel als mogelijk nader verklaard. Daarbij wordt er expliciet niet verondersteld dat de effecten van de verschillende onderdelen bij elkaar op te tellen zijn tot het totale effect. Globaal zal een optelling van de onderdelen hierbij in de buurt komen, maar er spelen uiteraard niet-lineaire interacties tussen de onderdelen. Daarnaast wordt er ook voor waterstandseffecten gecorrigeerd tijdens de kalibratie van het model. Hierdoor is het bepalen van het exacte effect van een specifieke aanpassing op het uiteindelijke totaalbeeld niet mogelijk (vooral als er wordt geëxtrapoleerd naar het extreme bereik).

De belangrijkste bevindingen zijn opgenomen in de conclusies en samengevat zijn deze:

- **Bouwsteen 1 (Software):** De verschillen door de overstap van WAQUA naar D-HYDRO kunnen grotendeels worden verklaard door het gebruik van een ander advectionschema, een andere beschrijving van de getij-afhankelijke ruwheden en een andere implementatie van de overlaten.
- **Bouwsteen 2 (Rekenrooster):** De verschillen in waterstanden tussen het gestructureerde (WAQUA) en het ongestructureerde (D-HYDRO) rekenrooster blijken groot te zijn bij (middel)hoge afvoeren door een reductie van de numerieke weerstand, als gevolg van een betere uitlijning van het rooster met stroombepalende elementen zoals de oever. De verschillen zijn met name terug te zien in de bovenstroomse delen van de Maas en de Waal.
- **Bouwsteen 3 (Parameters en Modelconcepten):** De grotere verschillen op de Waal (ten opzichte van de Maas en Lek) bij het toepassen van een andere overlaatformulering (Villemonthe in plaats van Tabellenboek) kunnen worden verklaard doordat er langs de Waal meer (lange) kribben aanwezig zijn en er ook over het algemeen meer overlaten in het model zijn opgenomen die dwars op de stroming staan. Het effect van het gebruik van een ruimtelijk variërende viscositeitsterm is beperkt en vooral zichtbaar bij zomerbedvullende afvoeren. Het gebruik van een andere windschuifspanningscoëfficiënt geeft voor windsnelheden boven de 30,85 m/s lagere waterstanden, oplopend tot verschillen van meer dan een meter op de bovenstroomse delen van Waal en Maas voor de sommen met extreem harde wind.
- **Bouwsteen 4 (Schematisatie):** De rivierverruimende maatregelen die zijn uitgevoerd tussen 2013 en 2019 (o.a. Ruimte voor de Rivier met de Noordwaard) zorgen voor extra berging en daardoor over het algemeen lagere waterstanden tijdens hoogwaters. In het beleidsmodel zorgt het meenemen van met name de vegetatielegger 2020, maar ook vergunningen en planmaatregelen op de riviertakken over het algemeen voor hogere waterstanden bij hogere afvoeren.
- **Bouwsteen 5 (Modelrandvoorwaarden):** In de sommen zonder wind zijn de waterstandseffecten van het gebruik van nieuwe randvoorwaarden beperkt. Bij extreem harde wind zijn de waterstanden significant hoger (oplopend naar bovenstrooms), omdat hogere openwater windsnelheden worden toegepast. Hierbij moet echter de kanttekening worden geplaatst dat het gebruik van de nieuwe windrandvoorwaarden eigenlijk niet los kan worden gezien van het toepassen van de bijbehorende windschuifspanningscoëfficiënten, die juist voor een verlaging van de waterstand bij (extreem) hoge windsnelheden.
- **Totale overstap van vijfde naar zesde generatie**
Deze overstap wordt in principe gevormd door Bouwstenen 1 t/m 3 (en deels 4). Het totale verschil in waterstanden berekend met het vijfde- en zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model wordt vooral veroorzaakt door het gebruik van de nieuwe D-HYDRO Suite software (*Bouwsteen 1*) en het nieuwe (beter gestroomlijnde) rekenrooster (*Bouwsteen 2*).

- **Effect voor BOI**

Voor BOI2023 speelt er qua specifieke modelveranderingen, naast de overstap naar de zesde generatie, ook een verandering in schematisatie (update van vegetatie en geometrie, *Bouwsteen 4*) en modelrandvoorwaarden (*Bouwsteen 5*) ten opzichte van WBI2017. Deze veranderingen zorgen voor zowel verhogingen als verlagingen in de waterstand bij gegeven afvoerniveaus, zeewaterstanden en windcondities. Als deze veranderingen worden meegenomen, dan zijn de verschillen maximaal +54 cm op de Waal voor de meest extreme afvoer (24.000 m³/s) zonder wind. In totaal (dus inclusief gebruik van andere modelrandvoorwaarden) zijn de verschillen in modelresultaten tussen BOI2023 en WBI2017 zonder wind vergelijkbaar. Vooral in het geval van extreem harde wind is het waterstandsverschil veel lager, tot maximaal -68 cm op de Waal en -67 cm op de Maas. Deze verschillen zijn voor een groot deel te verklaren door het effect van de andere windmodellering.

- **Duiding van extreme afvoeren en windsnelheden**

Binnen deze verschilanalyse wordt ook gekeken naar extreem hoge afvoeren (tot 24.000 m³/s bij Lobith) en extreme windsnelheden (tot 47 m/s), omdat deze deel uitmaken van de productiesommen binnen BOI. Vaak worden bij deze extreme condities de grootste verschillen gevonden. Deze afvoeren zijn echter tweemaal hoger dan wat ooit gemeten is en ca. 1,4 keer groter dan de verwachtingswaarde van de T100.000-afvoer. Ook de windsnelheid van 47 m/s is 1,6 keer hoger dan ooit gemeten. Ze horen daarmee bij een uiterst kleine overschrijdingskans en/of met significante mate van klimaatverandering en/of een positie in het bovenbereik van de onzekerheidsband. Daarom zijn de verschillen tussen modelvarianten bij 24.000 m³/s en/of 47 m/s zoveel groter dan binnen het meetbereik (tot 13.000 m³/s en 30 m/s), waarop gekalibreerd/gevalideerd is.

Bovengenoemde getallen zijn absolute getallen zonder meenemen van de afvoerstatistiek zoals die binnen BOI wordt toegepast (en die bij GRADE3 anders uitvalt dan bij GRADE2).

De verschillen tussen de vijfde en zesde-generatie modellen van de Rijn-Maasmonding kunnen hiermee zo goed mogelijk worden verklaard en over het algemeen worden deze verschillen veroorzaakt door een actualisatie en verbetering van de onderliggende modellering. Specifiek voor BOI spelen ook een andere schematisatie en het gebruik van andere modelrandvoorwaarden een grote rol.

Er wordt nog wel aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de volgende onderdelen:

- Eventuele verbeteringen aan de Villemonte-formulering met aanvullende metingen.
- Modelonzekerheden bij extrapolatie naar BOI-omstandigheden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
1.1	Introductie	10
1.2	Software versies	11
1.3	Leeswijzer	11
2	Uitgangspunten verschilanalyse	12
2.1	Inleiding	12
2.2	Software	13
2.3	Rekenrooster	14
2.4	Modelleringsconcepten	15
2.4.1	Viscositeit	15
2.4.2	Overlaatformulering	16
2.4.3	Windschuifspanning	17
2.4.4	Diagnostisch rekenen (zout en temperatuur)	18
2.5	Schematisatie	18
2.5.1	Bovenstroomse randvoorwaarde	20
2.5.2	Benedenstroomse randvoorwaarde	20
2.5.3	Lateralen	21
2.6	Kalibratie en validatie	21
3	Methodiek verschilanalyse	24
3.1	Onderdelen verschilanalyse	24
3.2	Gebruikte modelrandvoorwaarden	25
3.3	Aanpak resultaten	27
4	Algemene opmerking m.b.t. alle resultaten	30
4.1	Resultaten met lage afvoer en geen wind/opzet	30
4.2	Resultaten met extreem hoge afvoer en extreem harde wind	30
4.3	Resultaten op de Hollandsche IJssel	30
4.4	Resultaten op het Wantij	31
4.5	Afvoerverdeling	31
5	Vershilanalyse: Software	32
5.1	Totaal effect software	32
5.2	Advectieschema	37
6	Vershilanalyse: Rekenrooster	43

6.1	Totaal effect rekenrooster	43
6.2	Rekenrooster zonder overlaten en kunstwerken	50
7	Verschilanalyse: Parameters en Modelconcepten	55
7.1	Horizontale viscositeit	55
7.2	Overlaatformulering	60
7.3	Windschuifspanningscoëfficiënt (wind drag coëfficiënt)	65
8	Verschilanalyse: Schematisatie	70
8.1	Effect overgang G5 naar G6 voor basisschematisatie 2013	70
8.2	Actualisatie van 2013 naar 2019	74
8.3	Totaal effect actueel naar beleid (beno)	79
9	Verschilanalyse: modelrandvoorwaarden	85
9.1	Modelrandvoorwaarden BOI	85
10	Verschilanalyse: Effect voor BOI	91
10.1	BOI2023 vs. WBI2017 met dezelfde modelrandvoorwaarden	91
10.2	BOI2023 vs. WBI2017 met bijbehorende modelrandvoorwaarden	96
11	Conclusies en aanbevelingen	102
11.1	Algemene opmerkingen voor alle resultaten	102
11.2	Effect software	103
11.3	Effect rekenrooster	103
11.4	Effect parameters en modelconcepten	104
11.5	Effect schematisatie	105
11.6	Effect modelrandvoorwaarden	105
11.7	Effect BOI	106
11.8	Resumé	106
11.9	Aanbevelingen	107
12	Referenties	108
A	Modelschematisaties	110
A.1	Overzicht gebruikte modelschematisaties voor de verschilanalyses	110
A.2	Modelopbouw per component	111
A.3	Aanpassingen aan modelschematisaties	112
A.3.1	Zeerand Voordelta Haringvliet	112
A.3.2	Aanpassingen aan kunstwerken	112
A.3.3	Aanpassingen aan thin dams/schotjes	113
A.3.4	Overige aanpassingen	113
B	Extra analyses software	114

B.1	Effect software met kleine viscositeit	114
B.2	Effect software met constante ruwheid	118
B.3	Effect software zonder overlaten	123
B.4	Effect software zonder kunstwerken	127
C	Extra analyses wind	132
C.1	Effect wind met partial dry	132
C.2	Effect wind met hu of zws gebaseerd	135

1 Inleiding

1.1 Introductie

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende modelschematisaties van de rijkswateren. Deze modelschematisaties worden o.a. ingezet voor de operationele verwachtingen, vergunningverlening, planstudies en het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium. Het is daarbij zaak dat deze modelschematisaties het betreffende watersysteem zo goed mogelijk representeren en dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van de laatste (bewezen) kennis en techniek. Vanaf 2016 is daarom hard gewerkt aan het opzetten van een nieuwe generatie modelschematisaties in de D-HYDRO Suite en vanaf 2022 zijn diverse zogeheten 'zesde-generatie' Rijn-Maasmonding-modellen opgeleverd aan Rijkswaterstaat.

Alleen tijdens de ontwikkeling van nieuwe generatie modellen kunnen methodieken gewijzigd worden, die van invloed zijn op de kalibratie en validatie (bijv. numerieke instellingen, bepaling van laterale toestromingen, kalibratiestrategie). Ook het rekenrooster wordt in de basis éénmaal gemaakt, waarbij er in navolgende jaren alleen een mogelijkheid is tot uitbreiding. Samen met de nieuwe software levert dit de mogelijkheid tot een kwaliteitsimpuls van de schematisatie. Tussen de vijfde- en zesde-generatie modellen zitten grote verschillen, zoals de overgang naar nieuwe rekensoftware (van WAQUA naar D-HYDRO), nieuwe rekenroosters (van curvilineair gestructureerd naar flexibel ongestructureerd), nieuwe methodieken (o.a. andere omgang met zomerbedruwheden), andere modelleringsconcepten (o.a. van Tabellenboek naar Villemonste voor de overlaatformulering, andere viscositeitsmodellering) en andere modelschematisaties (gebiedsbeschrijvingen).

De vijfde-generatie WAQUA-modellen van de Rijn-Maasmonding hebben een prominente rol bij de diverse toepassingen binnen de primaire processen van Rijkswaterstaat, waaronder vergunningverlening en het BOI-proces, waardoor de verschillen veroorzaakt door de overstap naar een nieuwe generatie aanmerkelijke consequenties kunnen hebben voor de toepasbaarheid bij RWS. Daarmee is het van belang om te kunnen duiden welke invloed modelopzet en -keuzes hebben op de totale modelresultaten.

Om dit inzichtelijk te maken wordt gebruik gemaakt van 'de verschilanalyse bij een generatieovergang', in dit rapport afgekort als 'de verschilanalyse'. Deze zogenoemde verschilanalyse helpt RWS bij het maken van de afwegingen en het besluit om deze nieuwe modellen binnen de primaire processen van RWS in te gaan zetten. De voorliggende rapportage beschrijft de verschilanalyse van de 2D D-HYDRO modellen van de Rijn-Maasmonding en gaat alleen over de onderdelen die in het kader van de modelontwikkeling van belang zijn. Voor de Maas en Rijntakken is een vergelijkbare verschilanalyse uitgevoerd en deze staan beschreven in respectievelijk Spruyt et al. (2024a) en Spruyt et al. (2024b).

Deze rapportage beschrijft alleen de feitelijke verschillen door de overstap van de vijfde naar de zesde-generatie modelschematisaties van RWS. De eventuele consequenties voor de toepassing binnen de verschillende primaire processen van RWS en andere zaken die specifiek binnen deze toepassingen eventueel worden aangepast (zoals de overstap naar een andere afvoerstatistiek binnen BOI) worden buiten beschouwing gelaten. Hierbij moet worden aangetekend dat deze consequenties groter zijn als er gebruik gemaakt wordt van absolute getallen (zoals binnen BOI) dan bij het gebruik van relatieve waarden (zoals bij de beoordeling van vergunningen en planmaatregelen).

In dat laatste geval zitten namelijk de effecten van de overstap zowel in de referentie als de variant en als je hier het verschil van neemt worden deze (grotendeels) tegen elkaar weggestreept, zodat je het effect van de specifieke maatregel overhoudt.

1.2 Software versies

De volgende software versies zijn gebruikt in de verschilanalyse:

- Baseline 6.1.2 in ArcGIS 10.5
- D-HYDRO 2.17.12.73720 (2022.01)
- Simona 2019 (WAQUA)
- Matlab-scripts uit OpenEarth repository t.b.v. omzetting (uitgecheckt in juli 2023)

Alle berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux H6 cluster bij Deltares. Dit is gebeurd op het CentOS 7 besturingssysteem.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 presenteert de uitgangspunten van de verschilanalyse van de vijfde naar de zesde generatie. De gebruikte aanpak voor de verschilanalyse wordt uiteengezet in hoofdstuk 3 en een aantal algemene opmerkingen over de resultaten in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 t/m 10 beschrijven de effecten voor achtereenvolgens de software, het rekenrooster, parameters en modelleringsconcepten, de schematisatie, de modelrandvoorwaarden en het effect voor BOI. In hoofdstuk 11 worden deze analyses samengevat en volgt een conclusie op basis van de resultaten.

2 Uitgangspunten verschilanalyse

2.1 Inleiding

Bij de ontwikkeling van Watermodellen voor RWS worden vijf modelonderdelen, bouwstenen, onderscheiden:

- 1 Software
- 2 Rekenrooster
- 3 Parameters (en modelconcepten)
- 4 Schematisatie
- 5 Modelrandvoorwaarden

Met deze vijf modelonderdelen kan een basismodel worden ontwikkeld. In de verschillende toepassingen kunnen vervolgens eventueel twee extra modelonderdelen worden toegevoegd:

1. Procesmanager
2. Database

Een nieuwe ontwikkeling, een nieuwe generatie Watermodellen, wordt met een ritme van ongeveer één keer per zes jaar uitgevoerd. Het ritme van zes jaar is gebaseerd op het regelmatig toepassen van geaccepteerde nieuwe kennis en technieken, de toepassing voor een nieuwe BOI ronde en de beschikbare middelen.

Bij het opzetten van een nieuwe modelgeneratie wordt gestreefd naar de ontwikkeling van een generiek modelinstrumentarium, wat geschikt is voor meerdere toepassingen (o.a. operationele voorspellingen, vergunningverlening, beleidsvragen). Hierbij wordt, zoveel als mogelijk, rekening gehouden met de compatibiliteit tussen de modellen voor de verschillende processen. Hiervoor zijn generieke specificaties opgesteld, waarin de verschillende keuzes voor het opzetten van de zesde-generatie modellen zijn vastgelegd (Minns, Spruyt & Kerkhoven (2022)). Deze specificaties worden continue bijgewerkt op basis van de meest recente inzichten en ontwikkelingen.

Bij de ontwikkeling van een nieuwe generatie kunnen alle vijf modelonderdelen worden gewijzigd. Door nieuwe kennis en technieken toe te passen in het basismodel wordt een consistente, actueel en 'state of the art' basismodel verkregen voor alle toepassingen. Per toepassing kan het noodzakelijk zijn om een modelonderdeel aan te passen of toe te voegen. Welke modelonderdelen wel en welke niet voor de toepassingen aangepast mogen worden staat beschreven in het "Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart" (RWS, 2021)¹. Voor meer informatie over werkwijze, tijdlijnen, toepassingen, procedure voor het inzetten van nieuwe modellen wordt verwezen naar dit Kader. Het Kader is een uitwerking van de in februari 2010 door RWS, DGW, HDJZ en PDR gemaakte afspraken, met instemming van de toenmalige Staatsecretaris van MinlenW vastgelegd in het Protocol Netwerkmodellen. Bij het ontwikkelen en actualiseren van modellen wordt het "Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart" gevolgd.

¹ <https://standaarden.rws.nl/link/standaard/3416>

De verschilanalyse is gebaseerd op de vijf modelonderdelen van het basismodel en gaat in op de toepassing voor BOI. Naast de vijf modelonderdelen worden ook kort de verschillen in kalibratiemethodiek toegelicht.

2.2 Software

De kern van de D-HYDRO Suite is de D-Flow Flexible Mesh module (D-Flow FM) waarmee eendimensionale (1D), tweedimensionale (2D) en driedimensionale (3D) hydrodynamische simulaties gemaakt kunnen worden op ongestructureerde roosters (Kernkamp et al., 2005, Kernkamp et al., 2011). D-HYDRO is het modelleringsplatform voor (gekoppelde) hydrodynamica, morfodynamica, waterkwaliteit en golven. Deze nieuwe software-suite is de opvolger van het door RWS gebruikte SIMONA (WAQUA, TRIWAQ) en Delft3D.

De overgang naar de D-HYDRO Suite houdt in het opzetten van nieuwe modelschematisaties gebruikmakend van de nieuwe beschikbare mogelijkheden en concepten van deze software. De nieuwe mogelijkheden van de D-HYDRO Suite zijn stapsgewijs verkend door in eerste instantie gebruik te maken van de reeds opgedane ervaringen met het rechtstreeks omzetten van enkele bestaande vijfde-generatie WAQUA-modelschematisaties naar de D-HYDRO Suite. Op basis van deze omgezette modellen is gekeken naar wat er meer in de zesde generatie bereikt zou kunnen worden (t.o.v. eerdere generaties) met de nieuwe software. Het gebruik van de D-HYDRO Suite biedt namelijk op diverse vlakken nieuwe kansen en verbeteringen, die niet bij SIMONA of Delft3D-FLOW aanwezig waren. Het gaat hier o.a. om de verbeterde modelleerflexibiliteit, gebruik van een flexibel rekenrooster, roosteronafhankelijke invoer, andere parameters en modelconcepten en betere afstemming tussen waterbeweging, golven, morfologie en waterkwaliteit. De overgang naar een nieuw software pakket past daarbij in de reguliere update-cyclus van de modelschematisaties waarin geaccepteerde nieuwe data, kennis en technieken worden toegepast.

Numeriek schema

Advectie is één van de belangrijkste termen in de natuurkundige stromingsvergelijkingen². Het beschrijft de snelheid van het (horizontale) transport van water. Daarom is het zo nauwkeurig mogelijk uitrekenen van advectie vooral belangrijk als de verschillen in stroomsnelheid groot zijn – en dus ook bij hoge afvoeren in rivieren. Uit een eerdere studie (Platzek, 2019) blijkt dat de advectieschema's van zowel SIMONA (hier: WAQUA) als D-HYDRO Suite (hier: D-Flow FM Perot1/2) wiskundig gezien consistent, nauwkeurig en robuust zijn. Het schema van WAQUA is echter iets nauwkeuriger (d.w.z. de numerieke discretisatiefout convergeert sneller) voor 2D rivierstroming met gestructureerde roosters. Het is echter niet geschikt voor ongestructureerde roosters en 3D berekeningen en daarom kan het niet worden toegepast binnen de D-HYDRO Suite.

Minimaliseren van de numerieke discretisatiefout is in eenvoudige testmodellen mogelijk door te kiezen voor een kleinere roosterresolutie³ (D-Flow Flexible Mesh – Validation Document, update februari 2023). In de Jong & Yossef (2016) zijn voor het Waalmodel verschillende resolutie testen uitgevoerd waaruit is geconstateerd dat verdere verfijning (ten opzichte van de roosterresolutie uit de vijfde generatie) niet leidde tot significante verandering in de modelresultaten en het numerieke schema van D-HYDRO dus voldoende is geconvergeerd. Daarom is (mede ook vanwege de rekentijd) de roosterresolutie in de zesde-generatie modellen vergelijkbaar gehouden met die in de vijfde generatie.

² Andere termen zijn bijvoorbeeld: traagheid van massa (inertie) en stromingsweerstand

³ Dit zijn zgn. grid-convergentietesten.

In D-Flow FM wordt de berekening van de advectionsterm “expliciet” uitgevoerd. Dit introduceert een beperking van de rekestijdstap om tot een stabiele en nauwkeurige oplossing te komen. De rekenstap wordt per tijdstap automatisch ingesteld op basis van het Courant criterium (deze is afhankelijk van de stroomsnelheid en de grootte van de rekencellen) en is in de huidige software implementatie van D-Flow FM globaal (voor het hele rekenrooster) opgelegd. In WAQUA wordt een “impliciet” rekenschema gebruikt (ADI – Alternating Direction Implicit), waardoor de tijdstap niet wordt beperkt door de numerieke stabiliteit, maar door de gewenste nauwkeurigheid en beschikbare rekentijd. WAQUA levert dus in principe altijd een stabiele oplossing, maar als de tijdstap te groot gekozen wordt, kunnen de resultaten wel onnauwkeurig(er) worden. Het is dus essentieel om hier van tevoren een weloverwogen keuze in te maken, afhankelijk van het rekenrooster en stroomsnelheden.

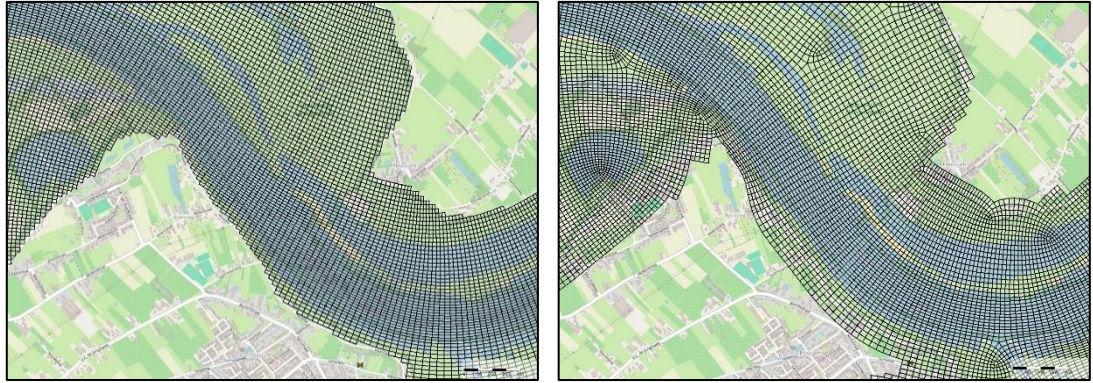
Het vijfde-generatie Rijn-Maasmonding-model in WAQUA draait met een vaste tijdstap van 15 sec. Bij deze tijdstap kunnen echter (lokale) oscillaties van enkele cm voorkomen in het model. Vanwege beschikbare rekentijd is een echter altijd een tijdstap van 15 sec. gehanteerd. Doordat er gebruik wordt gemaakt van de max13 waarde in de resultaten is het effect van de oscillaties beperkt. De periode van de oscillaties is namelijk veel kleiner dan de middelingsperiode (ruim een uur). Zoals eerder vermeld is de tijdstap in D-HYDRO variabel en hangt af van de stroomsnelheid (dus afvoer) in combinatie met de lokale celgrootte. Typisch zit de gemiddelde tijdstap in de range van 4 tot 8 seconden (afhankelijk van de toegepaste modelrandvoorwaarden).

2.3 Rekenrooster

Het rekenrooster is het fundament van het model en is zeer bepalend voor de nauwkeurigheid, de toepasbaarheid en de rekentijd van een model. Binnen de vijfde-generatie modelschematisaties (WAQUA) kan alleen gebruik gemaakt worden van een gestructureerd rooster vanwege het gebruikte numerieke ADI rekenschema. Dit betekent dat alle cellen vierhoekig zijn en ze allemaal vier buurcellen moeten hebben (afgezien van droge cellen). Deze restricties zorgen ervoor dat de onderliggende wiskundige vergelijkingen makkelijker opgelost kunnen worden (gestaggerd rooster en ADI methode), omdat er geen sprake is van veelhoeken maar alleen vierhoeken. Dit geeft echter wel limitaties aan het kunnen volgen van geometrische aspecten die belangrijk zijn voor de stroming binnen riviermodellen. Hierbij speelt vooral dat het zomerbed minder goed gevolgd kan worden (zogenoeten ‘trapjeslijnen’), met extra numerieke weerstand tot gevolg.

Eén van de belangrijkste aspecten in de ontwikkeling van D-HYDRO is het gebruik van een flexibel opzetbaar, ongestructureerd rooster. Centraal in de opzet van het ongestructureerde rooster voor de zesde-generatie riviermodellen staan daarom de extra mogelijkheden om het rooster uit te lijnen met de stroming en de geometrie, zie Figuur 2-1. De afvoer stroomt grotendeels tussen de oeverlijnen van het zomerbed. Hier zijn ook de hoogste stroomsnelheden waardoor uitlijning van het rooster belangrijk is. Bij het uitlijnen van het rooster in de zesde generatie is verder zoveel mogelijk rekening gehouden met overige belangrijke stroomlijnen (nevengulen, zomerbedverbredingen, stroomgeleidingskades, etc.).

De inspanning die bij de roostergeneratie wordt besteed om een zo optimaal mogelijke verhouding van nauwkeurigheid versus rekentijd versus toepassingsgebieden te verkrijgen, zal zich terugbetalen in alle simulaties die vervolgens met het model gemaakt worden. Voor de zesde generatie is ervoor gekozen om de roosterresolutie in de riviertakken bovenstrooms (Amer, Nieuwe- en Beneden Merwede) vergelijkbaar te houden aan die van de vijfde generatie. Benedenstrooms daarvan is het rooster iets fijner ten opzichte van het vijfde-generatie rooster. Voor meer details over de roostergeneratie voor het RMM model, zie Veenstra (2022).



Figuur 2-1 Uitsnede uit het rooster bij Rossum op de Waal in WAQUA (links) en in D-HYDRO (rechts).

2.4 Modelleringsconcepten

2.4.1 Viscositeit

D-HYDRO en WAQUA lossen de ondiepwatervergelijkingen op voor een niet-samendrukbare vloeistof. Over het algemeen is het rooster te grof en de tijdstap te groot om alle turbulente bewegingen te kunnen vatten. Om het effect van turbulente processen toch te kunnen meenemen bij het modelleren, worden deze opgelost op 'sub-grid' niveau. De grootte van deze effecten zijn over het algemeen afhankelijk van de gridcelgrootte en de lokale gradiënten in de stroomsnelheid.

In WAQUA kan hiervoor een turbulentieviscositeit (EDDYviscositycoëff) worden ingesteld. Hierbij is voor de vijfde-generatie modellen van RWS (gelijk aan de vierde generatie) standaard een vaste waarde van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ gebruikt (Uittenbogaard et al. 2005). In een beperkt gebied rondom de bovenstroomse randen op de Lek en de Waal is een waarde van $10 \text{ m}^2/\text{s}$ gebruikt, evenals rond de Haringvlietsluizen. Bij de Maasmond is een waarde van $100 \text{ m}^2/\text{s}$ toegepast. Deze hogere waarden zijn gekozen omwille van de stabiliteit in de modelsimulaties.

In werkelijkheid zal de viscositeitswaarde variëren in ruimte en tijd, afhankelijk van de gridcelgrootte en de lokale stromingsomstandigheden. Het is wel mogelijk om binnen WAQUA een volledig HLES⁴ formulering te gebruiken (van Vossen & Uittenbogaard, 2004), waarbij de viscositeitstermen ruimtelijk en in de tijd worden uitgerekend, maar dit leverde een te hoge rekentijd op voor praktische toepassing, omdat de numerieke tijdsintegratie dan expliciet is in plaats van impliciet, met een kleine tijdstap tot gevolg. De vaste waarde van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is destijds gekozen, omdat deze gemiddeld het beste paste voor alle Rijntakken, de Maas en de Rijn-Maasmonding op basis van HLES-berekeningen (voor het dan geldende rooster), maar er was wel flinke variatie over de takken (Uittenbogaard et al. 2005).

Binnen D-HYDRO is er, naast het gebruik van een constante waarde, ook een 'simpel'⁵ model voor turbulentie beschikbaar, het zogeheten Smagorinsky model. Hiermee is het mogelijk om automatisch om te gaan met grote verschillen in celgrootte en mogelijk daarbij behorende stroomsnelheidsverschillen. Dit levert een realistischere representatie van de viscositeit op dan het gebruik van een constante waarde.

Daarnaast kan de constante achtergrondwaarde worden gebruikt om het effect van een 3D snelheidsprofiel mee te nemen in 2D dieptegemiddelde modellen.

Voor de zesde-generatie D-HYDRO modellen wordt daarom gebruik gemaakt van de Smagorinsky-formulering (met constante $C_s = 0,20$) samen met de constante achtergrond viscositeit (waarde van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$) in 2D dieptegemiddelde modellen (Deltares, 2017).

⁴ Horizontal Large Eddy Simulation - een sub-grid model voor 2D-turbulentie

⁵ Simpeler dan HLES, maar in principe beter dan het gebruik van een constante waarde.

In D-HYDRO wordt een andere discretisatie voor de horizontale viscositeit toegepast dan in WAQUA. In WAQUA (en ook Delft3D 4) wordt het natte doorstroomoppervlak toegepast in de berekening van de horizontale viscositeit, maar in D-HYDRO wordt de breedte van een flow link (de lijn tussen twee hoekpunten van een roostercel) vermenigvuldigd met het minimum van de waterdiepte in de twee naburige waterstandspunten (het middelpunt van een roostercel). Dit laatste zal in het algemeen een kleinere waarde opleveren van het doorstroomoppervlak, waardoor de impact van de horizontale viscositeit in D-HYDRO lager is dan in WAQUA. Dit staat in detail beschreven in Remark 6.2.19 van de D-Flow FM Technical Reference manual (Deltares, 2023). Voor beide keuzes is een onderbouwing te geven. Uiteindelijk komt het aan op de keuze van de totale viscositeitscoëfficiënt (dus achtergrondswaarde plus bijdrage Smagorinsky formulering), die in D-HYDRO groter dient te zijn dan in WAQUA om tot hetzelfde totale effect te komen.

2.4.2 Overlaatformulering

Vanwege de gebruikte roosterresolutie kunnen niet alle plotselinge overgangen in de bodem (door lijnvormige verhogingen zoals kaden, kribben, scherpe bodemsprongen) in de bodem worden meegenomen. Er wordt daarom in de zesde-generatie modellen, net als in de vijfde generatie, een subgrid aanpak toegepast waarin deze lijnelementen, overlaten, als zogeheten 'fixed weirs' in het model worden opgenomen. Hierbij wordt een energieverlies uitgerekend met een extra formule. De grootte van het energieverlies is afhankelijk van de kruinhoogte boven de bodem van de overlaat, de taludhelling, de overlaatbreedte, waterstanden boven- en benedenstrooms van de overlaat en de afvoer over de overlaat. De energieverliezen veroorzaken een opstuwing en leiden tot hogere waterstanden.

In de vijfde generatie ging dit met de zogenaamde *Tabellenboekmethode*. Deze methode is gebaseerd op experimenten uit 1968 waarvan de onderliggende data verloren zijn gegaan. Bovendien kent de Tabellenboekmethode maar één vorm van een overlaat (met een taludhelling van 1:4 en een kruinbreedte van 3 meter) en kan deze methode daardoor het aanpassen van de vorm van overlaten/kribben niet meenemen. Mede hierdoor is in de opzet van de zesde-generatie modellen overgestapt op de *Villemonte* aanpak.

De Villemonte aanpak is, net als de Tabellenboekmethode, een empirische formulering, maar dan gebaseerd op meerdere experimenten en met de technische mogelijkheid om de vorm van de overlaat mee te nemen⁶. Het aanpassen van de parameters voor taludhelling en kruinbreedte is ook al toegepast binnen de zesde-generatie modellen. Voor alle hoogteverschillen geldt dat de standaard kruinbreedte is verhoogd van 3 meter naar 10 meter bij Villemonte. Voor de kribben geldt dat de taludhelling iets steiler is geworden, van 1:4 naar 1:3 en de kruinbreedte van de overlaat is iets smaller geworden van 3 meter naar 2,5. Deze kenmerken zijn ook per individuele overlaat in te stellen. Alleen op de Waal is daar gebruik van gemaakt. Op de Waal zijn de taludhelling en de overlaatbreedte per krib afgeleid uit metingen van het gebied. Een steiler talud geeft over het algemeen meer energieverlies. Een grotere overlaatbreedte geeft over het algemeen ook meer energieverlies. De Villemonte formulering is ook al binnen WAQUA beschikbaar, maar tot nu toe nog niet in de officiële RWS-modellen toegepast, omdat dit betekent dat alle modellen opnieuw zouden moeten worden gekalibreerd.

Zowel Tabellenboek als Villemonte geven op basis van een beperkt aantal beschikbare praktijkmetingen tijdens het hoogwater van 2011 op de Waal resultaten die onderling enkele centimeters verschillen en beide plausibele overeenkomst vertonen met de metingen (De Goede, 2011). Er is daarnaast aanvullend onderzoek uitgevoerd over hoe beide formuleringen zich gedragen buiten dit bereik en in het bijzonder voor de voor BOI relevante

⁶ De formulering zorgt kwalitatief voor het gewenste effect, maar, er zijn nog meer experimenten nodig om een volledig onderbouwde keuze van de aanvullende parameters te geven, .

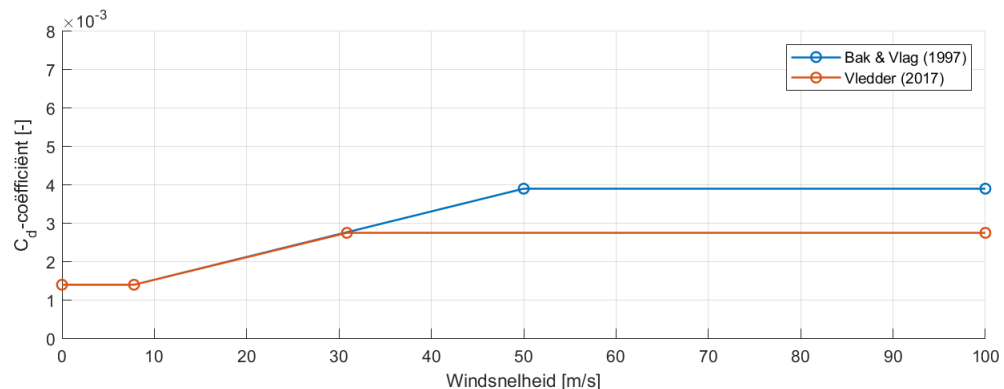
extreme afvoeren, zowel vanuit de fysica als de numerieke implementatie (Chavarrías, 2023). Hieruit is gebleken dat de huidige Villemonte-formulering voor de omstandigheden (bij hoge afvoeren) op de Waal tot hogere energieverliezen leidt dan Tabellenboek. Voor andere omstandigheden kan Villemonte echter ook lagere energieverliezen opleveren. Daarnaast neemt het verschil tussen Villemonte en Tabellenboek (zoals verwacht) af voor hele grote afvoeren, omdat het energieverlies naar nul gaat voor toenemende verdrinkingsgraad van de overlaat. Deze afname vindt echter pas plaats bij nog veel extremere afvoeren dan degenen die binnen deze verschilanalyse (en BOI) worden gebruikt.

In D-HYDRO en in WAQUA wordt op een 'identieke' manier het energieverlies door de overlatenformuleringen berekend⁷. Echter, er zijn ook verschillen in het concept voor overlaten. In D-HYDRO worden de advectietermen uitgezet in flow links met overlaten, terwijl die in WAQUA wel toegepast worden. Dit heeft ook te maken met de verschillende discretisaties voor de advectietermen in D-HYDRO en WAQUA. Voor beide is een onderbouwing te geven. Daarnaast worden in WAQUA schuine overlaten en kribben op een net iets andere manier afgehandeld dan 'gewone' overlaten, terwijl in D-HYDRO alle overlaten op dezelfde manier worden afgehandeld. Deze verschillen in implementatie hebben echter een zeer beperkt effect op het energieverlies.

Voor meer informatie over de overlaatformulering binnen de zesde-generatie modellering zie RWS (2023) en Chavarrías (2023).

2.4.3 Windschuifspanning

In een deel van de modelsimulaties voor deze verschilanalyse wordt wind opgelegd. De impulsoverdracht van deze wind op de waterbeweging wordt in de modellen meegenomen via de windschuifspanning aan het wateroppervlak. Deze parameter is afhankelijk van de windsnelheid, luchtdichtheid en de windschuifspanningscoëfficiënt. Deze laatste wordt vaak gedefinieerd met een zogenaamde winddrag-relatie, de verhouding tussen windsnelheid en de windschuifspanningscoëfficiënt. In Groenenboom (2022) zijn de winddrag-relaties voor de zesde-generatie modellen (gebaseerd op Van Vledder (2017)) vergeleken met die van de vijfde generatie. De oorsprong van de instellingen van de vijfde generatie is de studie van Bak & Vlag (1997). Het verschil tussen beide generaties ligt in de afkapping van de windschuifspannings-coëfficiënt bij hoge windsnelheden. In de nieuwe instellingen wordt dit bij een lagere windsnelheid gedaan, zie ook Figuur 2-2. Voor meer informatie over de herkomst van de winddrag-relaties, zie Groenenboom (2022).



Figuur 2-2 Vergelijking van de winddrag-relatie voor de vijfde generatie (Bak & Vlag, 1997) en zesde generatie (Van Vledder, 2017).

⁷ Met andere woorden, de respectievelijke routines ENLOSS.F90 en WAGENL.F90 zijn identiek.

2.4.4 Diagnostisch rekenen (zout en temperatuur)

In zowel D-HYDRO als WAQUA wordt binnen deze verschilanalyse gerekend met constante zout- en temperatuurwaarden in de tijd. Dit geldt ook voor de modellen in de BOI-vergelijking en is dus anders dan in het oorspronkelijke WAQUA model (dat voor de WBI2017-berekeningen is gebruikt). De keuze voor het diagnostisch rekenen is gebaseerd op de rekentijd. Prognostisch rekenen zou resulteren in zeer kleine tijdstappen, en dus hele lange rekentijden, wat niet praktisch is voor het uitvoeren van een uitgebreide verschilanalyse.

Het ruimtelijk variërende zoutveld is afgeleid in Van der Kaaij (2019) met een prognostische som. Dit veld wordt in zowel D-HYDRO als WAQUA opgelegd en wordt gedurende de berekeningen niet bijgewerkt. Wel heeft dit veld invloed op de waterbeweging. Voor meer informatie over het zoutveld en diagnostisch rekenen, zie Zijlker (2023).

2.5 Schematisatie

De onderliggende geometrie en ruwheid bepalen voor een heel belangrijk deel de uitkomsten van een model. Voor de opzet van een modelschematisatie wordt daarbij gebruik gemaakt van de geometrische gebiedsbeschrijving zoals deze opgenomen is in de Baseline-gebiedsschematisaties. De gebiedsschematisatie kan vervolgens door Baseline worden geconverteerd naar input voor een hydrodynamisch model. Voor kalibratie en validatie wordt daarbij steeds een schematisatie gebruikt die zo goed mogelijk past bij de doorgerekende situatie, zie Veenstra (2022).

De basisschematisatie van de Rijn-Maasmonding is voor de vijfde generatie die van het jaar 2012 (j12). Voor de zesde generatie is dit die van het jaar 2013 (j13). Vervolgens is met behulp van maatregelen de schematisatie steeds geactualiseerd naar recentere jaren. Ten tijde van de opzet van de zesde generatie was de meest recente versie die van de situatie van 2019 (j19) en deze is daarom ook gebruikt in deze verschilanalyse. Van deze situatie is geen model beschikbaar uit de vijfde generatie. Het meeste recente WAQUA model is van 2015 (j15), maar hier bestaat geen D-HYDRO model van. Daarom is de vergelijking tussen vijfde en zesde generatie gedaan met het j12 en j13 model.

Naast actuele modellen wordt er in de processen van RWS ook gebruik gemaakt van beleidsmodellen (zogenoeten beno-modellen) die een (toekomstige) situatie representeren. In deze modellen wordt in plaats van de actuele vegetatie de vegetatienorm, te weten vegetatielegger, meegenomen en worden naast alle verleende vergunningen ook alle planmaatregelen meegenomen die een officiële status hebben en waarvan het dus (vrij) zeker is dat ze worden uitgevoerd. De invloed van het verschil in schematisatie is ook voor een beno-schematisatie onderzocht.

Keringen

In de Rijn-Maasmonding bevinden zich vijf keringen. In het geval van verwacht hoogwater zullen de keringen sluiten om de veiligheid van het achterland te waarborgen. Het gaat om de volgende keringen:

- de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg;
- de Hartelkering in het Hartelkanaal;
- de Haringvlietsluizen;
- de stormstuw Hollandsche IJssel; en
- de Kromme Nolkering in het Heusdensch Kanaal.

De Haringvlietsluizen hebben naast een functie als stormvloedkering ook een functie om een deel van het overtollige water uit de rivieren af te voeren bij hoge rivierafvoer en voldoende water via de Nieuwe Waterweg te laten gaan voor het tegengaan van de zoutindringing bij lage rivierafvoer. De Haringvlietsluizen vormen daarmee een belangrijke schakel in het dagelijkse beheer van de waterstanden en de afvoer in het RMM-gebied.

De aansturing van de keringen gaat volgens verschillende sluit- en openstrategieën bij D-HYDRO en WAQUA. Dit heeft een belangrijk effect op de waterstanden in het RMM gebied. Normaal gesproken worden bij extreem hoge zeewaterstanden de Maeslantkering, Hartelkering en de Haringvlietsluizen gesloten. In deze verschilanalyse worden zeer extreme zeewaterstanden opgelegd, waarbij het verschil in het gehele RMM gebied wordt geanalyseerd. Om deze verschillen te analyseren zullen de Maeslantkering en de Hartelkering in deze studie nooit sluiten. De Haringvlietsluizen volgen wel de normale sluit- en openstrategieën.

Waterberging op het Volkerak-Zoommeer wordt normaliter gebruikt wanneer de Maeslantkering en Hartelkering gesloten zijn en de waterstand bij meetlocatie Rak Noord boven NAP+2,60m uitkomt. Omdat de Maeslantkering en Hartelkering in deze studie nooit sluiten, wordt de waterberging op het Volkerak-Zoommeer niet meegenomen. Om die reden zijn de Volkeraksluizen in alle simulaties gesloten en is voorkomen dat er water over de sluisen of aansluitende dijken stroomt.

De keersluis in het Heusdensch kanaal (Kromme Nolkering) beschermt het gebied rondom de Afgedamde Maas tegen overstromingen als gevolg van hoge afvoeren via de Maas. In het zesde generatie model zijn de deuren verhoogd, omdat ze anders bij de meest extreme condities en hoogste waterstanden zouden overstromen.

De stormstuw Hollandsche IJssel beschermt het achterliggende gebied in geval van hoge waterstanden op de Nieuwe Waterweg of de Lek. In het zesde generatie model kan de Hollandsche IJsselkering overstromen bij een waterstand hoger dan 5 m+NAP, terwijl dit in de vijfde generatie niet mogelijk is. De deuren worden hier niet verhoogd, omdat de Hollandsche IJsselkering een zogenaamde 'voorliggende kering' is, waarvan de stormvloedkering overstroombaar dient te zijn.

Om kortsluiting tussen de Maas en de Waal in het model te voorkomen, zijn de sluis bij Sint Andries en de Wilhelminasluis bij Andel in simulaties zonder keringen in het model alsnog aan het model toegevoegd. Ook de Volkeraksluizen zijn in het model gehouden, om geen waterberging op het Volkerak-Zoommeer te krijgen. In de model simulaties kan er dus geen water stromen tussen de Waal en Maas en kan er ook geen water stromen naar het Volkerak-Zoommeer.

Het belangrijkste verschil tussen de keringen in de vijfde- en zesde generatie is het feit dat keringen in de zesde generatie kunnen overstromen, waar dit in de vijfde generatie niet mogelijk is.

Daarnaast hebben keringen in D-HYDRO uitgebreidere mogelijkheden. Zo is het mogelijk om de Maeslantkering horizontaal te laten sluiten, terwijl dit in WAQUA nog verticaal is. Deze mogelijkheid wordt in BOI2023 gebruikt, echter wordt in deze verschilanalyse alleen gerekend met een open Maeslantkering. Voor een uitgebreide beschrijving van de keringen en hun sluitcriteria, zie bijlage A van Veenstra (2022).

Aanpassingen die aan de keringen gedaan zijn voor deze verschilanalyse staan beschreven in bijlage A.3.2.

Op verwachting gestuurde en gesloten keringen

In werkelijkheid worden de Maeslantkering, Hartelkering, Hollandse IJsselkering en Waterberging Volkerak-Zoommeer ingezet op basis van verwachte waterstanden. Dit betekent dat voorafgaand aan een berekening in principe nog niet duidelijk is of en hoe een kering wel of niet gaat sluiten, maar dat eerst andere berekeningen nodig zijn om de sluitprocedure te bepalen. Om dit toch mee te kunnen nemen in bepaalde toepassingen (zoals binnen BOI of operationele verwachtingen) kan gebruikt worden gemaakt van een zogeheten keringenscript, waarin automatisch verschillende modelberekeningen worden gestart.

Aangezien deze verschilanalyse zich specifiek richt op de verandering in de modelschematisatie zelf, wordt er niet ingegaan op de toepassing van de modelschematisatie in combinatie met een keringenscript. Daarnaast zijn verschillen in een model met bewegende keringen ook lastiger te duiden, omdat er (tijdelijk en lokaal) grote verschillen kunnen optreden als de sluiting/opening van de keringen niet op hetzelfde moment plaatsvindt. Om deze reden is er voor gekozen om alleen berekeningen uit te voeren met 'open' keringen. De verwachting is ook dat de verschillen met 'gesloten' keringen relatief klein zullen zijn, aangezien het bergend vermogen in de modelschematisaties tussen de vijfde en zesde generatie in principe niet essentieel is veranderd.

De Keersluis Heusdensch kanaal (Kromme Nolkering) wordt (ook in werkelijkheid) niet op verwachtingen **gesloten**, dus de sturing hiervan is wel meegenomen in het model. Daarnaast is ook de sturing van de Hollandse IJsselkering meegenomen, volgens sturingsregels zoals die met RWS-WNZ zijn afgesproken. Inmiddels wordt voor de Hollandse IJsselkering binnen BOI ook gebruik gemaakt van een sturing op verwachtingen (Botterhuis, Honingh & Stijnen (2022)), maar daar wordt in deze verschilanalyse nog geen rekening mee gehouden. Modelrandvoorwaarden

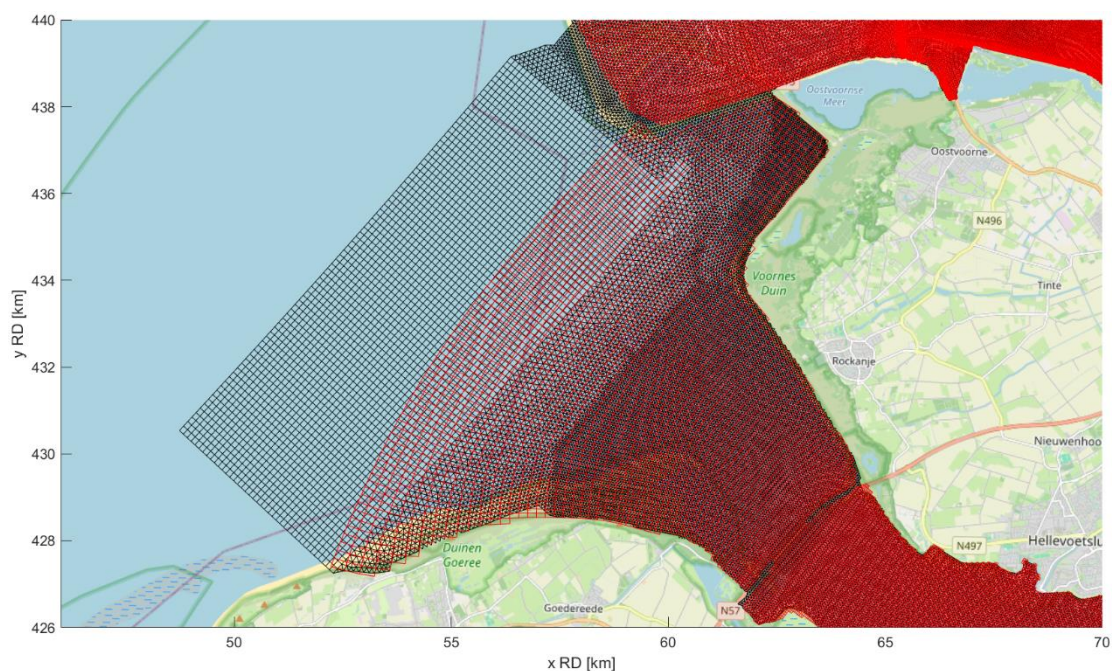
2.5.1 Bovenstroomse randvoorwaarde

De bovenstroomse randen bevinden zich in het zesde-generatie model, net als in de vijfde-generatie modellen, bij Hagestein (Lek), Tiel (Waal) en Lith (Maas). Er zitten (kleine) verschillen tussen de precieze locaties van de randen. In het zesde-generatie model ligt de rand in de Lek net benedenstrooms van de stuwen bij Hagestein. In het vijfde-generatie model is deze rand circa 50 meter meer bovenstrooms gelegen maar nog wel benedenstrooms van de stuw. In de Maas ligt de rand net benedenstrooms van de stuw bij Lith, en zit er ook ongeveer 50 meter tussen de randen in de twee modellen, waarbij de rand in het zesde-generatie model meer bovenstrooms ligt maar nog wel benedenstrooms van de stuw. In de Waal zit er meer afstand tussen de randen van de twee modellen. De rand in het zesde-generatie model ligt net benedenstrooms van de Prins Willem-Alexander brug, terwijl de rand in het vijfde-generatie model twee kilometer verder stroomafwaarts gelegen is, net bovenstrooms van de aftakking van het ARK. Op alle bovenstroomse randen worden constante afvoeren opgelegd, waarbij de afvoeren op de verschillende takken zijn afgeleid bij een bepaalde Lobith afvoer vanuit de productiesommen van de Rijn van BOI2023.

2.5.2 Benedenstroomse randvoorwaarde

De benedenstroomse randen bevinden zich in beide modellen bij de Maasmond en bij de Voordelta van het Haringvliet. Er wordt dus gerekend met het zogeheten kleine zeedomein. In de Maasmond ligt de rand in beide generaties modellen op nagenoeg dezelfde locatie, bij het einde van de Noorderpier. In de Voordelta van het Haringvliet is de rand in het zesde-generatie model verder zeewaarts verschoven (3 tot 5 km). De reden hiervoor is dat de rand van het vijfde-generatie model niet overeenkwam met de locatie van meetlocatie Haringvliet 10. Meer informatie over deze verschuiving en het effect ervan is te vinden in bijlage A van Van der Wijk (2022). Op de benedenstroomse randen worden waterstanden opgelegd.

Voor de vergelijkingsanalyse in dit rapport zijn bij een aantal van de schematisaties van het vijfde-generatie model de zeerand, in de Voordelta van het Haringvliet, verschoven naar de rand van het zesde-generatie model. In Figuur 2-3 is een voorbeeld te zien van de zeerand in het WAQUA-model met schematisatie j15_5 en het D-HYDRO model met schematisatie j13_6. De verdere specificaties en verschoven zeeranden van de verschillende schematisaties zijn beschreven in bijlage A.3.1.



Figuur 2-3 Uitsnede uit het rooster bij de voordelta van de Haringvliet in D-HYDRO j13_6 (zwart) en WAQUA j15_5 (rood).

2.5.3 Lateralen

Om diverse redenen zijn er laterale lozingen en onttrekkingen aan de modellen in de vijfde- en zesde generatie toegevoegd. Het gaat hier om gemalen, schutverliezen bij sluizen en instromende rivieren en beken met een breedte kleiner dan het rekenrooster. De grootte van de in- en uitstromende afvoer is vaak niet precies bekend en wordt daarom afgeleid op basis van beschikbare metingen en regressie-formuleringen. In de meeste simulaties voor deze studie zijn geen lateralen opgenomen. Alleen in de simulaties waar het effect van de modelrandvoorwaarden wordt onderzocht zijn lateralen in het model opgenomen. Het gaat in dat geval om 6 lateralen: gemalen De Koekoek (Lopikerwaard) en Krimpenerwaard in de Lek en het Quarles van Uffordgemaal, gemaal Gewande, en de uitstromen van het Drongelens kanaal en het Diezekanaal in de Maas.

2.6 Kalibratie en validatie

De kalibratie van een modelschematisatie bestaat uit het afregelen van onzekere of meest bepalende parameters, zodat modelresultaten overeenkomen met gemeten data. Hierbij wordt gecompenseerd voor onbekenden en onnauwkeurigheden in de modelopzet. Verder wordt ook onnauwkeurigheid geïntroduceerd door bijvoorbeeld geometrische variaties die kleiner zijn dan de roosterresolutie of door afwijkingen in de energieverliezen van overlagen (o.a. kribben). De kalibratie zal ook compenseren voor deze, alsmede voor fouten in schematisaties en modelrandvoorwaarden.

De grootste onbekende in riviermodellen is de ruwheid en dit is dan ook de parameter die gebruikt wordt voor de kalibratie. Om praktische redenen is voor de RWS-modellen besloten om alleen de ruwheid van het zomerbed als kalibratieparameter te gebruiken, in zowel de vijfde- als de zesde generatie (evenals eerdere generaties). Als de ruwheid van het winterbed wordt meegenomen in de kalibratie is de impact van een vegetatieverandering op het ene of het andere deel van de rivier anders, omdat de gekalibreerde vegetatieruwheid anders is. En dat is nu niet uit te leggen. Het winterbed maakt onderdeel uit van het model en wordt dus wel degelijk in de kalibratie meegenomen. De ruwheid van het winterbed wordt echter niet aangepast tijdens de kalibratie.

Er dient eerst verder onderzoek te worden gedaan naar het effect van een andere kalibratiemethodiek op eventueel ook het winterbed, voordat deze kan worden doorgevoerd in de RWS-modellen. Een eventueel andere kalibratiemethodiek kan echter pas worden toegepast in een volgende generatie van de modelschematisaties van RWS, omdat hiervoor alle modellen opnieuw moeten worden gekalibreerd (en dit een uitgebreide exercitie is).

In de zesde generatie bestaat de ruwheid in het zomerbed uit een achtergrondruwheid, vermenigvuldigd met een kalibratiefactor. Deze achtergrondruwheid is zo realistisch mogelijk gekozen op basis van de fysische eigenschappen van het segment van de rivier. Voor het afvoergedomineerde deel van de Rijn-Maasmonding wordt gebruik gemaakt van de versimpelde formule van Van Rijn. In het getijde-gedomineerde deel van het gebied wordt gewerkt met Manning ruwheden. De grens van afvoer- en getijde-gedomineerd ligt bij de stations Krimpen aan de Lek (Lek), Dordrecht (Beneden Merwede), Moerdijk (Nieuwe Merwede) en Keizersveer (Maas). Stroomopwaarts ervan wordt Van Rijn (2018) toegepast (afvoer-gedomineerd), benedenstrooms ervan Manning (getijde-gedomineerd). In de software wordt dit vervolgens (per tijdstap) eerst omgezet naar een uniforme ruwheidsdefinitie (in dit geval Manning) en deze wordt vermenigvuldigd met de kalibratiefactor. Met behulp van de kalibratiefactor zijn de berekende waterstanden per traject (tussen LMW en HbR meetstations, in totaal 14 trajecten) afgeregeld. Er is gekalibreerd voor de periode december 2013 en deze bevat afwisselend lage en gemiddelde afvoeren op de drie rivieren en 3 meter stormopzet (Sinterklaasstorm). De afvoerclassen en kalibratiefactoren voor de riviertakken volgen direct uit de modellen voor de Rijntakken en Maas. Deze kalibratiefactoren zijn afgeleid voor andere periodes en dus schematisaties en afvoeren.

In Veenstra (2022) is beschreven dat de kalibratie is uitgevoerd met het DUD-algoritme van OpenDA. Bij de kalibratie is de kostenfunctie geminimaliseerd, gedefinieerd als de som van alle kwadratische fouten in berekende waterstanden. Hierbij is ook de grootte van de aanpassing meegewogen, zodat grote aanpassingen alleen worden gedaan als er ook grote verbeteringen optreden. Vanwege consistentie binnen de verschillende toepassingen zijn voor de riviertakken de kalibratiewaarden overgenomen uit respectievelijk de overlappende delen van de modelschematisatie van de Rijntakken en de Maas. In deze modellen is er gekalibreerd op de bias in plaats van de kostenfunctie en voor andere kalibratieperiodes en zonder wind mee te nemen. Deze waarden zijn dus binnen het RMM-model niet opnieuw gekalibreerd. De kalibratie resulteert in bias waarden van tot 3,1 cm met een enkele uitschieter voor Hartelbrug van 4,5 cm voor het benedenstroomse gebied en tot 6 cm met een uitschieter voor Tiel van 11,5 cm voor het rivierengebied. Gemiddeld over alle stations is de RMSE 5,3 cm voor het benedenstroomse gebied (maximaal 7,4 cm bij Gouda) en 5,9 cm voor het rivierengebied (maximaal 12,5 cm bij Tiel).

In de vijfde generatie is geen kalibratiefactor gebruikt, maar is er direct gekalibreerd op de zomerbedruwheid (Zijl, et al. (2011)). Daarbij is handmatig gekalibreerd met Manning en Nikuradse waarden op 14 stations in de periode 6 augustus tot 15 november 1998. Vanwege de andere gebruikte kalibratiemethodiek tussen de vijfde (direct op kalibratiewaarde in ruwheid) en zesde generatie (via kalibratiefactor op Manning-waarde gebaseerd op basisruwheid) zijn de gevonden kalibratiewaarden tussen de twee generaties lastig rechtstreeks met elkaar te vergelijken.

De validatie bestaat uit het toetsen van de gekalibreerde parameters in een andere situatie dan gebruikt is tijdens de kalibratie gebruikte periode. Diverse validaties zijn uitgevoerd om de kwaliteit van de kalibratie te controleren voor zowel de vijfde- als de zesde-generatie modellen.

Het zesde-generatie model is gevalideerd voor de gehele jaren 2011 en 2013, waarin verschillende condities optreden (Veenstra, 2022). De resultaten zijn opgedeeld met de Jaarsomtoolbox in (1) de gehele periode, (2) periodes met hoge waterstanden door een hoge rivierafvoeren, (3) periodes met hoge waterstanden door storm en (4) periodes met lage waterstanden door lage rivierafvoeren. Er worden beoordelingscriteria gebruikt voor bias (kleiner dan 5 cm) en RMSE (kleiner dan 7 cm).

Voor het benedenstroomse gebied zijn de waarden voor bias voor de gehele periode lager dan deze norm en voor de meeste stations lager dan 3,5 cm. Gemiddeld over de benedenstroomse stations is de bias van de waterstand 0,6 cm met een RMSE van 2,5 cm. De bias is voor veel andere condities vergelijkbaar, maar de bias voor laagwaterstanden door lage afvoer is veel hoger (de waterstanden worden overschat). Voor de RMSE voldoen de benedenstroomse stations ook aan het gestelde criterium als gekeken wordt naar de gehele periode, maar er zijn uitschieters bij de conditie 'hw storm' (hoge waterstanden door storm). Binnen deze conditie valt alleen de Sinterklaasstorm van 2013 en in sommige gevallen zijn er sterke hoogfrequente fluctuaties aanwezig in de metingen, die kunnen zorgen voor hoge RMSE waarden.

Bij opsplitsing van de waterstanden in getij en opzet geldt dat gemiddeld over de benedenstroomse stations de RMSE ongeveer 2,7 cm is voor getij en 4,0 cm voor opzet, waar dit 4,9 cm was voor de totale waterstanden.

Voor rivierstations zijn de bias en RMSE waarden hoger, met name voor hoge afvoeren (RMSE van 14,1 cm). Dit wordt veroorzaakt doordat de kalibratiefactoren voor de riviertakken rechtstreeks volgen vanuit de riviermodellen. Deze kalibratiefactoren zijn afgeleid voor andere periodes en dus schematisaties en afvoeren en daarnaast is er gekalibreerd op de bias in plaats van de bij RMM gebruikte kwadratische kostenfunctie.

De RMSE-waarden van de zesde-generatie D-HYDRO validatieperiodes zijn vergelijkbaar met die van het vijfde-generatie WAQUA model (beide een gemiddelde RMSE van 4,7 cm). In het noorden van het domein iets slechter, in het zuiden iets beter en gemiddeld ongeveer gelijk. Een mogelijke verklaring hiervoor is het gebruik van ruimtelijk variërende meteo forcering in het zesde generatie model. De bias is in het zesde-generatie (RMS van 2,6 cm) model iets hoger dan in het vijfde-generatie model (RMS van 1,5 cm). Een directe vergelijking is echter niet mogelijk, omdat de modellen zijn doorgerekend voor andere condities, andere periodes en bijbehorende schematisaties.

3 Methodiek verschilanalyse

In dit hoofdstuk wordt de methodiek uiteengezet die is toegepast voor de verschilanalyse van de Rijn-Maasmonding. Daarbij wordt eerst ingegaan op de verschillende analyses die in deze rapportage aan bod komen. Vervolgens wordt ingegaan op de gebruikte modelrandvoorwaarden en de aanpak van de analyse zelf.

3.1 Onderdelen verschilanalyse

Tijdens de verschilanalyse wordt de invloed van de volgende (gewijzigde) aspecten bij de modelopzet van de nieuwe generatie geanalyseerd:

- 1 De overgang van de rekensoftware (van WAQUA naar D-HYDRO)
 - a Totaal effect van de overgang van de software
 - b Advectieschema (effect van het gebruik van een ander advectieschema)
- 2 De overgang naar een ander soort rekenrooster (van gestructureerd naar ongestructureerd)
 - a Totaal effect van de overgang naar een ander rekenrooster
 - b Effect van de overgang naar een ander rekenrooster, zonder het effect van overlaten en kunstwerken
- 3 Het gebruik van andere parameters en modelconcepten:
 - a Horizontale viscositeit (verschil tussen uniforme viscositeit en toepassing Smagorinsky-model)
 - b Overlaatformulering (verschil tussen Tabellenboek en Villemonte-formulering)
 - c Windschuispanningscoëfficiënt (verschil tussen instellingen uit Van Vledder (2017) en Bak & Vlag (1997))
- 4 Het gebruik van een andere schematisatie
 - a Het totale effect van de overgang van het vijfde naar het zesde-generatie model voor de basisschematisatie van 2013. Omdat er geen 5^e generatie 2013 schematisatie beschikbaar is, is er een 2012 schematisatie gebruikt.
 - b De actualisatie van de schematisatie (van 2013 naar 2019)
 - c Beno (totale vergelijking beleidsmodel, incl. vegetatielegger, vergunningen en planmaatregelen, t.o.v. actueel model)
- 5 Het gebruik van andere BOI-modelrandvoorwaarden (gecombineerd effect van nieuwe afleiding lateralen en nieuwe Qh-relatie)
- 6 BOI (huidige beno-model (kandidaat voor BOI2023), met het WBI2017-model)
 - a Het effect van een andere modelschematisatie (met dezelfde modelrandvoorwaarden)
 - b Het totale effect voor BOI (andere modelschematisatie en andere modelrandvoorwaarden)

Voor de verschilanalyses worden steeds verschillende modelschematisaties (met bijbehorende modelrandvoorwaarden) gebruikt voor de referentie en de variant. Een overzicht van de gebruikte modelschematisaties met hun instellingen wordt gegeven in bijlage A.1. Bij elk onderdeel van de verschilanalyse worden de gebruikte instellingen voor de referentie en de variant ook telkens in een aparte tabel weergegeven.

3.2 Gebruikte modelrandvoorwaarden

Er wordt in de meeste analyses in dit rapport (uitgezonderd hoofdstuk 9 en paragraaf 10.2) alleen gekeken naar verschillen die ontstaan door een andere opzet van een bepaald aspect van de modellen zelf, dus hierbij worden de gebruikte modelrandvoorwaarden (hr2023-zss) steeds hetzelfde gehouden. Er worden verschillen tussen de 2 modelvarianten van 12 modelsommen gepresenteerd: 4 verschillende stationaire afvoeren en 3 verschillende zeewaterstanden die gekoppeld zijn aan windsnelheid. Hierbij worden voor de meeste analyses geen lateralen meegenomen in de modelberekening. Alleen in de vergelijkingen van de modelrandvoorwaarden (nummer 5 in de opsomming in paragraaf 3.1) en het totale effect voor BOI (6b) worden de lateralen meegenomen en worden andere modelrandvoorwaarden gebruikt.

Binnen deze verschilanalyse wordt zowel gekeken naar meer 'normale' en maatgevende omstandigheden als ook de hoekpunten met extreme omstandigheden, om zo over het hele toepassingsbereik een globaal beeld te krijgen van de verschillen. De bovenstroomse afvoerrandvoorwaarden voor hr2023 en hr2017 zijn weergegeven in Tabel 3-1 en Tabel 3-2, respectievelijk. De afvoerverdeling over Waal en Lek voor hr2023 komt uit de resultaten van de productiesommen van de Rijn van BOI2023. De afvoer van de Waal van 479 m³/s is gebaseerd op de afvoer net stroomafwaarts van Tiel, net na de aantakking van ARK. De afvoer net bovenstrooms van de aftakking is 507 m³/s. In het Rijntakken model is er een verbinding tussen Waal en Lek via ARK-Betuwepand, welke in het RMM model niet aanwezig is. Bij een afvoer van 600 m³/s bij Lobith staat deze verbinding in het Rijntakken model open en stroomt er water van Waal naar Lek. Voor de Maas wordt er in hr2023 gebruik gemaakt van een verbeterde 1-op-1 relatie met de afvoer bij Lobith (vertaling van Borgharen naar Lith is abusievelijk twee keer toegepast in hr2017 en op basis van oude afvoerstatistiek, zie Oosterlo (2023)).

Tabel 3-1 Afvoerrandvoorwaarde op de takken Waal, Maas en Lek bij de 4 Lobith afvoeren (m³/s) zoals gebruikt voor modelrandvoorwaarden hr2023.

Lobith	600	6000	16000	24000
Waal	479	3992	10142	14101
Maas	55	1235	3768	5769
Lek	1	1065	3329	5059

Tabel 3-2 Afvoerrandvoorwaarde op de takken Waal, Maas en Lek bij de 4 Lobith afvoeren (m³/s) zoals gebruikt voor modelrandvoorwaarden hr2017.

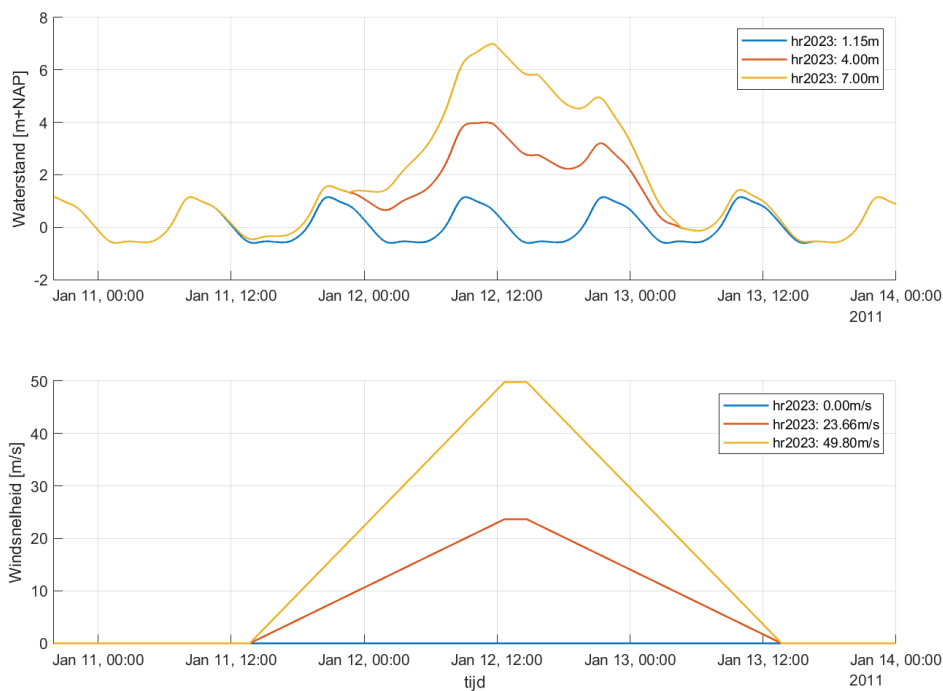
Lobith	600	6000	16000	24000
Waal	550	4062	10168	14173
Maas	55	1284	3620	5570
Lek	25	1045	3350	4978

De zeewaterstand randvoorwaarden voor hr2023 zonder zeespiegelstijging (hr2023-zss) zijn weergegeven in Figuur 3-1, met de bijbehorende openwater windsnelheid. De zeewaterstand is gekoppeld aan de windsnelheid, waarbij een toenemende windsnelheid met een windrichting Westnoordwest (292,5°N) leidt tot een toenemende waterstand. De maximale waterstanden en windsnelheden zijn weergegeven in Tabel 3-3. In Figuur 3-1 zijn alleen de grafieken voor hr2023-zss gegeven. Het tijdsverloop voor de waterstand en windsnelheid in hr2017 en hr2023 zijn gelijk aan die in hr2023-zss, het enige verschil is de maximale waarde. Voor de opgelegde windsnelheid is dit verschillend omdat de codering in hr2017 uitgaat van de openwater wind (zie Tabel 3.2 in Agtersloot & Paarlberg (2016)) en in hr2023 van de

potentiële wind. Daarnaast wordt er in hr2023 winddragafkapping gebruikt, wat een invloed heeft voor windsnelheden boven de 30 m/s (zie ook bijlage B in Botterhuis, Duits en Stijnen (2023)).

In de vergelijkingen van de modelrandvoorwaarden (hoofdstuk 9) en het totale effect voor BOI (paragraaf 10.2) wordt zeespiegelstijging meegenomen. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de modelrandvoorwaarden uit WBI2017 (hr2017) en BOI2023 (hr2023). Voor hr2017 geldt een zeespiegelstijging van 10,5 cm ten opzichte van 1985 en voor hr2023 nieuw geldt een zeespiegelstijging van 5 cm ten opzichte van 2011. De resulterende maximum waterstanden en ook de windsnelheden van de hr2023 modelrandvoorwaarden zijn weergegeven in Tabel 3-3.

In de vergelijkingen van de modelrandvoorwaarden en het totale effect voor BOI worden ook de lateralen meegenomen. De afvoerrandvoorwaarden van de lateralen voor hr2023 en hr2017 zijn weergegeven in Tabel 3-4 en Tabel 3-5, respectievelijk. De laterale afvoeren zijn in 2018/2019 opnieuw geanalyseerd en relaties met de hoofdafvoer zijn opnieuw bepaald. Laatste inzichten in de regionale sturing van afvoeren is daarbij ook meegenomen. Dit verklaart de verschillen tussen hr2023 en hr2017.



Figuur 3-1 Zeewaterstand en openwater windsnelheid randvoorwaarden opgelegd op het Rijn-Maasmonding model zoals gebruikt voor modelrandvoorwaarden hr2023-zss.

Tabel 3-3 Maximale zeewaterstanden en openwater windsnelheden voor drie verschillende modelrandvoorwaarden voor potentiële windsnelheid.

Randvoorwaarden	Waterstanden (m+NAP)			Openwater windsnelheid (m/s)			Wind-richting
Potentiële windsnelheid (m/s)	0	20,0	46,0	0	20,0	46,0	
hr2017	1,16	4,04	7,04	0	21,60	47,10	WNW
Potentiële windsnelheid (m/s)	0	22,0	47,0	0	22,0	47,0	
hr2023	1,20	4,00	7,00	0	23,66	49,80	WNW
hr2023 - zss	1,15	4,00	7,00	0	23,66	49,80	WNW

Tabel 3-4 Laterale afvoeren op de takken Maas en Lek bij de 4 Lobith afvoeren (m³/s) zoals gebruikt voor modelrandvoorwaarden hr2023.

Riviertak	Lateraal	Lobith	600	6000	16000	24000
Lek	De Koekoek (Lopikerwaard)		0,04	2,05	2,97	3,81
	Krimpenerwaard		0,05	1,40	2,02	2,58
Maas	Quarles van Uffordgemaal		0,52	3,36	4,24	4,84
	Gemaal Gewande		1,11	7,19	9,01	10,29
	Uitstroom Drongelens kanaal		2,40	13,66	79,55	85,0
	Uitstroom Diezekanaal		10,04	57,13	2,87	3,31

Tabel 3-5 Laterale afvoeren op de takken Maas en Lek bij de 4 Lobith afvoeren (m³/s) zoals gebruikt voor modelrandvoorwaarden hr2017.

Riviertak	Lateraal	Lobith	600	6000	16000	24000
Lek	De Koekoek (Lopikerwaard)		0	1,6	5,4	6,1
	Krimpenerwaard		0	3,0	7,7	8,7
Maas	Quarles van Uffordgemaal		0,1	1,3	3,8	4,6
	Gemaal Gewande		0	0,8	18,9	23,1
	Uitstroom Drongelens kanaal		5,2	38,8	107,1	155,5
	Uitstroom Diezekanaal		5,2	23,4	0	0

3.3 Aanpak resultaten

De resultaten zijn opgesteld op basis van de scalaire modeluitvoer ingesteld op 5 minuten. De waterstand is vervolgens bepaald als de gemiddelde waarde van de 13 waterstanden rondom de maximale waarde (6 voor en 6 na) (max13). De totale periode waarop deze waterstand is gebaseerd is dus ruim 1 uur.

Daarnaast worden de verschillen alleen bekeken over de lengte van de rivieras en niet per individuele LMW meetlocatie (LMW= Landelijk Meetnet Water). Een aantal van deze locaties wordt echter wel ter referentie van de locatie op de lengte van de rivieras als verticale stippellijn in de figuren getoond. Tabel 3-6 presenteert de LMW-meetlocaties met bijbehorende rivierkilometer.

Tabel 3-6 LMW-meetlocaties met bijbehorende rivierkilometers

rkm	tak	LMW-meetlocatie	rkm	tak	LMW-meetlocatie
947.1	LE	Hagestein beneden	202.37	MA	Lith dorp
971.6	LE	Schoonhoven	215.40	MA	Empel beneden
988.7	LE	Krimpen aan de Lek	230.61	MA	Heesbeen
999.47	NM	Rotterdam	247.60	MA	Keizersveer
1002.49	NM	Parksluis	976.25	OM	Dordrecht
1010.91	NM	Vlaardingen	986.43	OM	Heerjansdam
1018.75	NW	Maassluis	992.53	OM	Goidschalxoord
1025.67	NW	Maeslantkering rivierzijde	996.15	OM	Beerenplaat
1026.89	NW	Maeslantkering zeezijde	1003.04	OM	Spijkenisse
1030.19	NW	Hoek van Holland	980.57	NO	Alblasserdam

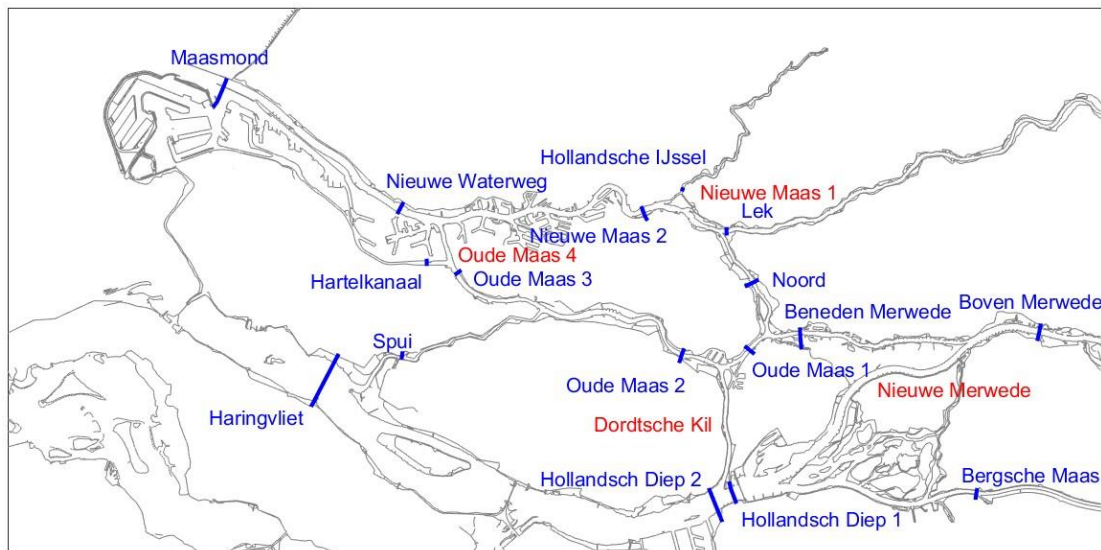
rkm	tak	LMW-meetlocatie	rkm	tak	LMW-meetlocatie
913.3	WL	Tiel Waal	1007.13	SP	Zuidland
926.1	WL	Sint-Andries Waal	1017.95	CK	Rozenburgsesluis
934.8	WL	Zaltbommel	1028.42	CK	Scheurhaven
951.8	WL	Vuren	1031.52	CK	Beerkanaal
0.90	SG	Werkendam buiten	1032.03	CK	Europahaven
961.0	BO	Hardinxveld	1.58	HK	Hartelbrug
976.99	NI	Deeneplaat	10.38	HK	Harmsenbrug
984.55	HD	Moerdijk	15.01	HK	Hartel Kuwait
998.15	HD	Rak noord	18.91	HK	Suurhoffbrug
1024.04	HV	Hellevoetsluis	0.86	HY	Gouda brug
			17.99	HY	Krimpen ad IJssel

Aangezien een aanpassing in het model naast de waterstand ook de afvoerverdeling (en daarmee ook weer de waterstand) kan beïnvloeden, maakt dit het erg lastig om het specifieke waterstandseffect van een verandering te duiden. Vooral ook omdat de verschillen in de afvoerverdeling per afvoerniveau sterk kunnen variëren. Er is daarom in deze verschilanalyse ook gekeken naar de effecten als gevolg van de afvoerverdeling.

Om de afvoerverdeling te bepalen zijn de afvoeren door dwarsdoorsnedes bij splitsingspunten in de tijd gemiddeld over één getij. De afvoerverdeling met wind en opzet moet heel anders benaderd worden en is lastig om één op één met elkaar te vergelijken. Daarom zijn de afvoerverdeling en -verschillen alleen uitgevoerd voor de sommen zonder wind en opzet. De afvoerverdeling over de splitsingspunten is bepaald op de locaties die zijn weergegeven in Figuur 3-2. Locaties weergegeven in rood hebben geen dwarsdoorsnedes met afvoer resultaten in één of meer modelvarianten en zijn daarom berekend uit andere takken. De berekende waarden kunnen licht afwijken van de werkelijke afvoeren, echter zijn de berekende waarden een goede benadering:

- Nieuwe Maas 1 is berekend uit de afvoer door de Lek en Noord
- Oude Maas 4 is berekend uit de afvoer door de Oude Maas 3 en Hartelkanaal
- Dordtsche Kil is berekend uit de afvoer door de Oude Maas 1 en Oude Maas 2
- Nieuwe Merwede is berekend uit de afvoer door de Boven Merwede en Beneden Merwede

Bij het vergelijken van de afvoerverdelingen is steeds het betreffende referentiemodel van een analyse als uitgangspunt genomen.



Figuur 3-2 Locaties bij de splitsingspunten van de dwarsdoorsnedes (blauw) voor de bepaling van de afvoerverdeling. Afvoeren bij de rode locaties zijn berekend uit andere takken.

4 Algemene opmerking m.b.t. alle resultaten

4.1 Resultaten met lage afvoer en geen wind/opzet

Over het algemeen zijn de effecten op de waterstand zeer beperkt bij lage afvoer ($Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$) en geen wind en opzet. Bij deze condities vindt de waterbeweging uitsluitend plaats in het zomerbed. Hier zijn de verschillen relatief klein tussen de vijfde- en zesde-generatie modellen. Daarnaast zijn stroomsnelheden relatief laag waardoor verschillen in rekenrooster, parameters, modelconcepten en geometrie minder effect hebben op de waterstanden.

De verschilanalyse met de grootste verschillen voor deze condities is het effect van de modelrandvoorwaarden (paragraaf 9.1), met name op de bovenstroomse riviertakken, en specifiek op de Waal. De modelrandvoorwaarden uit BOI2023 resulteren hier in significant lagere waterstanden bovenstrooms bij Tiel.

4.2 Resultaten met extreem hoge afvoer en extreem harde wind

Binnen deze verschilanalyse wordt ook gekeken naar extreem hoge afvoeren (tot $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith) en extreme windsnelheden (tot 47 m/s), omdat deze deel uitmaken van de productiesommen binnen BOI. Vaak worden bij deze extreme condities de grootste verschillen gevonden. Deze afvoeren zijn echter tweemaal hoger dan wat ooit gemeten is en ca. 1,4 keer groter dan de verwachtingswaarde van de T100.000-afvoer. Ook de windsnelheid van 47 m/s is 1,6 keer hoger dan ooit gemeten. Ze horen daarmee bij een uiterst kleine overschrijdingskans en/of met significante mate van klimaatverandering en/of een positie in het bovenbereik van de onzekerheidsband. Daarom zijn de verschillen tussen modelvarianten bij $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en/of 47 m/s zoveel groter dan binnen het meetbereik (tot $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 30 m/s).

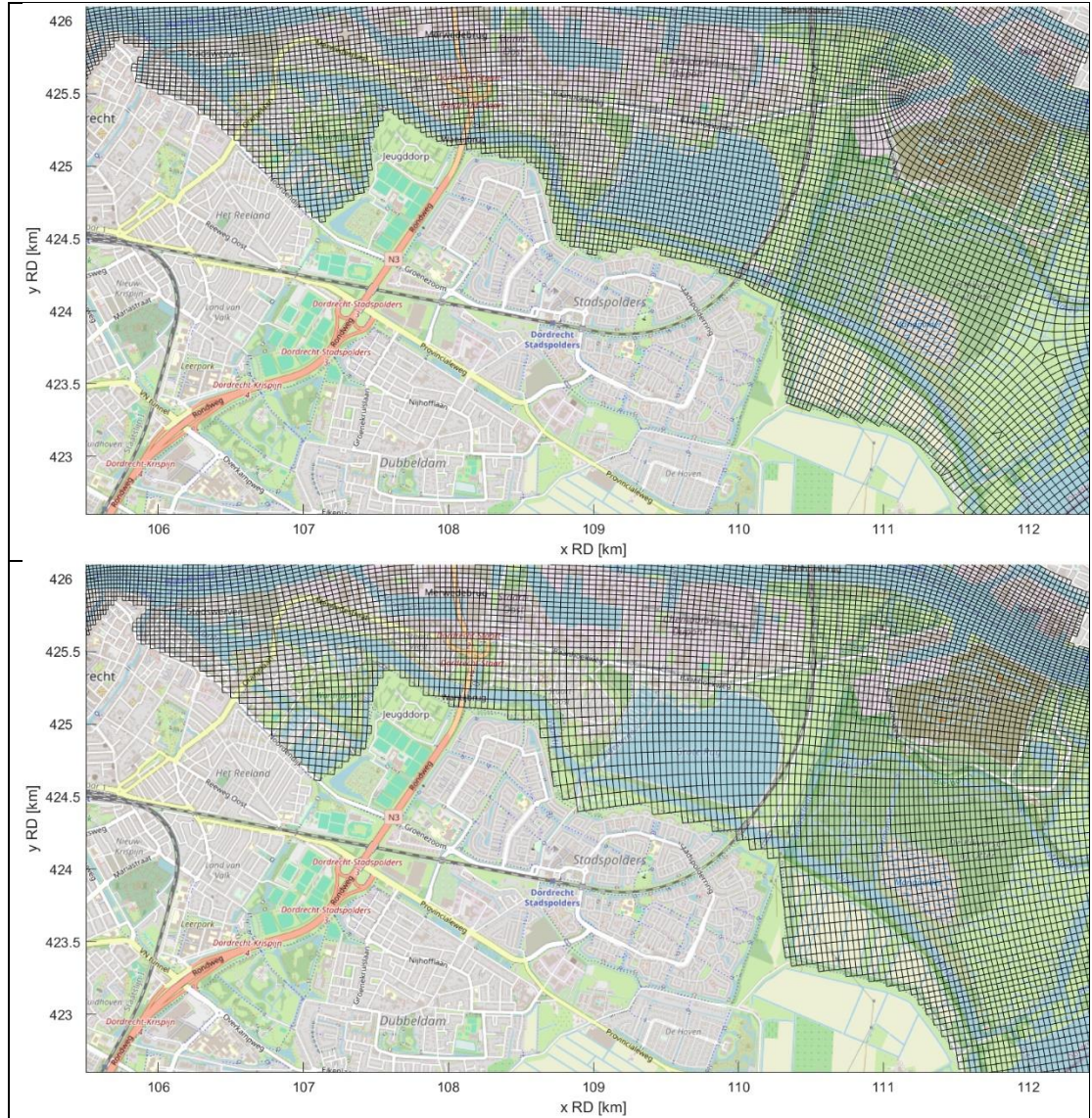
4.3 Resultaten op de Hollandsche IJssel

Er ontstaan grote waterstandsverschillen op de Hollandsche IJssel bij de vergelijkingen tussen vijfde en zesde generatie met kunstwerken. De verschillen voor de sommen met extreem harde wind en hoge zeewaterstand zijn daarin het grootst. Deze grote verschillen zijn voornamelijk het gevolg van een andere keringformulering tussen de twee generaties. In de zesde generatie kan de Hollandsche IJsselkering overstroomd worden bij een waterstand hoger dan $5 \text{ m} + \text{NAP}$, terwijl dit in de vijfde generatie niet mogelijk is, zoals ook al beschreven in paragraaf 0. Daarom zijn deze verschillen te zien bij alle vergelijkingen tussen vijfde en zesde generatie (paragraaf 5.1, paragraaf 8.1 en hoofdstuk 10), behalve bij paragraaf 5.2 waar de kunstwerken (waaronder ook de Hollandsche IJsselkering) niet worden meegenomen.

Ook in andere verschilanalyses laat de Hollandsche IJssel grote verschillen zien, terwijl daar twee zesde-generatie modellen met elkaar vergeleken worden. Uit analyse blijkt dat dit te maken heeft met gevoeligheid van de sluitingscriteria van deze kering. In paragraaf 6.1 is toegelicht hoe de kering bij twee zesde-generatie modellen in de vergelijking van het rekenrooster op een significant verschillend moment sluit, waardoor de waterstanden op de Hollandsche IJssel ook significant verschillen.

4.4 Resultaten op het Wantij

De resultaten in het Wantij zijn in alle vergelijkingen onrealistisch. Het Wantij is een zeer smalle waterweg die op sommige stukken slechts door één cel in dwarsrichting wordt bestreken. Hierdoor wordt de waterbeweging in het Wantij niet goed gemodelleerd. In beide modellen is het Wantij niet uitgelijnd in het rooster, zoals te zien in Figuur 4-1. Wel heeft het zesde-generatie rooster een wat fijnere resolutie waardoor de waterbeweging iets beter wordt gemodelleerd.



Figuur 4-1 Uitsnede uit het rooster bij het Wantij in D-HYDRO (boven) en WAQUA (onder).

4.5 Afvoerverdeling

De afvoeren bij de splitsingspunten tellen niet altijd goed op. Dit wordt grotendeels veroorzaakt doordat ondiepe delen onder kunnen lopen en daardoor extra berging geven. Ook kunnen de berekende afvoeren kleine afwijkingen veroorzaken.

5 Verschilanalyse: Software

Dit hoofdstuk analyseert het effect van de overstap van de SIMONA software naar de D-HYDRO Suite en gaat daarbij nader in op het gebruik van een ander advection-schema.

5.1 Totaal effect software

Het effect van de overgang van SIMONA (WAQUA) naar D-HYDRO Suite wordt hier in beeld gebracht. Hiervoor wordt het bestaande WAQUA j15_5 model rechtstreeks omgezet naar D-HYDRO-invoer (via Matlab-scripts) en worden de instellingen zoveel mogelijk hetzelfde gehouden (behalve de rekentijd-stap) als in het WAQUA model (waqua-rmm-j15_5). De resultaten worden vervolgens vergeleken met die van het oorspronkelijke WAQUA-model.

Uitgangspunten

Voor de referentie wordt het waqua-rmm-j15_5-v2 [waq_j15] gebruikt. Om de overstap van de SIMONA software naar de D-HYDRO Suite te kunnen bepalen is voor de variant het referentiemodel met behulp van Matlab-scripts uit de OpenEarthTools-bibliotheek omgezet naar een D-HYDRO model [fm_waq_j15]. Het WAQUA-model is daarin eerst geconverteerd naar een Delft3D-model, waarna het in een tweede stap naar een D-HYDRO-model is geconverteerd. Als derde stap zijn de ruwheid- en trachytopen-bestanden apart geconverteerd met een ander Matlab-script. Als laatste stap zijn nog enkele handmatige wijzigingen gedaan aan de ruwheiddefinities om de zomerbedruwheden in het juiste format te zetten (dit handelt het Matlab-script niet correct af). De eb-vloed en afvoerafhankelijke ruwheden zijn in deze modelvariant via de kalibratiefactoren toegepast. De modelopbouw per component van deze modelschematisatie staat beschreven in bijlage A.2.

Tabel 5-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

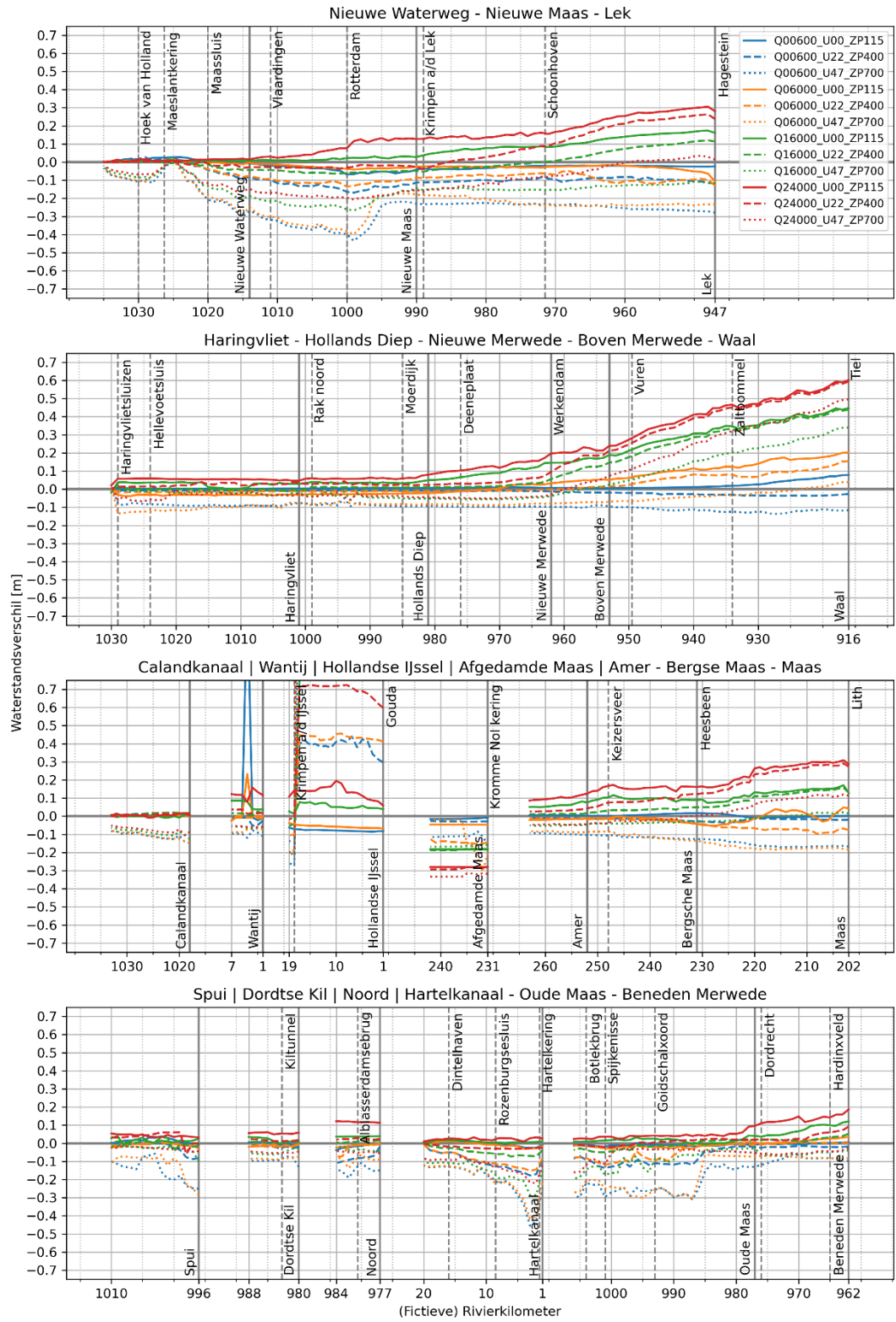
Tabel 5-1 Instellingen van variant (fm_waq_j15) en referentie (waq_j15) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door de overstap van de SIMONA software naar de D-HYDRO Suite software.

	variant	referentie
	fm_waq_j15	waq_j15
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1,0)*	WAQUA-waarde (1,0)*
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	G5	G5
Ruwheid zomerbed	G5	G5
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

* Op de bovenstroomse randen bij de Lek en Waal en bij de Haringvlietsluizen wordt lokaal een viscositeit van 10 m²/s toegepast. Bij de zeerand van de Maasmond wordt lokaal een viscositeit van 100 m²/s toegepast. Dit is beschreven in paragraaf 2.4.1.

Resultaten

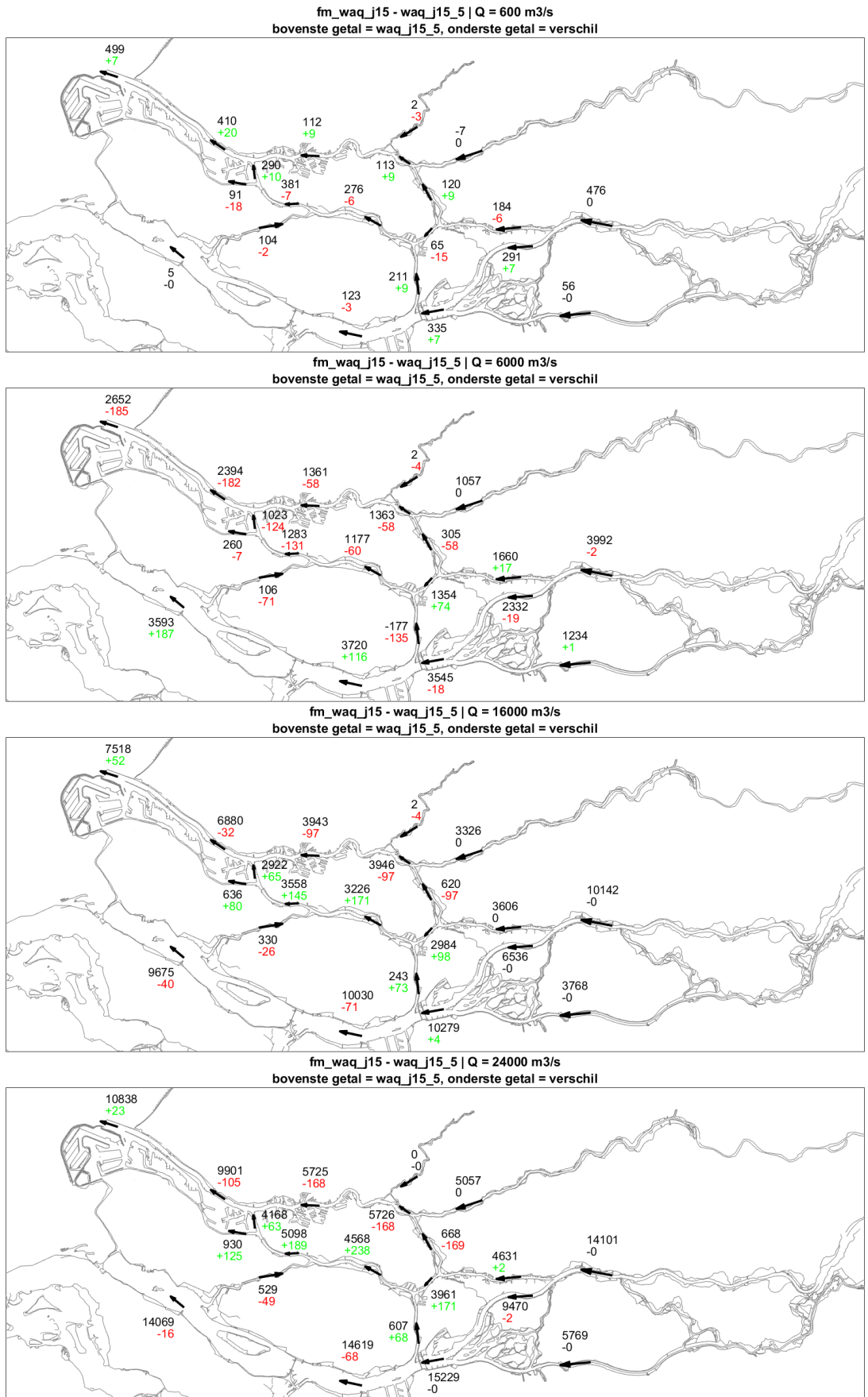
Figuur 5-1 presenteert het effect van de andere rekensoftware (D-HYDRO t.o.v. WAQUA) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 5-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 5-1. Figuur 5-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 5-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware (fm_waq_j15 t.o.v. waq_j15) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 5-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware (fm_waq_j15 t.o.v. waq_j15) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.023	0.022	-0.068	0.027
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.092	0.044	-0.169	0.027
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.247	0.083	-0.435	0.021
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.023	0.018	-0.109	0.014
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.079	0.038	-0.135	0.017
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.227	0.078	-0.399	0.014
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.061	0.056	-0.006	0.173
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.055	-0.064	0.120
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.154	0.055	-0.267	0.022
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.127	0.095	0.002	0.305
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.056	0.102	-0.040	0.263
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.100	0.073	-0.206	0.035
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.013	0.018	0.002	0.078
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.016	0.010	-0.037	-0.005
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.099	0.015	-0.136	-0.050
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.034	0.074	-0.038	0.201
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.019	0.046	-0.018	0.155
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.070	0.037	-0.135	0.039
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.150	0.141	0.002	0.447
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.117	0.149	-0.007	0.439
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.042	0.117	-0.059	0.340
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.206	0.180	0.046	0.602
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.170	0.193	0.012	0.593
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.077	0.172	-0.067	0.496
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.004	0.007	-0.007	0.016
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.018	0.007	-0.035	-0.009
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.131	0.027	-0.171	-0.093
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.011	0.024	-0.053	0.048
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.044	0.027	-0.097	-0.012
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.135	0.039	-0.184	-0.081
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.103	0.031	0.050	0.171
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.065	0.048	0.010	0.157
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.024	0.023	-0.054	0.021
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.189	0.070	0.087	0.309
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.141	0.091	0.026	0.291
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.018	0.060	-0.047	0.120



Figuur 5-2 Afvoerverdeeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van andere rekensoftware (fm_waq_j15 t.o.v. waq_j15) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De verschillen zijn relatief groot, zeker in het bovenstroomse gebied. De gemiddelde absolute bias in Tabel 5-2 is 8,6cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 6,5cm en een maximale uitschieter van +60cm in de Waal. Op de bovenstroomse riviertakken is een oplopende waterstand te zien voor D-HYDRO ten opzichte van WAQUA, vooral voor de hogere afvoersommen zonder wind en zonder waterstandsopzet. Op de Waal loopt het verschil op tot +60cm bij de bovenstroomse rand bij Tiel voor hoge afvoer ($Q=24.000 \text{ m}^3/\text{s}$), geen opzet (1,15 m+NAP) en geen wind. Een hardere wind en hogere zeewaterstand geeft over het algemeen lagere waterstanden in D-HYDRO ten opzichte van WAQUA, behalve bovenstrooms op de Maas en Waal.

Vanaf de zeerland bij de Nieuwe Waterweg is vrij snel een 10 cm lagere waterstand te zien in D-HYDRO voor de sommen met extreem harde wind (49,8 m/s) en hoge zeewaterstand (7,00 m+NAP). Ter hoogte van de Maeslantkering is voor deze sommen te zien dat het verschil verdwijnt, waarna de waterstand in D-HYDRO weer steeds lager wordt ten opzichte van WAQUA verder in bovenstroomse richting op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas. Voor de lage afvoer ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$) zijn de verschillen het grootst, tot -44cm ter hoogte van Rotterdam.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de hoogste twee rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer door de Oude Maas en Hartelkanaal in D-HYDRO, vergeleken met WAQUA. Bij een rivierafvoer van $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ trekt er juist meer afvoer door het Hollandsch Diep en het Haringvliet in D-HYDRO.

De verschillen ontstaan door een combinatie van meerdere factoren. Om een beter inzicht te krijgen waar de verschillen van het totale effect van software vandaan komen wordt eerst gekeken naar de verschillen als gevolg van het advection-schema in de volgende paragraaf.

5.2 Advection-schema

Een belangrijk verschil in de software is het gebruik van een ander advection-schema tussen SIMONA (WAQUA) en D-HYDRO Suite. Dit verschil wordt hier in beeld gebracht.

Uitgangspunten

Het is helaas niet mogelijk om binnen hetzelfde softwarepakket beide advection-schema's te gebruiken, om ze onderling te kunnen vergelijken. Om het effect van het gebruikte advection-schema in WAQUA beter in beeld te brengen worden in het waqua-rmm-j15_5-v2 [waq_j15] model de overlaten en kunstwerken verwijderd en wordt een kleine horizontale wervelviscositeit toegepast (EDDYviscositycoeff=0,20 i.p.v. 1,0). Daarnaast wordt in het hele model een constante ruwheid gebruikt (WhiteColebrook 0,2). Dit is de referentiesituatie (waq_j15_adv).

Om het effect van het gebruikte advection-schema in D-HYDRO beter in beeld te brengen en tegelijk zo goed mogelijk de vergelijking met WAQUA te kunnen uitvoeren, worden in het dflowfm2d_waqua-rmm-j15_5-v2 [fm_waq_j15] model de overlaten en kunstwerken verwijderd en wordt een kleine horizontale viscositeit toegepast (Vicouv=0,2 i.p.v. 0,1 en Smagorinsky=0 i.p.v. 0,2). Daarnaast wordt in het hele model een constante ruwheid gebruikt (WhiteColebrook 0,2). Dit is de variantsituatie (fm_j15_adv).

Tabel 5-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

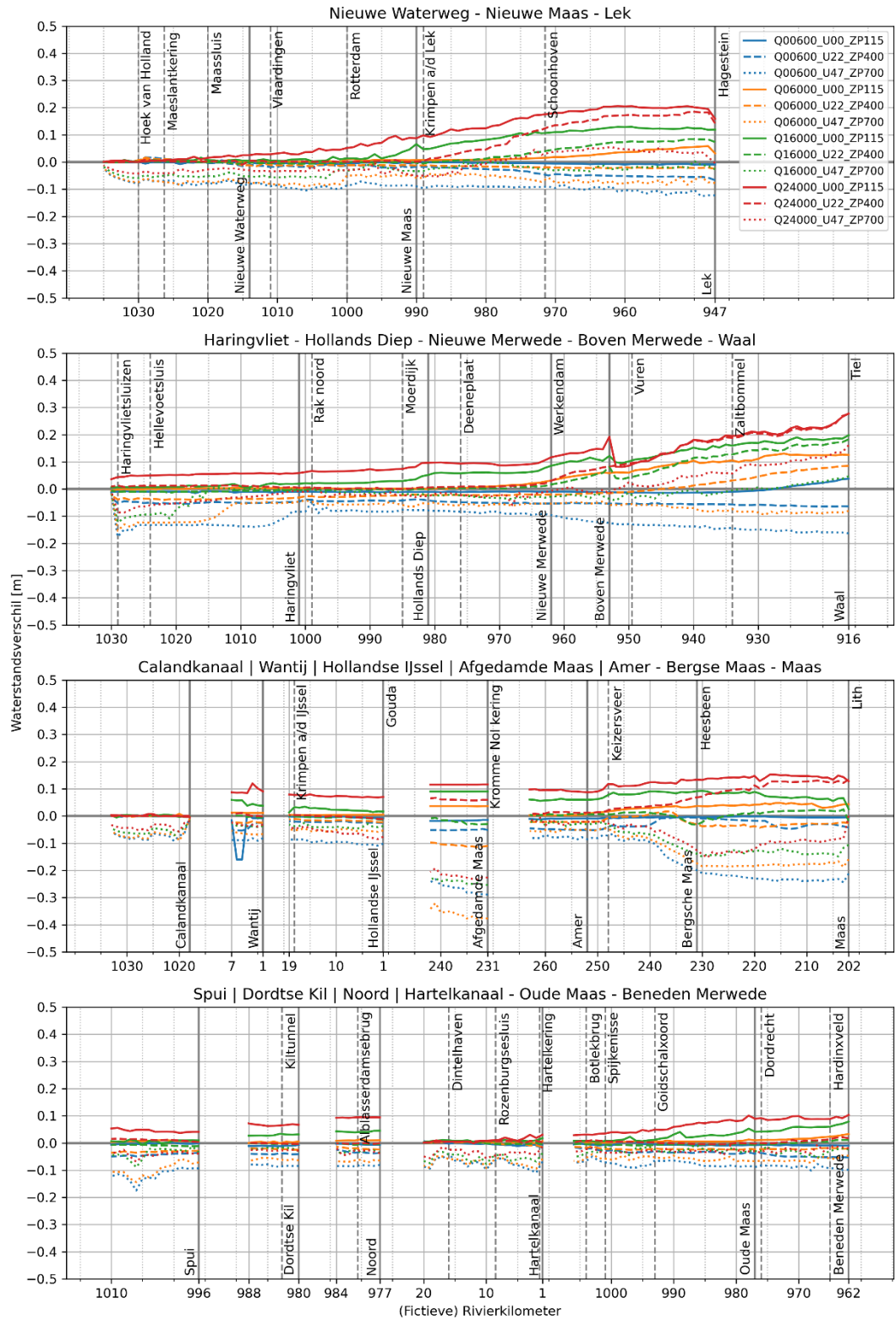
Tabel 5-3 Instellingen van variant (*fm_j15_adv*) en referentie (*waq_j15_adv*) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door een ander advectionschema.

	variant	referentie
	<i>fm_j15_adv</i>	<i>waq_j15_adv</i>
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Geen	Geen
Viscositeit	klein (0,2)*	klein (0,2)*
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	geen	geen
Ruwheid zomerbed	constant (WhiteColebrook 0,2)	constant (WhiteColebrook 0,2)
Structures	geen (alleen Volkerak)	geen (alleen Volkerak)
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

* Op de bovenstroomse randen bij de Lek en Waal en bij de Haringvlietsluizen wordt lokaal een viscositeit van 10 m²/s toegepast. Bij de zeerand van de Maasmond wordt lokaal een viscositeit van 100 m²/s. Dit is beschreven in paragraaf 2.4.1.

Resultaten

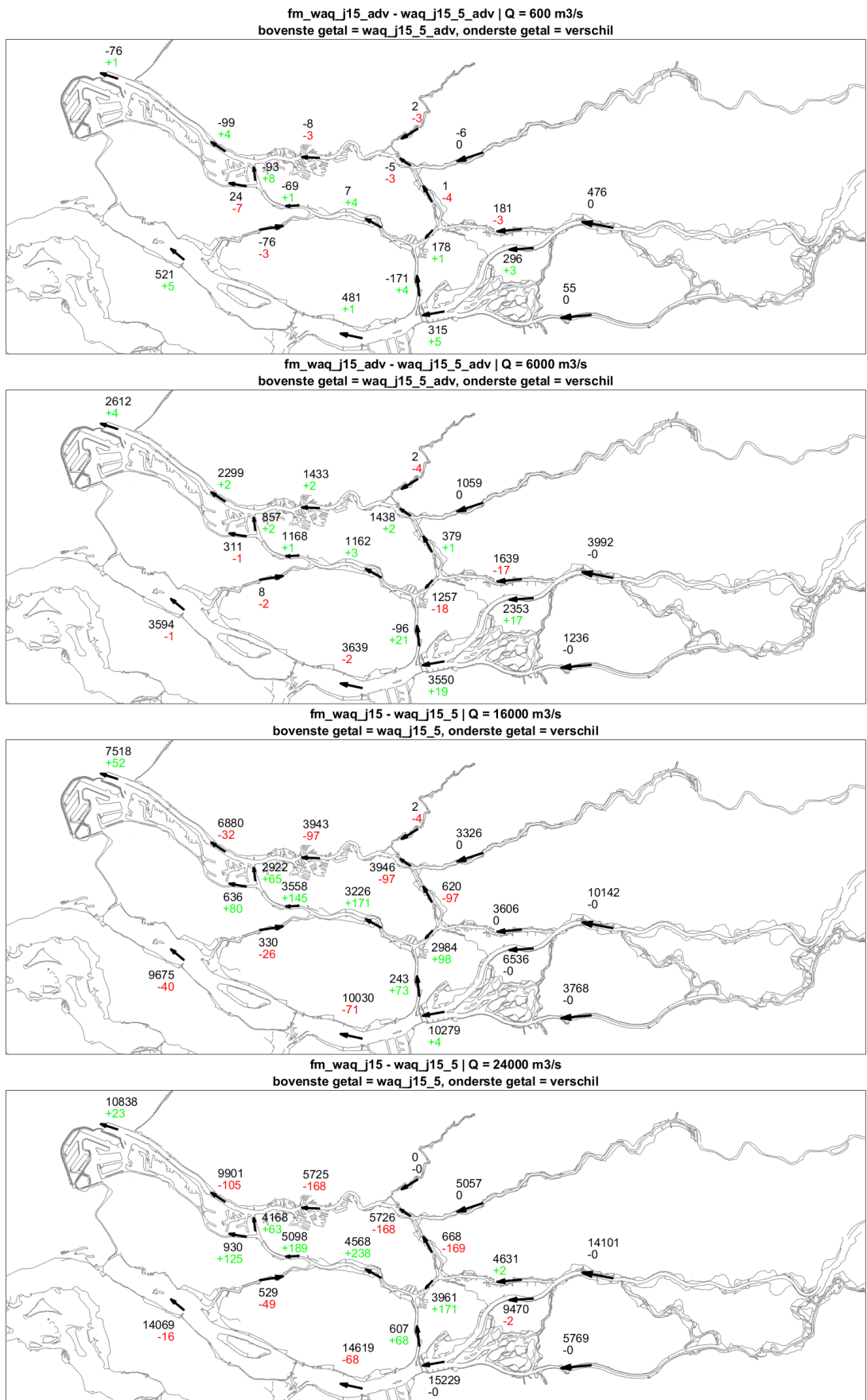
Figuur 5-3 presenteert het effect van het gebruik van een ander advectionschema tussen WAQUA en D-HYDRO ([*fm_j15_adv*] t.o.v. [*waq_j15_adv*]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 5-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 5-3. Figuur 5-4 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 5-3 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een ander advectionsschema (fm_j15_adv t.o.v. waq_j15_adv) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 5-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een ander advectieschema (fm_j15_adv t.o.v. waq_j15_adv) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.004	0.003	-0.010	0.006
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.025	0.021	-0.067	0.017
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.091	0.014	-0.126	-0.059
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.015	0.016	-0.002	0.058
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.013	0.009	-0.025	0.016
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.066	0.013	-0.089	-0.041
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.058	0.050	0.001	0.129
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.022	0.032	-0.008	0.084
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.031	0.017	-0.059	0.004
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.103	0.074	0.000	0.206
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.061	0.072	-0.010	0.185
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.006	0.035	-0.053	0.055
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.010	-0.015	0.038
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.052	0.006	-0.064	-0.038
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.118	0.030	-0.176	-0.045
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.040	0.048	-0.002	0.131
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.008	0.035	-0.041	0.085
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.072	0.025	-0.154	-0.042
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.076	0.063	0.004	0.198
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.041	0.062	-0.014	0.183
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.020	0.031	-0.122	0.047
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.112	0.062	0.044	0.278
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.068	0.084	-0.001	0.277
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.004	0.054	-0.086	0.161
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.006	0.003	-0.012	-0.001
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.031	0.016	-0.052	-0.005
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.162	0.070	-0.244	-0.065
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.029	0.015	0.002	0.048
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.021	0.015	-0.043	0.017
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.126	0.057	-0.188	-0.044
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.074	0.013	0.026	0.093
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.006	0.012	-0.032	0.024
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.093	0.048	-0.150	-0.013
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.124	0.021	0.088	0.153
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.067	0.046	0.007	0.134
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.072	0.043	-0.153	0.000



Figuur 5-4 Afvoeroverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van een ander advectieschema (fm_j15_adv t.o.v. waq_j15_adv) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De gemiddelde absolute bias in Tabel 5-4 is 5,3cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 3,4cm en een maximale uitschieter van +28cm op de Waal. De verschillen nemen langzaam toe in bovenstroomse richting. Op de bovenstroomse riviertakken is een oplopende waterstand te zien voor D-HYDRO ten opzichte van WAQUA, vooral voor de hogere afvoer sommen zonder wind en zonder waterstandsopzet. Op de Waal loopt het verschil op tot +28cm bij de bovenstroomse rand bij Tiel voor hoge afvoer ($Q=24000 \text{ m}^3/\text{s}$), geen opzet (1,15 m+NAP) en geen wind. Een hardere wind en hogere zeewaterstand geeft over het algemeen lagere waterstanden in D-HYDRO ten opzichte van WAQUA.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet zijn dezelfde effecten te zien als bij de totale software vergelijking in paragraaf 5.1. Er gaat meer afvoer door de Oude Maas en Hartelkanaal in D-HYDRO, vergeleken met WAQUA. Bij een rivierafvoer van $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de effecten in de verschilanalyse van het advectieschema kleiner, wanneer vergeleken met het totale software effect.

Nadere interpretatie

In paragraaf 5.1, waarin naar het totale verschil door de nieuwe software wordt gekeken, blijkt dat er duidelijke grotere verschillen optreden dan in de verschilanalyse van het advectieschema. Daarom kan het totale effect van de overstap naar de nieuwe software niet verklaard worden door alleen het advectieschema. Voor het analyseren van het effect van het advectieschema is echter zowel een kleine viscositeit als een constante ruwheid toegepast, en zijn de overlaten en kunstwerken weggelaten. Deze effecten zijn daarom ook los bekeken in respectievelijk bijlage B.1, B.2, B.3 en B.4.

De gevonden verschillen in bijlage B.1 zijn sterk vergelijkbaar met die uit paragraaf 5.1. Als gevolg van de kleinere viscositeit ontstaan grotere verschillen, maar het effect ten opzichte van de verschillen in paragraaf 5.1 is klein (enkele centimeters).

Het effect van het gebruik van een constante ruwheid in bijlage B.2 is groot bij de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg (orde 40cm). Met een constante ruwheid zijn de waterstandsverschillen op een groot gedeelte van Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas bovenstrooms van de Maeslantkering bijna nul. De verschillen die op dit traject dus ontstaan bij het totale effect in paragraaf 5.1 zijn het gevolg van de getij-afhankelijke ruwheid. In WAQUA ontstaan hier instabiliteitsgolven die een verkeerde representatie van eb en vloed geven, waardoor de getij-afhankelijke ruwheid afwijkingen heeft. Verder zijn er bovenstrooms op de riviertakken nog kleine effecten te zien tot circa 10 cm, waarbij de waterstandsverschillen kleiner worden als gevolg van een constante ruwheid.

Het wel of niet meenemen van overlaten heeft een relatief groot effect, vooral op de riviertakken (zie bijlage B.3). Zonder overlaten worden de verschillen tot circa 20 cm kleiner dan de verschillen gevonden in paragraaf 5.1.

Het effect van de kunstwerken (bijlage B.4) is vooral merkbaar bij de vergelijkingen met extreem harde wind, bij de andere sommen is de invloed van kunstwerken gering. De verschillen bij extreem harde wind worden zonder kunstwerken groter op het Haringvliet, en in de Waal en Maas (circa 10cm). Op de Lek worden de verschillen juist kleiner (ook circa 10cm). Verder zijn de verschillen die bij de Maeslantkering naar nul gingen in de vergelijking zonder kunstwerken niet meer te zien. Hieruit kan worden geconcludeerd dat dit effect wordt veroorzaakt door het kunstwerk. Hoewel de Maeslantkering in de vergelijking in paragraaf 5.1 geheel open staat, zit de drempel daar nog wel in het model. Deze veroorzaakt in beide modellen een andere stroming en opstuwing waardoor de verschillen ontstaan (Deltares, 2022).

6 Verschilanalyse: Rekenrooster

Dit hoofdstuk analyseert het effect van de overstap van het curvilineaire gestructureerde rooster zoals dat in de vijfde generatie is gebruikt naar het flexibele ongestructureerde rooster opgezet voor de zesde generatie. Daarbij wordt zowel gekeken naar het totale effect als het effect zonder het meenemen van overlaten en kunstwerken.

6.1 Totaal effect rekenrooster

Het effect van de overgang van een gestructureerd curvilineair rooster naar het nieuwe ongestructureerde flexibele rooster wordt hier in beeld gebracht. Voor het curvilineaire rooster wordt gebruik gemaakt van het bestaande WAQUA-rooster.

Uitgangspunten

Voor de referentie (fm_j19_waq_grid) wordt het gestructureerde curvilineaire rekenrooster gebruikt uit het vijfde-generatie WAQUA-model en deze wordt via een nieuwere DeltaShell versie omgezet naar een rekenrooster in ongestructureerde vorm. Vervolgens worden de resulterende *.net.nc en *.netgeom.nc bestanden in Baseline 6 in de BAS2FM-methode gebruikt om de benodigde gridafhankelijke bestanden voor het D-HYDRO-model opnieuw te genereren: de trachytopen, kalibratiefactoren en bodemhoogtes. Zie ook bijlage A.2. Voor de variant wordt de bestaande D-HYDRO-schematisatie (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d) gebruikt.

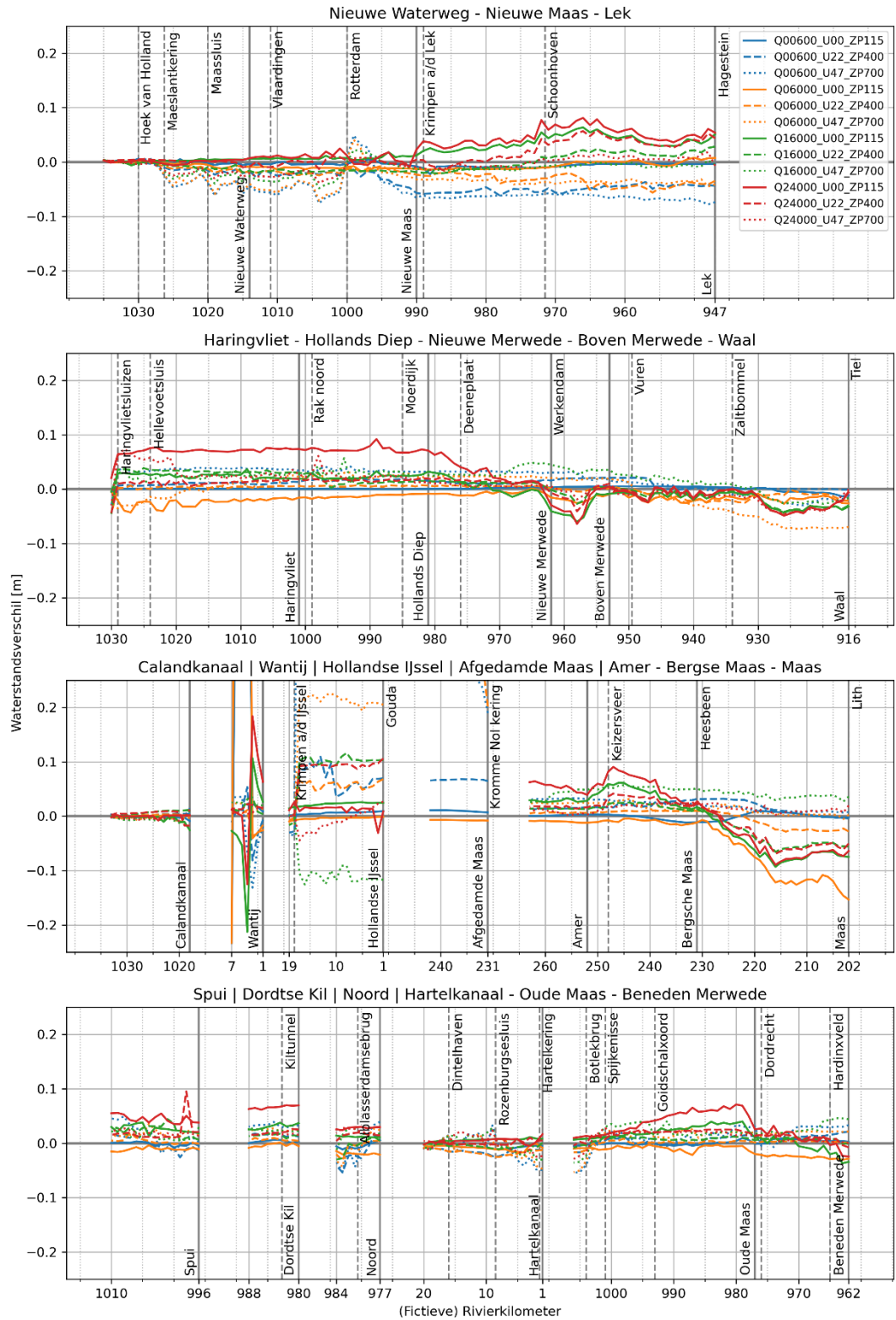
Tabel 6-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 6-1 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_waq_grid) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een ander rekenrooster.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_waq_grid
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

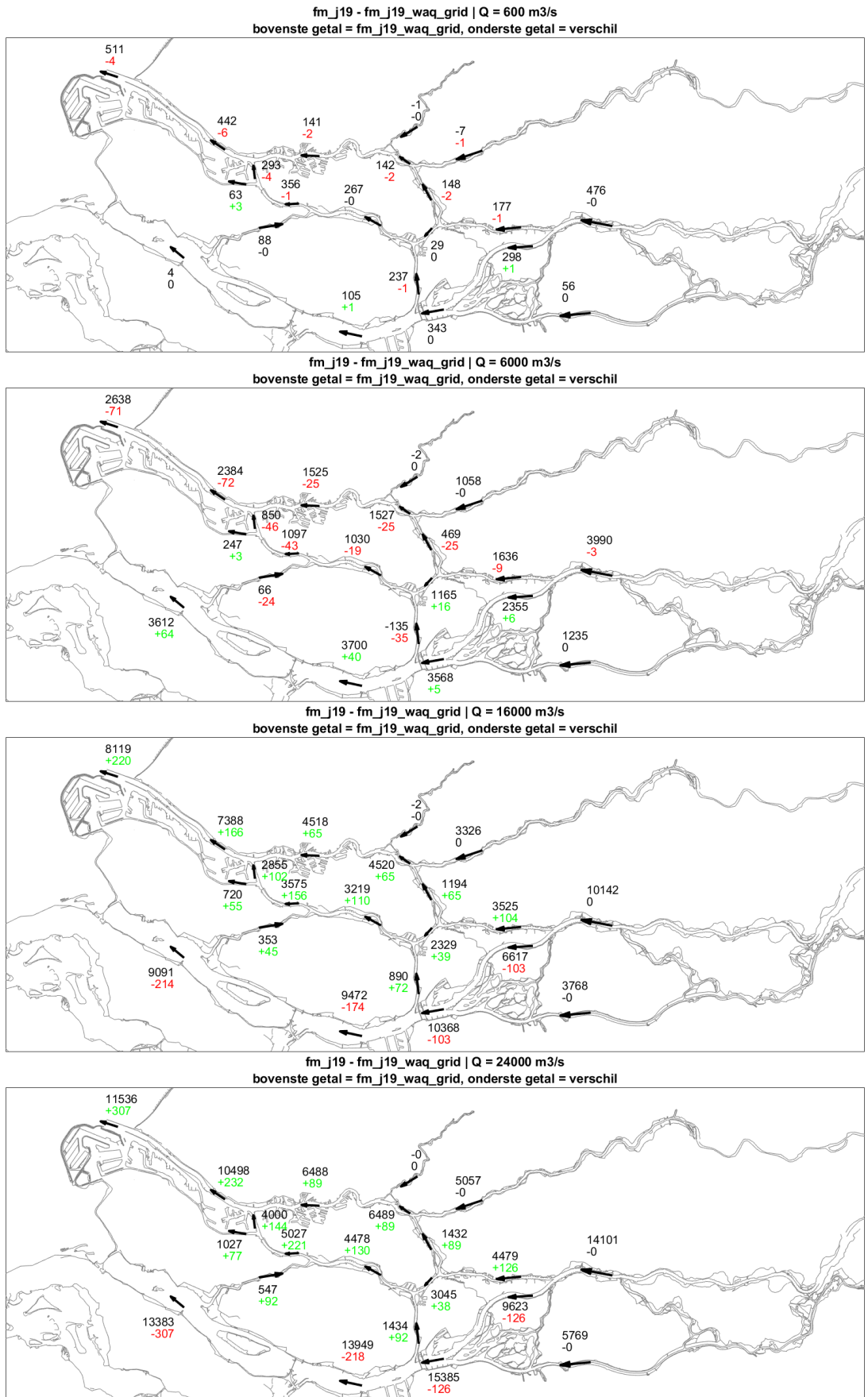
Figuur 6-1 presenteert het effect van het rekenrooster ([fm_j19] t.o.v. [fm_j19_waq_grid]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 6-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 6-1. Figuur 6-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 6-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een nieuw rekenrooster (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_grid) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 6-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een nieuw rekenrooster (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_grid) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.005	0.004	-0.022	0.005
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.034	0.018	-0.061	0.006
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.049	0.026	-0.078	0.049
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.006	-0.016	0.008
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.024	0.014	-0.056	0.002
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.032	0.018	-0.071	0.041
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.022	0.019	-0.006	0.064
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.015	-0.021	0.028
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.013	0.013	-0.048	0.022
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.027	0.025	-0.009	0.081
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.013	0.020	-0.016	0.059
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.006	0.013	-0.038	0.018
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.001	0.003	-0.014	0.005
	600	22 m/s, 4,0 m	0.010	0.007	-0.001	0.021
	600	47 m/s, 7,0 m	0.020	0.021	-0.030	0.042
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.017	0.008	-0.043	0.001
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.009	-0.025	0.007
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.004	0.033	-0.073	0.031
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.002	0.024	-0.060	0.037
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.007	0.022	-0.042	0.039
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.020	0.019	-0.027	0.057
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.028	0.044	-0.064	0.092
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.002	0.018	-0.048	0.021
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.007	0.026	-0.046	0.074
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.001	0.006	-0.012	0.009
	600	22 m/s, 4,0 m	0.017	0.011	-0.004	0.032
	600	47 m/s, 7,0 m	0.020	0.009	0.007	0.033
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.047	0.049	-0.153	-0.004
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.015	-0.029	0.010
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.014	0.009	-0.005	0.031
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.051	-0.093	0.062
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.009	0.032	-0.066	0.025
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.043	0.009	0.026	0.057
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.005	0.059	-0.089	0.091
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.036	-0.069	0.042
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.014	0.007	0.002	0.028



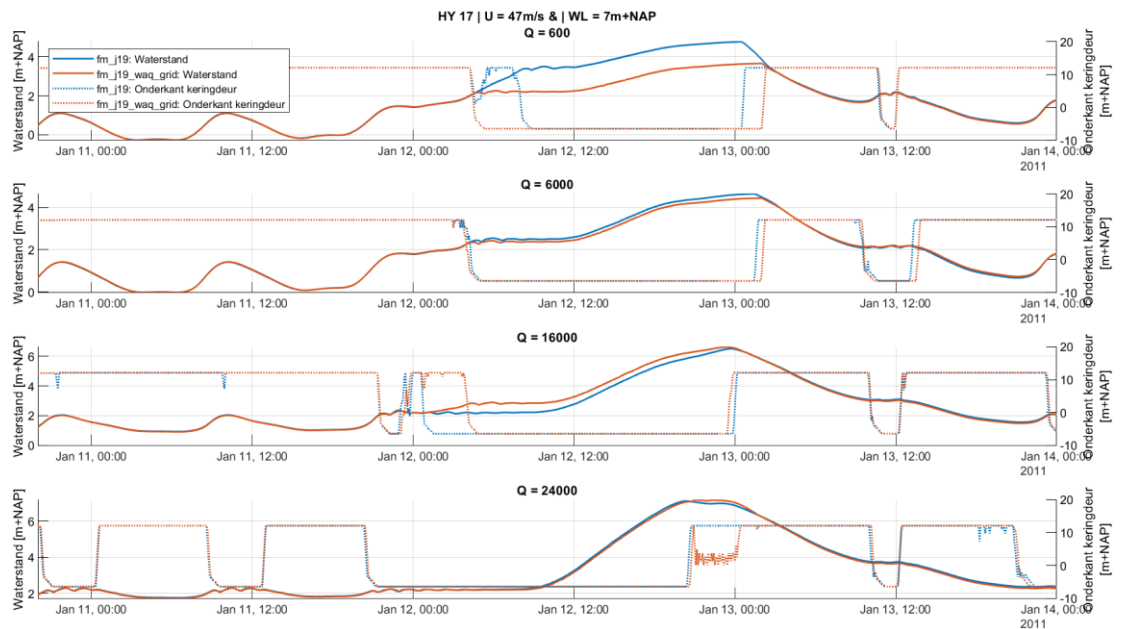
Figuur 6-2 Afvoerverdeeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van een nieuw rekenrooster (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_grid) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De verschillen zijn klein, de gemiddelde absolute bias in Tabel 6-2 is 1,5cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 2,0cm en een maximale uitschieter van -15cm bij Lith op de Maas. Bovenstreams op de Maas en Waal zijn voor de hogere afvoeren negatieve verschillen te zien. De negatieve verschillen ontstaan vooral bij de bochtige delen in de rivieren waar het WAQUA-rooster niet goed is uitgelijnd met het zomerbed en dus met de stroomrichting. In het ongestructureerde rooster van D-HYDRO is het zomerbed wel goed uitgelijnd. Hiervan is een voorbeeld weergegeven in paragraaf 2.3. Door de minder goede stroomlijning met het WAQUA-rooster ontstaat numerieke weerstand in het model, waardoor de waterstanden hoger worden.

Op de Lek zijn positieve verschillen te zien bij hoge afvoer en negatieve verschillen bij lage afvoer. Dit wordt deels veroorzaakt door een andere afvoerverdeling. In Figuur 6-2 is te zien dat voor de hogere afvoeren zonder wind en opzet meer afvoer vanaf de Waal richting de Lek stroomt. Vanaf Krimpen aan de Lek ontstaat daardoor een verhoging van de waterstand op de Lek.

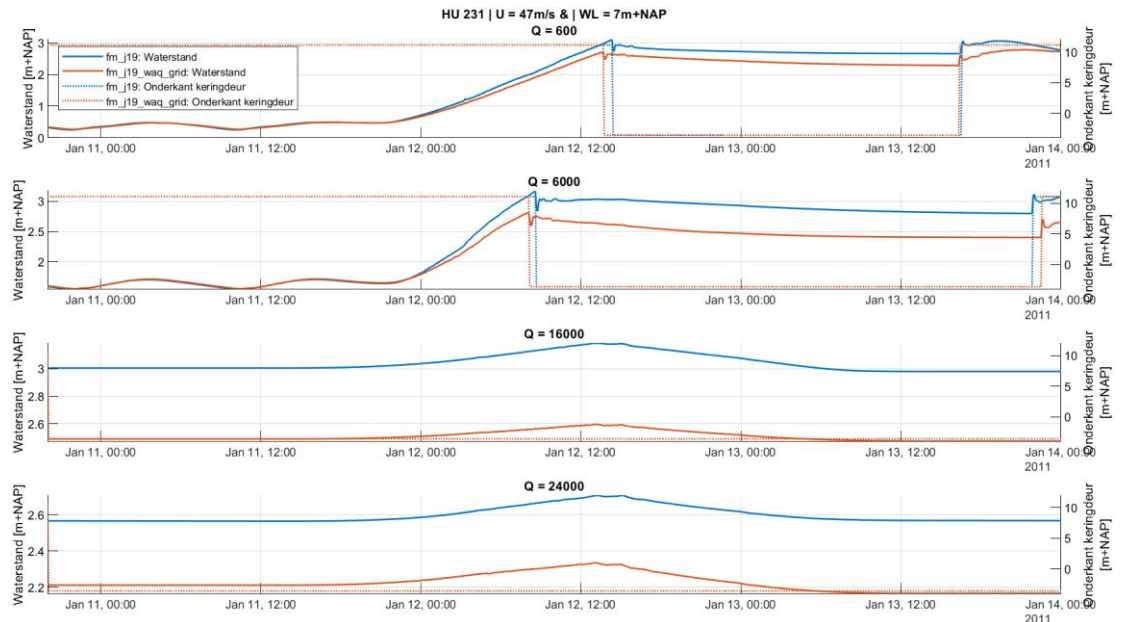
Verder zijn er relatief grote verschillen te zien op het Wantij, de Hollandsche IJssel en de Afgedamde Maas (uitschieters groter dan 25 cm). Het Wantij is een smalle watergang die in beide model roosters niet goed wordt gemodelleerd. In paragraaf 4.4 is dit verder beschreven.

De verschillen op de Hollandsche IJssel worden vooral merkbaar bij de sommen met hardere wind. In Figuur 6-3 is te zien dat de verschillen in waterstand op de Hollandsche IJssel vooral worden veroorzaakt door een verschil in moment van sluiten van de kering. Bij de som met lage afvoer ($Q=600\text{m}^3/\text{s}$) is bijvoorbeeld te zien dat de kering veel later sluit in het geval met D-HYDRO rooster (blauwe lijn) waardoor de maximale waterstand daar uiteindelijk meer dan een meter hoger is. De kering sluit onder anderen op basis van het waterstandsverhang tussen de binnen- en buitenkant. Tijdens het sluiten kan dit verhang schommelen rond nul, waardoor de sluiting van de kering onderbroken kan worden. Het sluitcriteria in het model is bij deze kering gevoelig voor deze schommelingen.



Figuur 6-3 Waterstandstijdseries op de locatie net bovenstreams van de Hollandsche IJsselkering (HY 17, doorgetrokken lijnen) en onderkant keringdeur van de Hollandsche IJsselkering (stippellijnen) met D-HYDRO rooster (blauwe lijnen) en WAQUA rooster (rode lijnen) voor de sommen met extreem harde wind en hoge zeewaterstanden.

Op de Afgedamde Maas zijn grote positieve verschillen te zien van meer dan 25 cm (die buiten de figuurassen vallen) waarbij de waterstand met het D-HYDRO rooster hoger ligt. Deze verschillen ontstaan als gevolg van een andere instroom vanuit de Maas bij Heesbeen. Het WAQUA-rooster is minder goed uitgelijnd bij de Kromme Nolkering waardoor het water minder makkelijk het Heusdensch Kanaal en de Afgedamde Maas in kan stromen. De Kromme Nolkering sluit vervolgens (niet precies op hetzelfde tijdstip) gedurende de snelle stijging van de waterstand op de Maas, waardoor de grote verschillen tijdens de waterstandspiek ook zo blijven. Dit is goed te zien in Figuur 6-4.



Figuur 6-4 Waterstandstijdsreeks op het Heusdensch Kanaal bij de Kromme Nolkering (HU 231, doorgetrokken lijnen) en onderkant keringdeur van de Kromme Nolkering (stippellijnen) met D-HYDRO rooster (blauwe lijnen) en WAQUA rooster (rode lijnen) voor de sommen met extreem harde wind en hoge zee­waterstanden.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de hoogste twee rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer via de noordrand (zowel via de Nieuwe Maas als via de Oude Maas) met het ongestructureerde rooster van D-HYDRO. Bij een rivierafvoer van 6.000 m³/s trekt er juist meer afvoer door het Hollandsch Diep en het Haringvliet in D-HYDRO.

Nadere interpretatie

Omdat in het ongestructureerde rooster de criteria voor een goed rooster (zoals uitlijning op geometrische onderdelen en gebruik van een meer uniforme resolutie) beter gevolgd kunnen worden, is het de verwachting dat de nieuwe resultaten het dichtst in de buurt van de werkelijkheid liggen. Het oude (gestructureerde) rooster gaf vermoedelijk een te hoge numerieke weerstand doordat de stroming in de bochten diagonaal op het rooster stond. Door kalibratie zal dit verschil deels gecorrigeerd zijn (een lagere ruwheid), maar zal de nieuwe modellering in D-HYDRO vermoedelijk een beter resultaat geven.

De roosters in de vijfde en zesde generatie zijn vergelijkbaar qua resolutie, dus verschillen worden vooral veroorzaakt door een andere uitlijning.

6.2 Rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken

Het effect van overlagen en kunstwerken speelt een belangrijke rol in de modelresultaten, maar bij een ander rekenrooster zullen deze ook anders worden geprojecteerd op dit rooster. Om het effect van een andere projectie van overlagen en kunstwerken buiten beschouwing te laten is daarom de vergelijking uit paragraaf 6.1 nogmaals uitgevoerd, maar dan zonder overlagen en kunstwerken.

Uitgangspunten

Om het effect van het rooster zonder overlagen en kunstwerken beter in beeld te brengen worden zowel in het referentiemodel als de variant uit paragraaf 6.1 de overlagen en kunstwerken verwijderd.

Tabel 6-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

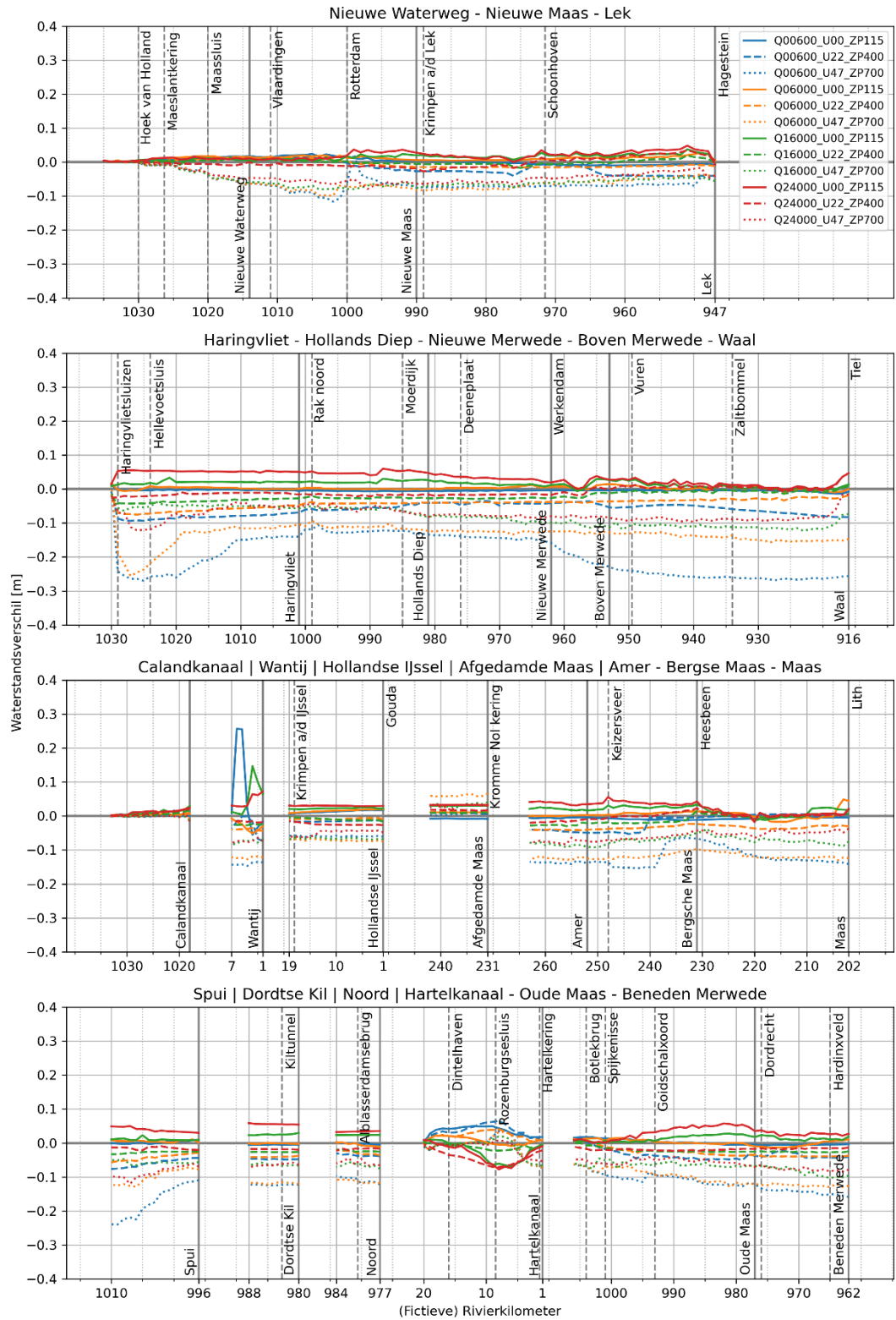
Tabel 6-3 Instellingen van variant (fm_j19_zo) en referentie (fm_j19_waq_grid_zo) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een ander rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken.

	variant	referentie
	fm_j19_zo	fm_j19_waq_grid_zo
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlatten	Geen	Geen
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	geen	geen
Ruwheid zomerbed	constant (WhiteColebrook 0,2)	constant (WhiteColebrook 0,2)
Structures	geen (alleen Volkerak)	geen (alleen Volkerak)
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur 6-5 presenteert het effect van het rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken ([fm_j19_zo] t.o.v. [fm_j19_waq_grid_zo]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 6-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 6-5. Figuur 6-6 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

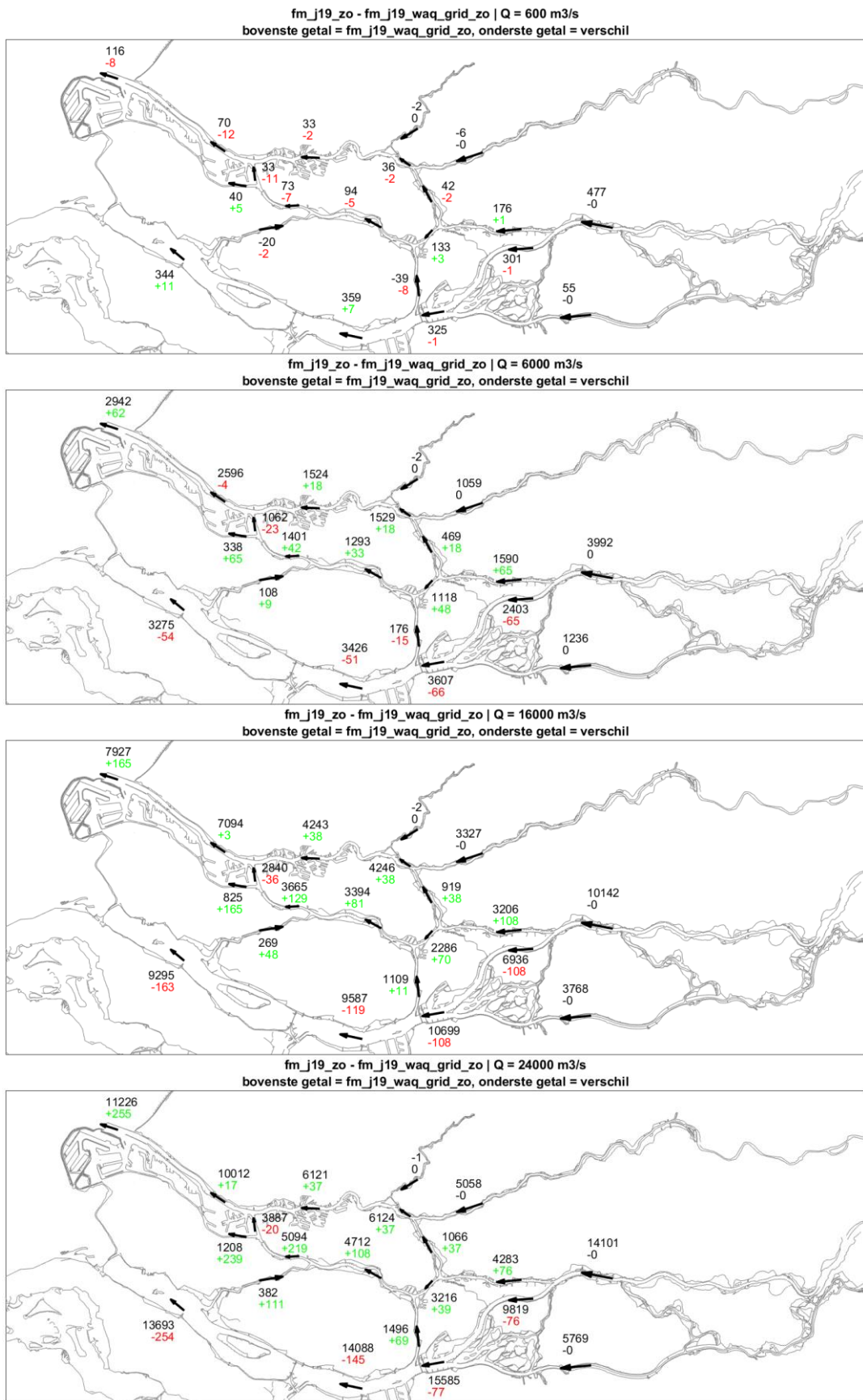
Rooster: zonder overlagen (fm_j19_zo - fm_j19_waq_grid_zo)



Figuur 6-5 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een nieuw rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken (fm_j19_zo t.o.v. fm_j19_waq_grid_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 6-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een nieuw rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken (fm_j19_zo t.o.v. fm_j19_waq_grid_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.003	0.010	-0.010	0.024
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.014	0.020	-0.042	0.017
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.061	0.026	-0.116	0.023
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.012	0.005	-0.001	0.027
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.011	-0.016	0.016
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.058	0.024	-0.100	0.002
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.014	0.008	-0.008	0.038
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.000	0.006	-0.018	0.019
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.056	0.020	-0.080	0.002
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.019	0.012	-0.008	0.048
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.014	-0.028	0.035
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.044	0.018	-0.079	0.002
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.005	0.002	-0.014	-0.002
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.061	0.017	-0.094	-0.035
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.197	0.058	-0.270	-0.106
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.002	0.005	-0.010	0.015
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.042	0.013	-0.075	-0.018
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.135	0.028	-0.256	-0.093
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.015	0.009	-0.007	0.033
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.022	0.012	-0.043	0.009
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.082	0.026	-0.123	-0.039
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.034	0.018	-0.003	0.060
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.008	0.012	-0.025	0.046
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.075	0.019	-0.122	-0.016
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.003	-0.012	-0.003
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.016	0.023	-0.053	0.006
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.121	0.027	-0.153	-0.064
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.004	0.012	-0.017	0.049
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.034	0.005	-0.042	-0.023
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.118	0.008	-0.130	-0.097
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.016	0.013	-0.014	0.034
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.010	0.013	-0.030	0.014
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.073	0.012	-0.093	-0.037
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.024	0.017	-0.014	0.056
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.010	-0.020	0.023
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.059	0.013	-0.084	-0.037



Figuur 6-6 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van een nieuw rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken (fm_j19_zo t.o.v. fm_j19_waq_grid_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De verschillen zonder overlagen en kunstwerken zijn in dezelfde orde grootte als in de vergelijking met overlagen en kunstwerken, de gemiddelde absolute bias in Tabel 6-4 is 4,0cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 1,5cm. Dit geldt niet voor de vergelijking met extreem harde wind en hoge zeewaterstand. Daar is het verschil duidelijk groter, met maximale verschillen tot -27cm op het Haringvliet en de Waal. Voor deze simulaties zijn in bijna de hele Rijn-Maasmonding negatieve verschillen te zien, waar het nieuwe rooster dus tot lagere waterstanden leidt dan het oude rooster.

Op de Hollandsche IJssel en de Afgedamde Maas zijn de verschillen klein zonder overlagen en kunstwerken. Dit bevestigt dat hier de keringen in combinatie met de verschillende roosters resulteren in de gevonden verschillen.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de hoogste drie rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer via de noordrand (zowel via de Nieuwe Maas als via de Oude Maas) met het ongestructureerde rooster van D-HYDRO.

Nadere interpretatie

Het rekenrooster kan eigenlijk niet los worden gezien van de projectie van andere elementen (zoals overlagen en kunstwerken) op dit rooster. Het rekenrooster is in de zesde generatie beter uitgelijnd met belangrijke stromingselementen, waaronder ook deze overlagen en kunstwerken. Daardoor worden deze ook 'realistischer' afgebeeld op het rooster en dit heeft een groot effect op de resultaten.

Voor de sommen met extreem harde wind en lage afvoer is direct vanaf de Haringvlietsluizen een groot negatief verschil te zien. Dit wordt veroorzaakt door de drempel van de Haringvlietsluizen, die bij deze sommen zonder kunstwerken nog wel in de bodem zit, maar op een andere manier. Het D-HYDRO-rooster is specifiek uitgelijnd op de Baseline-schematisatie terwijl het WAQUA-rooster dat niet is. Bij de Haringvlietsluizen resulteert dat in een drempel in de bodem die een vlakke kruin heeft in D-HYDRO en een scherpe kruin in WAQUA, zoals weergegeven in Figuur 6-7. Hierdoor is de stroming over de drempel significant anders. Vooral bij de sommen met lage afvoer en hoge zeewaterstand resulteert dit in grote verschillen doordat de stroomsnelheden daar het hoogst zijn.



Figuur 6-7 Drempelvorm in de bodem van de Haringvlietsluizen in het D-HYDRO rooster (links) en het WAQUA-rooster (rechts).

7 Verschilanalyse: Parameters en Modelconcepten

Bij de overgang naar de zesde-generatie modellen zijn er nieuwe keuzes gemaakt voor bepaalde parameters en modelconcepten. Daarom zijn de volgende analyses uitgevoerd, om de gevoeligheid op de modelresultaten te duiden van de belangrijkste veranderingen in parameters en modelconcepten. We gaan hierbij specifiek in op het effect door een andere keuze voor het meenemen van de horizontale viscositeit, een andere keuze voor de overlaatformulering en een andere keuze in de windschuifspanningscoëfficiënt (wind drag coëfficiënt).

7.1 Horizontale viscositeit

In de zesde-generatie modellen wordt gebruik gemaakt van de Smagorinsky formulering voor de horizontale viscositeit in plaats van een vaste waarde die in de vijfde-generatie modellen wordt gebruikt. Het effect van deze overstap wordt hier in beeld gebracht.

Uitgangspunten

De referentie (fm_j19_waq_visc) is het fm_j19-model waarin de horizontale viscositeit definitie is gewijzigd (zodanig dat hij overeenkomt met wat er in het vijfde-generatie WAQUA-model wordt gebruikt). De volgende parameters zijn aangepast:

- Uniforme horizontale eddy viscositeit = 1,0 m²/s (instelling in fm_j19: 0,1 m²/s)
- Smagorinsky-factor uitgeschakeld (= 0) (instelling in fm_j19: 0,2)

Voor de variant wordt het bestaande D-HYDRO-model (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d) gebruikt. Tabel 7-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

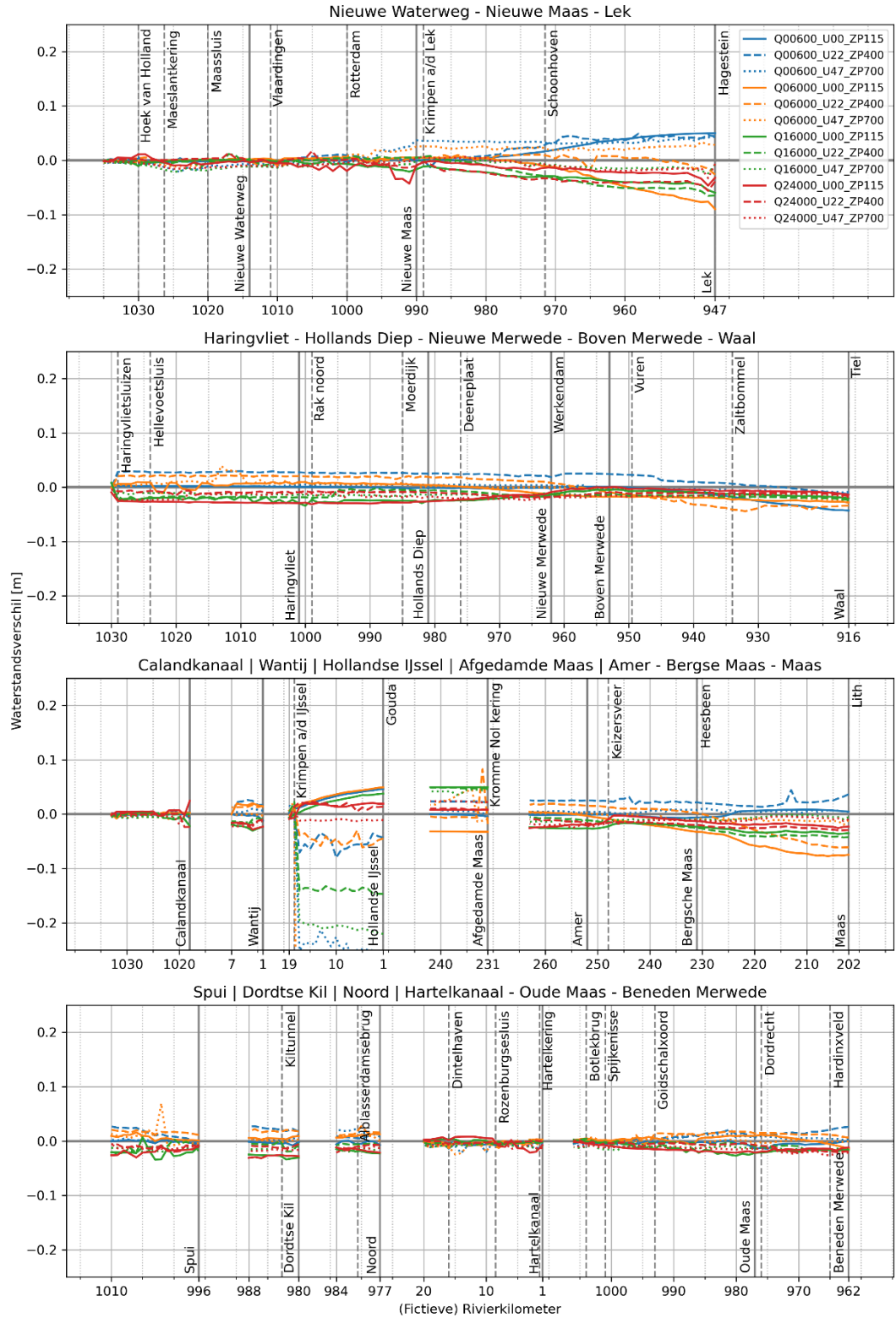
Tabel 7-1 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_waq_visc) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een andere horizontale viscositeit.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_waq_visc
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur 7-1 presenteert het effect van het gebruik van een andere instelling voor de horizontale viscositeit ([fm_j19] t.o.v. [fm_j19_waq_visc]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 7-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 7-1. Figuur 7-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverskil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

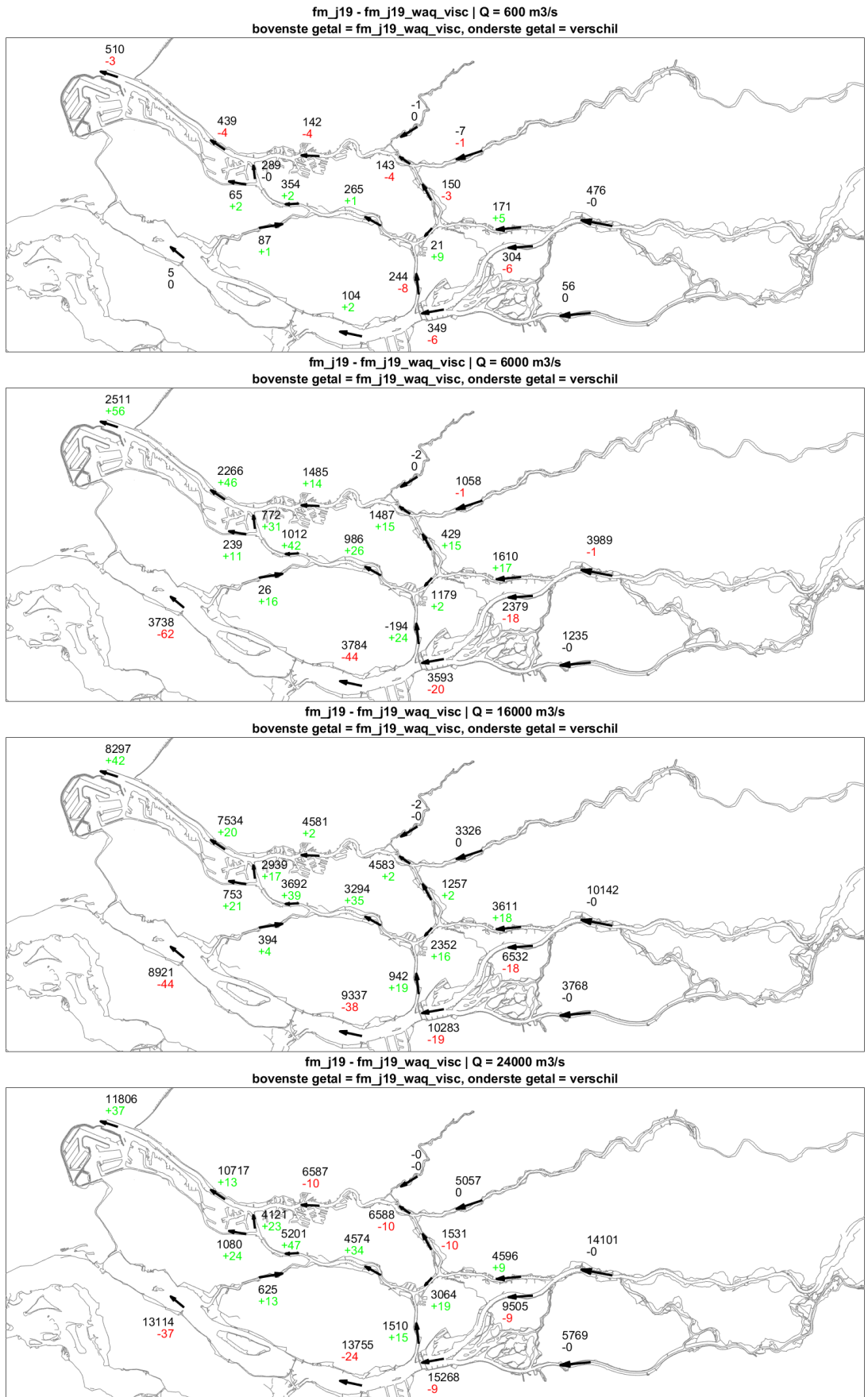
Parameters: Viscositeit (fm_j19 - fm_j19_waq_visc)



Figuur 7-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere horizontale viscositeit (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_visc) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 7-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere horizontale viscositeit (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_visc) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.012	0.018	-0.013	0.050
	600	22 m/s, 4,0 m	0.015	0.018	-0.003	0.049
	600	47 m/s, 7,0 m	0.016	0.021	-0.021	0.043
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.026	-0.090	0.007
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.002	0.007	-0.026	0.011
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.013	0.012	-0.012	0.033
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.019	0.016	-0.060	0.002
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.016	0.023	-0.065	0.011
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.010	0.006	-0.024	0.000
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.011	-0.047	0.011
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.017	0.019	-0.056	0.017
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.008	0.008	-0.033	0.006
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.006	0.012	-0.043	0.002
	600	22 m/s, 4,0 m	0.019	0.011	-0.013	0.030
	600	47 m/s, 7,0 m	0.000	0.005	-0.010	0.006
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.013	-0.028	0.010
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.001	0.024	-0.044	0.022
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.001	0.012	-0.026	0.039
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.018	0.007	-0.034	-0.004
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.015	0.005	-0.024	-0.001
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.015	0.003	-0.024	-0.009
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.017	0.011	-0.031	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.011	0.003	-0.020	-0.006
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.017	0.004	-0.025	-0.007
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.005	-0.007	0.008
	600	22 m/s, 4,0 m	0.023	0.005	0.013	0.044
	600	47 m/s, 7,0 m	0.005	0.002	0.001	0.010
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.034	0.028	-0.077	0.004
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.010	0.028	-0.062	0.019
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.007	0.006	-0.020	0.002
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.027	0.006	-0.036	-0.017
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.026	0.013	-0.043	-0.005
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.009	0.004	-0.014	-0.001
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.016	0.006	-0.026	-0.003
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.020	0.006	-0.030	-0.010
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.013	0.005	-0.026	-0.004



Figuur 7-2 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van andere horizontale viscositeit (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_visc) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Uit Figuur 7-1 en Tabel 7-2 blijkt dat een aanpassing in de viscositeitsberekening van een uniforme coëfficiënt naar Smagorinsky, de modelresultaten weinig beïnvloedt. De gemiddelde absolute bias in Tabel 7-2 is 1,3cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 1,1cm. Verschillen beperken zich meestal tot hooguit enkele cm, maar lopen op tot -9cm op de Lek. Wat opvalt, is dat op de Lek de hogere afvoeren duidelijk zorgen voor een negatief waterstandsverschil (waterstand hoger in fm_j19_waq_visc), terwijl de laagste afvoer zorgt voor een positief/positiever verschil. De afvoer van 6000 m³/s zonder wind en waterstandsopzet zorgt daarbij voor het grootste negatieve verschil. Op de Maas is dit effect ook in mindere mate te zien. Dit effect is volgens verwachting, omdat rond deze zomerbedvullende afvoer (6000 m³/s) de grootste verschillen in stroomsnelheid tussen zomer- en winterbed voorkomen en hier wordt dus ook het grootste effect verwacht.

Op de Hollandsche IJssel zijn grote verschillen te zien (groter dan 25cm), vooral voor de sommen met wind/opzet. Dit wordt veroorzaakt door een verschil in moment van sluiten van de kering. In paragraaf 6.1 is dit ook beschreven en is een voorbeeld weergegeven waar de verschillen als gevolg van de sluitingscriteria van de kering duidelijk te zien zijn.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de hoogste drie rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer via de noordrand (zowel via de Nieuwe Maas als via de Oude Maas) in de som met Smagorinsky viscositeit.

7.2 Overlaatformulering

In de zesde-generatie modellen wordt gebruik gemaakt van de Villemonte-formulering voor overlaten in plaats van de Tabellenboekmethode die in de vijfde-generatie modellen wordt gebruikt. Het effect van deze overstap wordt hier in beeld gebracht.

Uitgangspunten

De referentie (fm_j19_tab) is het fm_j19-model waarin het overlatenschema is omgezet van Villemonte (optie 9) naar Tabellenboek (optie 8). In paragraaf 2.4.2 staan de beide overlaatformuleringen beschreven.

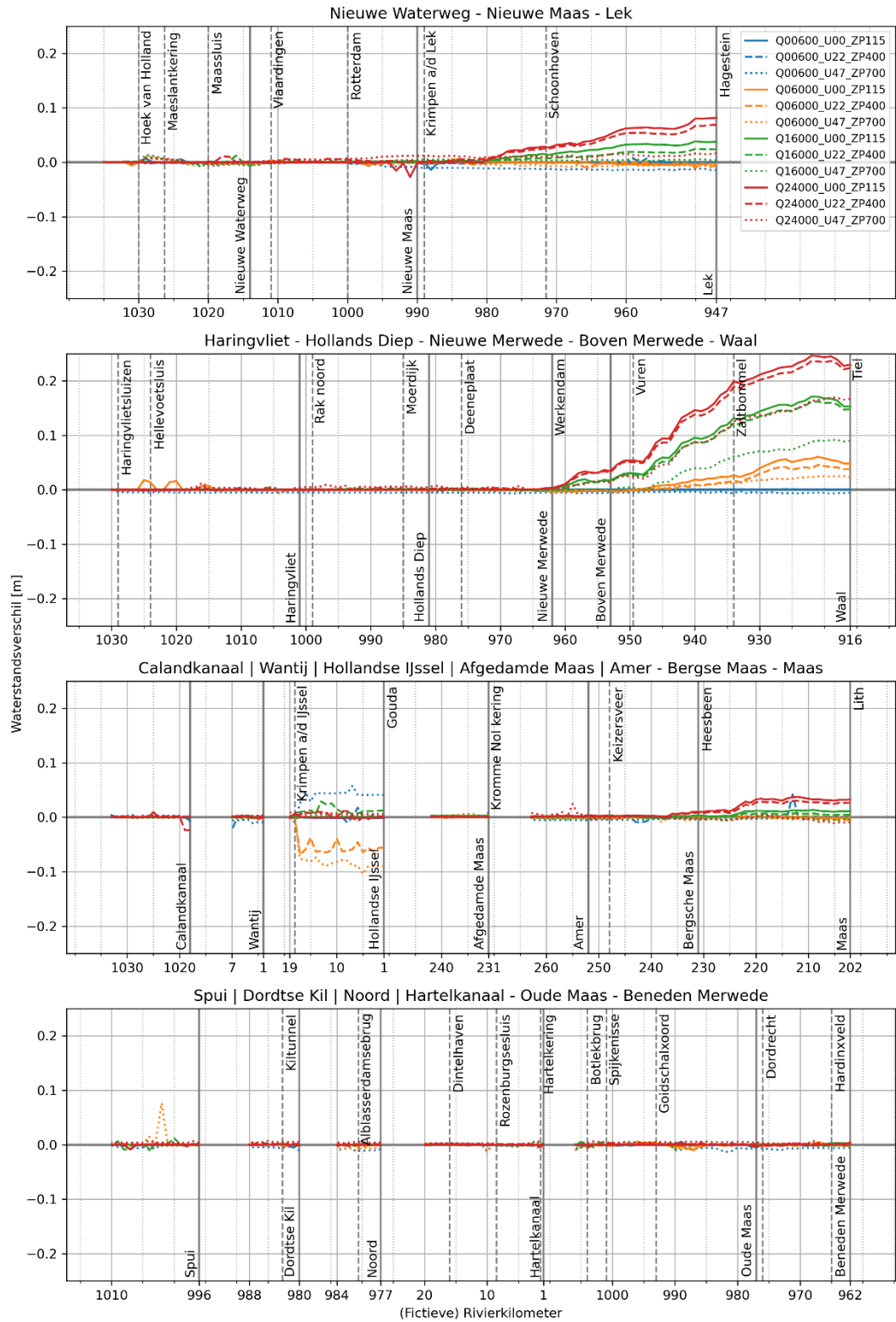
Voor de variant wordt het bestaande D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d) gebruikt. Tabel 7-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 7-3 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_tab) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een andere overlaatformulering.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_tab
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

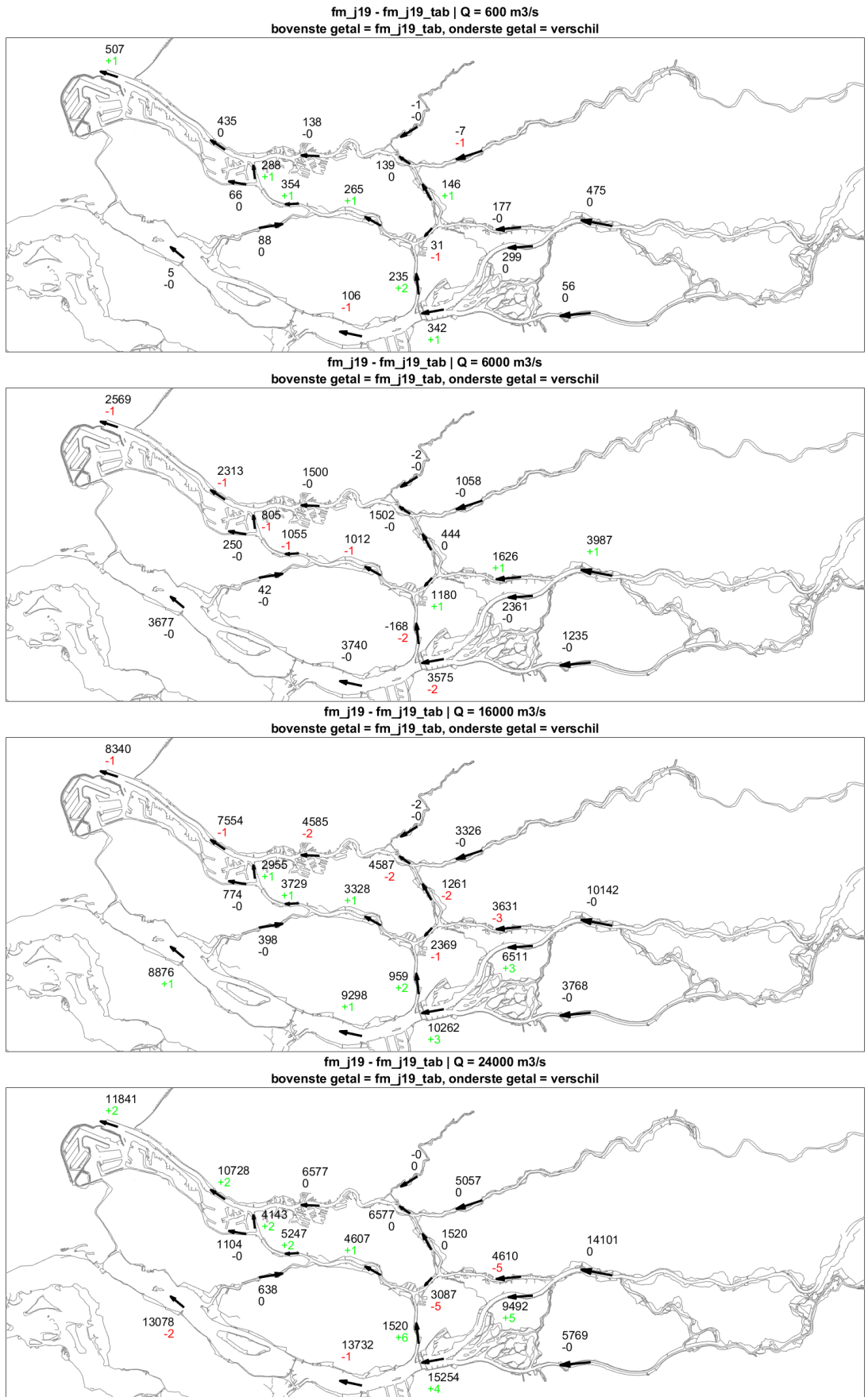
Figuur 7-3 presenteert het effect van het gebruik van een andere overlaatformulering ([fm_j19] t.o.v. [fm_j19_tab]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 7-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 7-3. Figuur 7-4 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 7-3 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een andere overlaatformulering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_tab) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 7-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een andere overlaatformulering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_tab) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.000	0.002	-0.014	0.007
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.002	-0.005	0.008
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.007	0.006	-0.015	0.014
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.001	0.002	-0.007	0.002
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.003	-0.010	0.005
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.003	0.004	-0.009	0.013
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.010	0.013	-0.000	0.039
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.006	0.008	-0.009	0.025
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.002	0.003	-0.005	0.010
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.018	0.027	-0.027	0.082
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.017	0.022	-0.001	0.069
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.008	0.005	-0.004	0.017
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.000	0.000	-0.001	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.000	0.001	-0.002	0.002
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.005	0.001	-0.007	-0.003
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.010	0.018	-0.003	0.061
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.007	0.014	-0.003	0.046
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.003	0.008	-0.007	0.025
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.038	0.059	-0.002	0.171
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.035	0.055	-0.002	0.162
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.017	0.030	-0.003	0.092
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.057	0.087	-0.001	0.246
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.055	0.083	-0.000	0.237
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.037	0.056	-0.002	0.169
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.000	0.000	-0.000	-0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.001	0.006	-0.009	0.042
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.004	0.001	-0.006	-0.002
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.000	0.001	-0.002	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.000	0.002	-0.005	0.002
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.000	0.003	-0.009	0.003
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.005	0.005	-0.002	0.013
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.003	0.002	0.000	0.008
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.002	0.002	-0.006	0.002
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.014	0.014	-0.001	0.037
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.012	0.011	0.001	0.030
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.001	0.005	-0.011	0.025



Figuur 7-4 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van een andere overlaatformulering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_tab) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Een andere overlaatformulering geeft over het algemeen kleine verschillen (maximale verschillen van enkele centimeters in het benedenstroomse deel). De gemiddelde absolute bias in Tabel 7-4 is 1,1cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 1,6cm en een maximale uitschieter van 25cm op de Waal. Bovenstrooms in de Rijn-Maasmonding ontstaan wat grotere verschillen, vooral op de Waal, met toenemende afvoer. Dit is te verklaren door het feit dat in deze gebieden, en met name in de Waal, de meeste overlaten in het stromende deel van de rivier dwars op de stroming staan (de kribben). Bij een hogere afvoer stroomt er meer water per strekkende meter over de overlaten, waardoor het effect van de formulering duidelijker wordt, en de verschillen dus groter worden. Over het algemeen zijn de waterstanden in fm_j19 hoger dan in fm_j19_tab. De verschillen op de riviertakken zijn van dezelfde orde grootte als de waarden die gevonden zijn in de verschilanalyse van de Rijntakken (Spruyt, 2024b) en de verschilanalyse van de Maas (Spruyt, 2024a).

Ook is te zien dat de wind en waterstandsopzet een tegengesteld effect hebben op de waterstandsverschillen. Bij hogere opzet is het waterstandsverschil kleiner (de waterstand in fm_j19 wordt relatief wat kleiner, vergeleken met fm_j19_tab). Dit is te verklaren door het feit dat de waterstanden in het domein hoger worden (door de opzet), maar het debiet per strekkende meter over de overlaten (nagenoeg) gelijk blijft. Hierdoor stroomt het minder hard over de overlaten, waardoor het effect gereduceerd is.

De effecten van de overlaatformulering op de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is zeer gering.

7.3 Windschuifspanningscoëfficiënt (wind drag coëfficiënt)

In de zesde-generatie modellen wordt voor de windschuifspanningscoëfficiënt gebruik gemaakt van de instellingen uit Van Vledder (2017) in plaats van de instellingen gebaseerd op Bak & Vlag (1997), die in de vijfde-generatie modellen wordt gebruikt. Het effect van deze overstap wordt hier in beeld gebracht.

Uitgangspunten

De referentie (fm_j19_wd) is het fm_j19-model waarin de instellingen uit Bak & Vlag (1997) worden toegepast. Met de instellingen uit Van Vledder (2017) wordt bij toenemende windsnelheid de windschuifspanningscoëfficiënt (C_d -coëfficiënt) eerder 'afgekapt' rond de 30 m/s. De paramaters zijn daarmee aangepast zoals weergegeven in Tabel 7-5.

Tabel 7-5 Instellingen uit Van Vledder (2017) en Bak & Vlag (1997) voor windschuifspanning.

	Cdbreakpoints [-]		Windspeedbreakpoints [m/s]	
Van Vledder (2017)	0,0014	0,00275	7,8	30,85
Bak & Vlag (1997)	0,0014	0,0039	7,8	50,0

Voor de variant wordt het bestaande D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d) gebruikt. Tabel 7-6 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

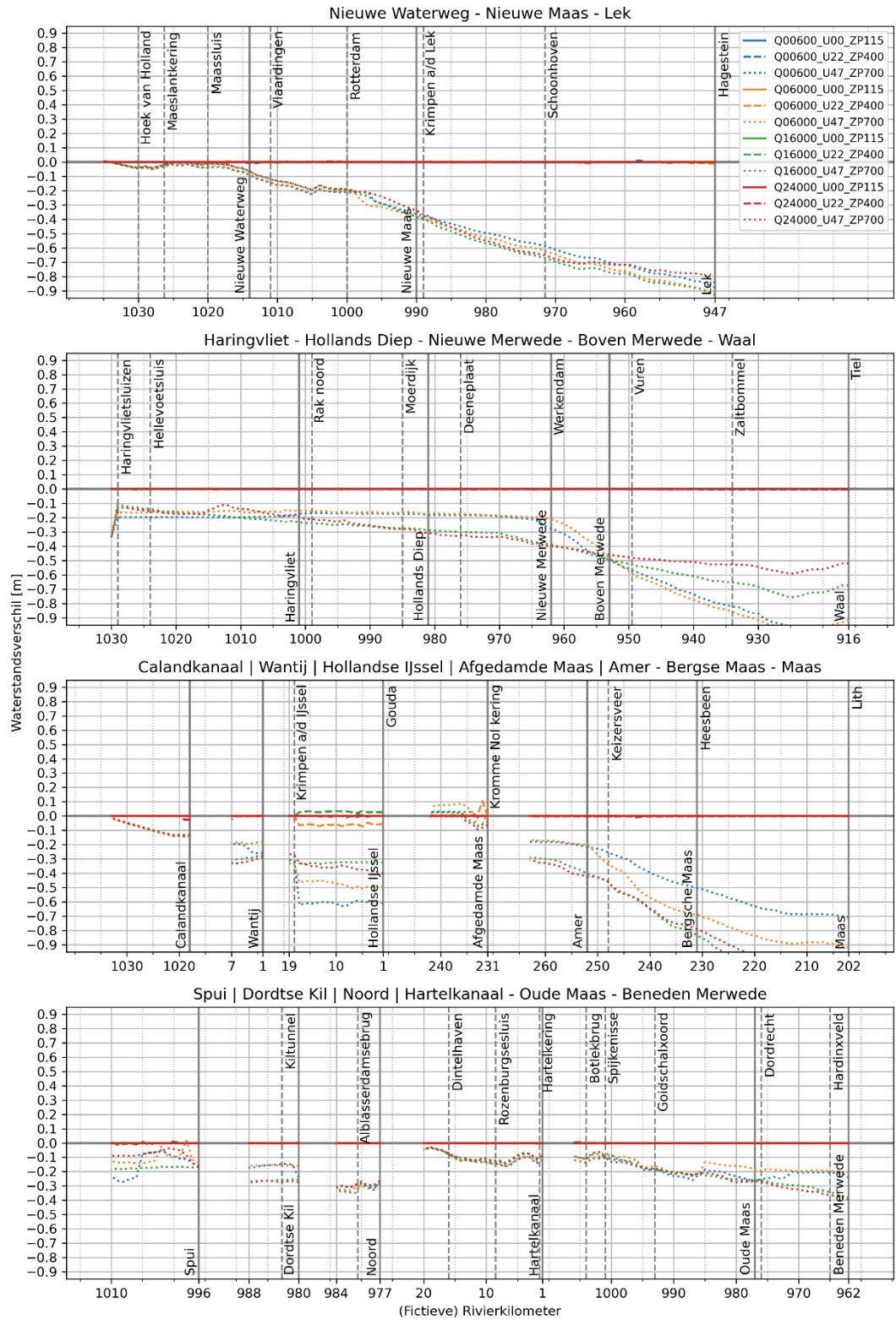
Tabel 7-6 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_wd) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een andere windschuifspanningscoëfficiënt.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_wd
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Bak & Vlag (1997)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur 7-5 presenteert het effect van het gebruik van een andere windschuifspanningscoëfficiënt ([fm_j19] t.o.v. [fm_j19_wd]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 7-7 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 7-5. Er zijn geen resultaten gepresenteerd voor de afvoerverdeling en het afvoerverskil over de splitsingspunten omdat er geen verschillen zijn voor de sommen zonder wind en opzet.

Parameters: Wind drag coefficient (fm_j19 - fm_j19_wd)



Figuur 7-5 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een andere windschuifspanningscoëfficiënt (fm_j19 t.o.v. fm_j19_wd) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 7-7 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een andere overlaatformulering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_wd) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.002	-0.004	0.012
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.391	0.275	-0.878	-0.013
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.003	-0.010	0.006
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.413	0.294	-0.926	-0.014
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.002	-0.011	0.003
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.418	0.312	-0.929	-0.001
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.001	-0.005	0.004
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.390	0.288	-0.843	-0.002
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.002	-0.005	0.001
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.409	0.301	-1.008	-0.166
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.000	0.001	-0.002	0.003
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.396	0.316	-0.991	-0.148
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.001	-0.006	0.003
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.389	0.198	-0.758	-0.108
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.001	-0.003	0.003
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.347	0.152	-0.593	-0.112
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.002	-0.011	0.003
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.460	0.193	-0.707	-0.179
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.001	0.000	-0.002	0.001
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.601	0.273	-0.920	-0.167
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.000	-0.003	-0.001
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.767	0.302	-1.138	-0.291
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.001	-0.003	-0.001
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.736	0.261	-1.070	-0.310

Voor de sommen met extreem harde wind zijn zeer grote verschillen te zien. De gemiddelde absolute bias in Tabel 7-7 is 15,9cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 8,8cm en een maximale uitschieter van -1,14m op de Maas. De verschillen nemen toe in bovenstroomse richting met de grootste verschillen op de Waal (-1,00m) en Maas (-1,14m). Deze verschillen zijn te verklaren door het verschil in windschuifspanningscoëfficiënt (C_d -coëfficiënt) die is toegepast in beide modellen. In fm_j19_wd is deze coëfficiënt maximaal 0,00275 bij een windsnelheid van 30,85 m/s of meer. In fm_j19 wordt de coëfficiënt pas afgetopt bij een windsnelheid van 50 m/s. Bij de sommen met extreem harde wind (49,80 m/s) wordt de coëfficiënt tot ongeveer 40% groter. De schuifspanning die de wind uitoefent op het wateroppervlak wordt daardoor met een gelijk percentage groter. Met een windrichting uit Westnoordwest (292,5°N) vindt in fm_j19 dus meer opstuwing plaats in bovenstroomse richting.

De positieve verschillen bij een afvoer van 16.000 m³/s en een windsnelheid van 22 m/s op de Hollandsche IJssel zijn het gevolg van de gevoeligheden van de sluitingscriteria, zoals beschreven in paragraaf 6.1. In de Afgedamde Maas ontstaat er een verhang ten gevolge van de wind op de afgesloten tak, die aan de ene kant een positief verschil geeft en aan de andere kant een negatief verschil.

Nadere interpretatie

Naast de effecten van de windschuifspanning is er ook gekeken naar twee andere windgerelateerde instellingen die in D-HYDRO mogelijk zijn. Deze effecten zijn bekeken in bijlage C.1 en C.2.

In bijlage C.1 is gekeken naar het effect van een gereduceerde windschuifspanning als gevolg van een gedeeltelijk droge flow link (parameter *windpartialdry*). De verschillen door deze reductie zijn zeer klein tot maximaal -3cm op de Maas. De gereduceerde windschuifspanning heeft dus weinig invloed op de resultaten.

In bijlage C.2 is gekeken naar Hu of Zws gebaseerde methode (parameter *windhuorzwsbased*). De instelling van deze parameter heeft significante effecten. Bij extreem harde wind wordt het maximale verschil bovenstrooms op de Maas gevonden (+23 cm). Bij de zachtere wind is dit +6 cm op de Lek. Er dient te worden opgemerkt dat deze instelling in deze de vijfde en zesde generatie gelijk is (beide op Hu gebaseerd). Het verder onderzoeken van de invloed van deze parameter is dus geen onderdeel van de verschilanalyse.

8 Verschilanalyse: Schematisatie

Dit hoofdstuk analyseert het effect van het gebruik van verschillende schematisaties binnen de zesde-generatie modellering. Er wordt daarbij expliciet gekeken naar de overstap van de vijfde- naar de zesde generatie met een vergelijkbare schematisatie, de actualisatie naar 2019 en de verschillen tussen de actuele en de beleidssituatie.

8.1 Effect overgang G5 naar G6 voor basisschematisatie 2013

Om het totale effect van de overstap naar de nieuwe generatie in beeld te brengen, wordt er een vergelijking gemaakt tussen de basisschematisatie van het D-HYDRO-model (dflowfm2d-rmm-j13_6v1a) en het meest nabijgelegen WAQUA-model (waqua-rmm-j12_5). Er is namelijk geen waq_j13-versie beschikbaar.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het WAQUA-model (waq_j12 = waqua-rmm-j12_5) als referentie gebruikt en het D-HYDRO-model (fm_j13 = dflowfm2d-rmm-j13_6v1a) als variant. Tabel 8-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-1 Instellingen van variant (fm_j13_6) en referentie (waq_j12_5) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de overstap van de vijfde naar de zesde generatie.

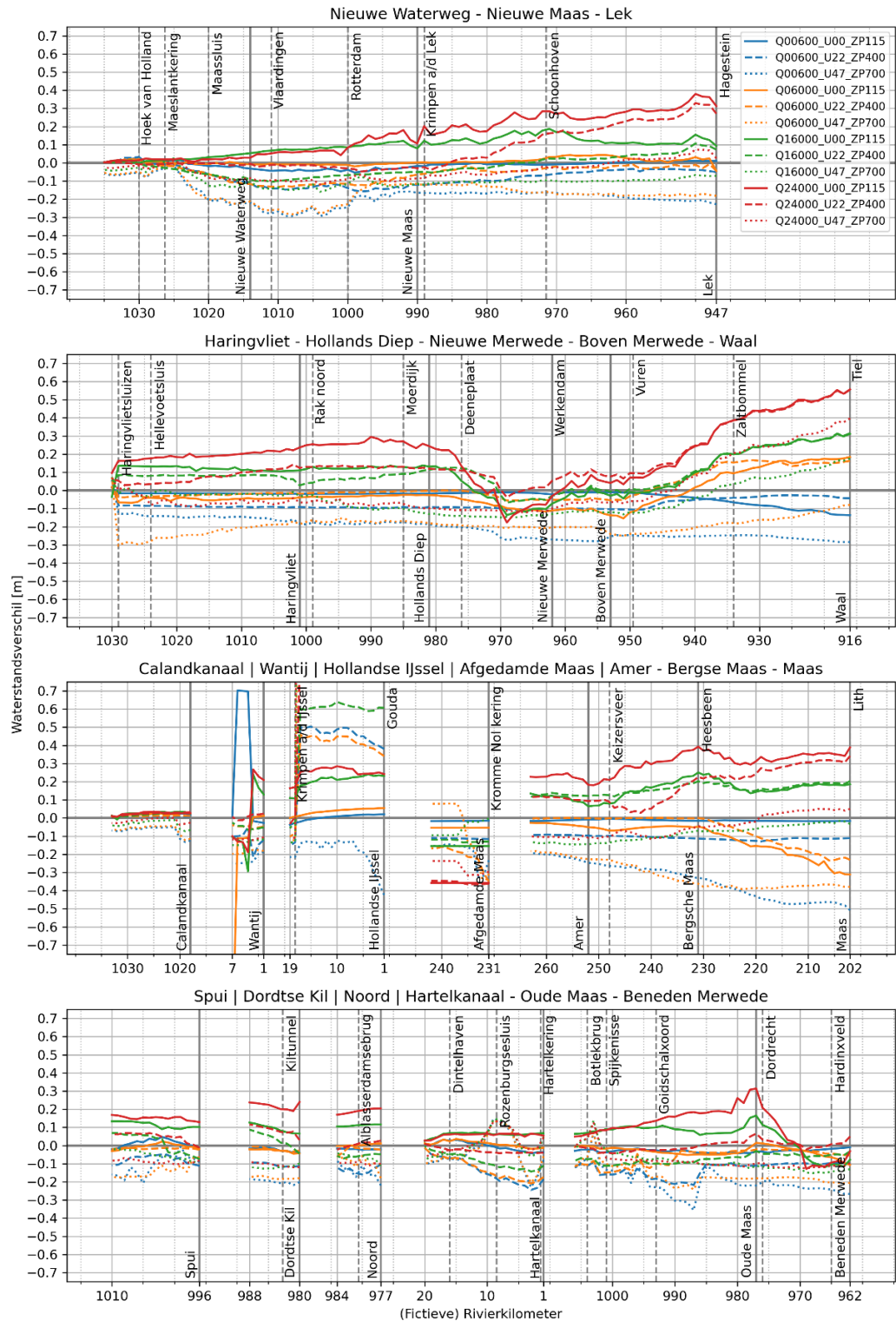
	variant	referentie
	fm_j13_6	waq_j12_5
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	flexibel (nieuw)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinsky	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j13_6	j12_5
Trachytopen	G6	G5
Ruwheid zomerbed	G6	G5
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur 8-1 presenteert het totaaleffect van de nieuwe generatie ([fm_j13_6] t.o.v. [waq_j12_5]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 8-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 8-1. Figuur 8-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

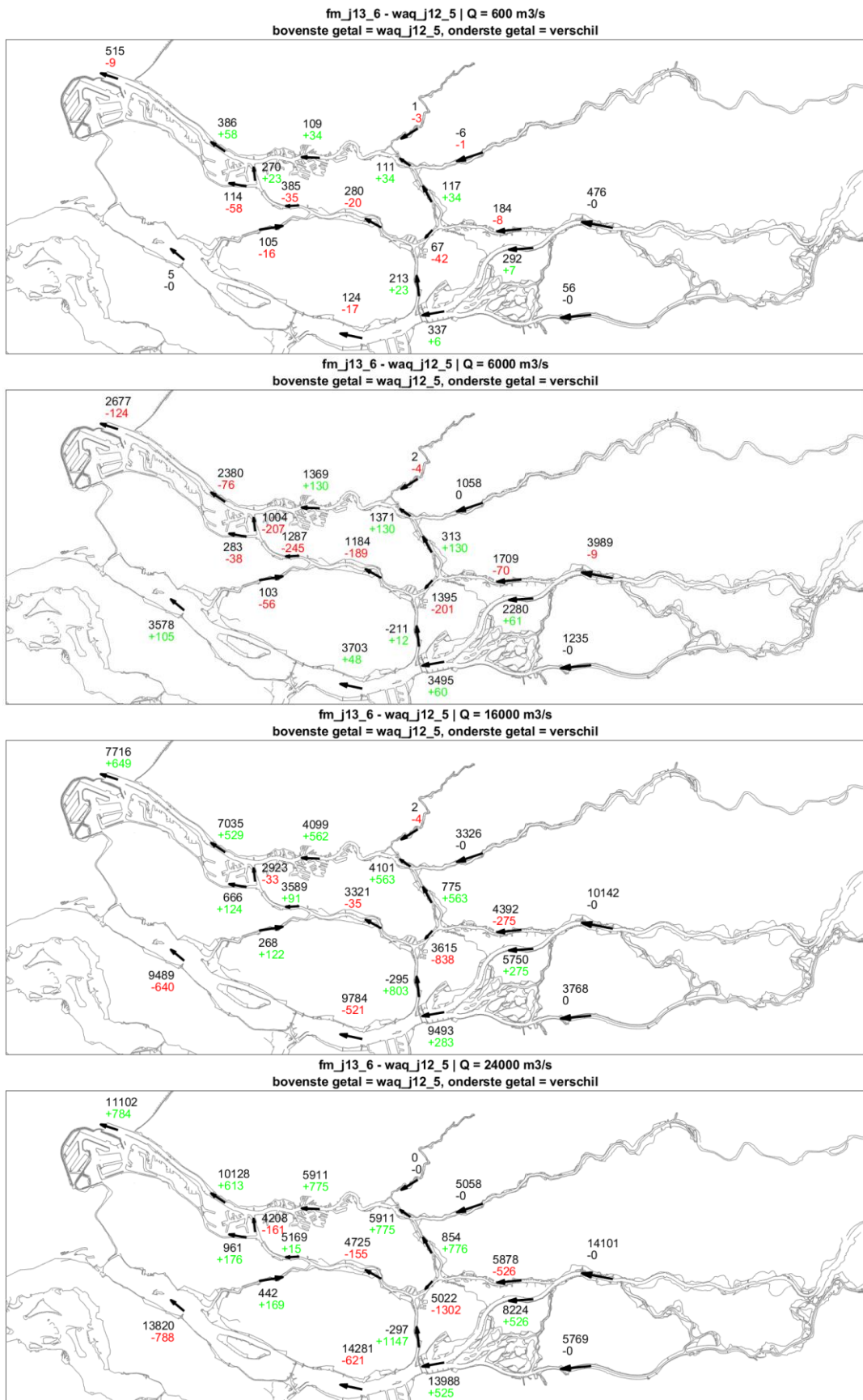
Schematisatie: Verbetering basis en effect overgang G5 - G6 (fm_j13_6 - waq_j12_5)



Figuur 8-1 Waterstandsverschillen in meters: totaal effect (fm_j13 t.o.v. waq_j12) ten gevolge van een combinatie van veranderingen tussen de vijfde en de zesde generatie voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 8-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters): totaal effect (fm_j13 t.o.v. waq_j12) ten gevolge van een combinatie van veranderingen tussen de vijfde en de zesde generatie voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.012	0.020	-0.053	0.033
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.080	0.049	-0.158	0.031
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.185	0.057	-0.293	-0.014
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.007	0.017	-0.045	0.043
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.057	0.044	-0.133	0.022
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.164	0.059	-0.284	0.004
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.095	0.046	-0.001	0.187
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.022	0.054	-0.105	0.107
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.100	0.032	-0.159	0.025
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.160	0.111	0.007	0.380
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.069	0.113	-0.048	0.329
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.045	0.048	-0.120	0.073
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.033	0.034	-0.136	-0.011
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.080	0.025	-0.114	-0.026
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.213	0.050	-0.284	-0.124
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.018	0.087	-0.154	0.184
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.017	0.073	-0.055	0.167
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.197	0.042	-0.306	-0.080
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.100	0.106	-0.136	0.312
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.093	0.091	-0.068	0.315
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.047	0.083	-0.149	0.176
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.208	0.162	-0.177	0.557
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.166	0.152	-0.038	0.555
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.002	0.143	-0.121	0.397
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.014	0.004	-0.018	-0.005
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.108	0.010	-0.129	-0.092
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.342	0.099	-0.508	-0.194
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.111	0.086	-0.312	-0.027
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.062	0.082	-0.234	0.001
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.315	0.074	-0.392	-0.183
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.157	0.046	0.064	0.251
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.159	0.027	0.117	0.203
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.087	0.043	-0.146	-0.016
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.300	0.058	0.180	0.393
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.181	0.095	0.028	0.341
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.046	0.060	-0.120	0.050



Figuur 8-2 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s): totaal effect (fm_j13 t.o.v. waq_j12) ten gevolge van combinatie van veranderingen tussen de vijfde en de zesde generatie voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

In Figuur 8-1 is te zien dat de verschillen relatief groot zijn. De gemiddelde absolute bias in Tabel 8-2 is 11,3cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 6,6cm en een maximale uitschieter van 56cm bij Tiel voor de som met hoge afvoer en geen wind. Dit is het gevolg van een combinatie van verschillen in software, rooster, viscositeit, overlaatformulering en schematisatie. Daardoor is het moeilijk om delen van het totale verschil toe te kennen aan de verscheidene onderdelen.

Ten eerste is een duidelijke afvoerafhankelijkheid te zien. Hogere afvoer resulteert over het algemeen in hogere waterstanden in D-HYDRO ten opzichte van WAQUA en bij lagere afvoer nemen de verschillen af of worden ze negatief. In bovenstroomse richting nemen de verschillen verder toe, vooral op de Waal.

Bij extreem harde wind en hoge zeewaterstand zijn er al verschillen van enkele centimeters te zien bij de zeerand van de Nieuwe Waterweg. Bij deze sommen zijn negatieve verschillen te zien in de Rijn-Maasmonding. Ter hoogte van de Maeslantkering neemt het verschil af waarna bovenstrooms de verschillen weer negatiever zijn. Deze bevindingen komen overeen met de verschillen zoals te zien bij de softwarevergelijking in paragraaf 5.1. Daarnaast zijn ook de grote verschillen op de Hollandsche IJssel te zien (groter dan 75cm), die ontstaan door het wel (zesde generatie) en niet (vijfde generatie) overstromen van de Hollandsche IJsselkering. Ook zorgt extreem harde wind voor hogere waterstanden in het WAQUA-model, net als te zien in de softwarevergelijking.

De verschillen worden voor het grootste gedeelte veroorzaakt door de software, zeker in het bovenstroomse gebied en bij de sommen met extreem harde wind. In grote lijnen komen de verschillen die in deze vergelijking te zien zijn overeen met de verschillen die te zien zijn in de softwarevergelijking in paragraaf 5.1. In het benedenstroomse gebied, op de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet worden ook de verschillen veroorzaakt door het rooster en schematisatie duidelijk zichtbaar, vooral voor de sommen zonder de extreem harde wind.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de Beneden Merwede en de Oude Maas bij alle rivierafvoeren minder afvoer trekken in j13. Bij de hoogste twee rivierafvoeren wordt dit gecompenseerd door meer afvoer naar de noordrand via het Spui, de Dordtsche Kil en de Noord, waardoor er toch meer afvoer via de noordrand wordt afgevoerd bij deze rivierafvoeren in j13. Bij deze afvoeren stroomt het bij de Dordtsche Kil in het WAQUA model tegen de richting van de pijl in en bij het D-HYDRO model niet. Dit zorgt voor de grote verschillen. De afvoeren zelf zijn niet erg extreem. Bij een rivierafvoer van 6.000 m³/s trekt er juist meer afvoer door het Hollandsch Diep en het Haringvliet in j13.

8.2 Actualisatie van 2013 naar 2019

Het effect van de actualisatie van de basisschematisatie (j13 = representatief voor de situatie in 2013) naar de actuele situatie (j19 = representatief voor de situatie in 2019) wordt hier in beeld gebracht. Voor de verschillen tussen deze schematisaties, zie paragraaf 2.5.

Uitgangspunten

Voor de referentie wordt het bestaande D-HYDRO-model (fm_j13_6 = dflowfm2d-rmm-j13_6v1a) gebruikt. Voor de variant wordt het bestaande actuele D-HYDRO-model (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d) gebruikt.

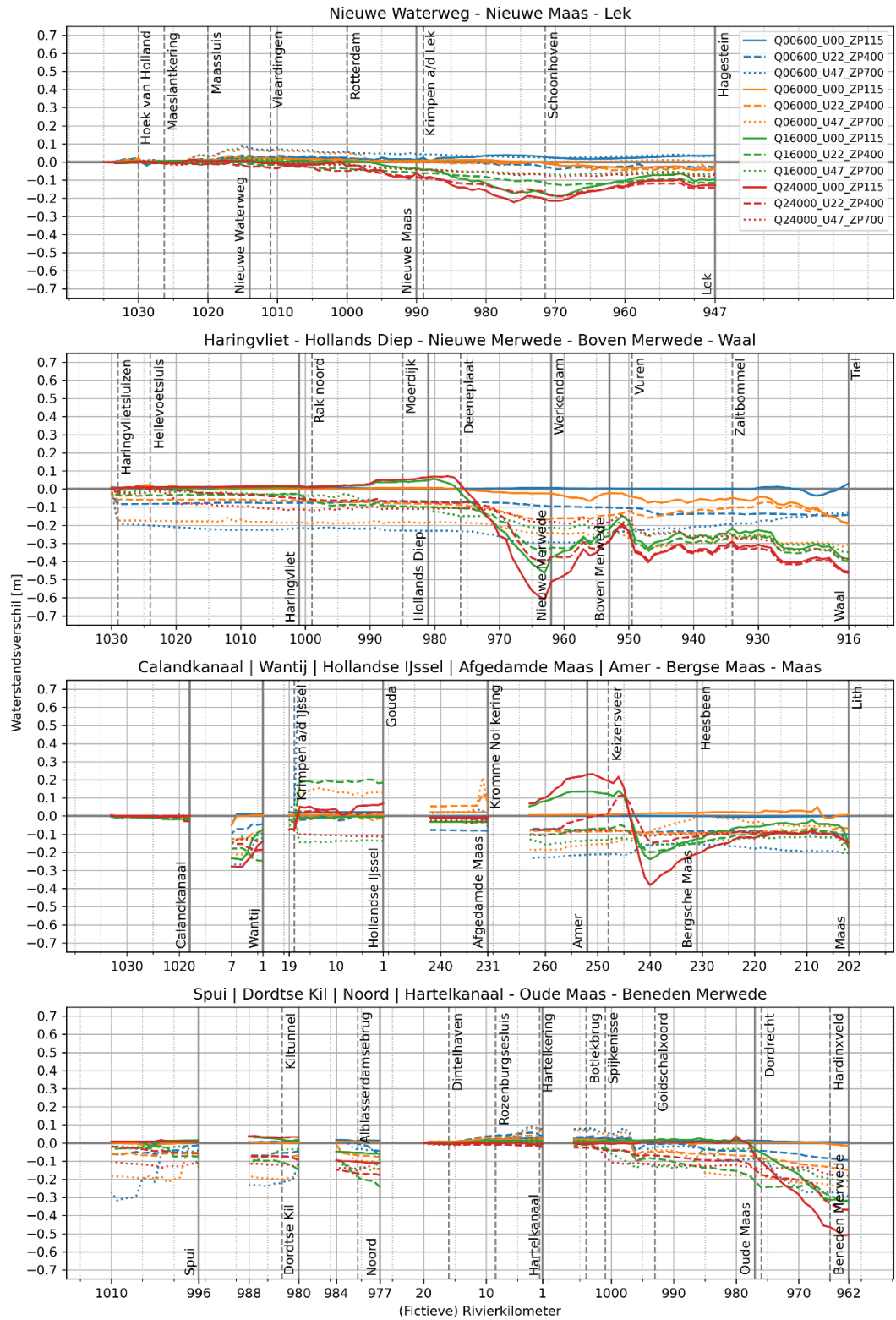
Tabel 8-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-3 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j13_6) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de actualisatie van de basisreferentie (2013) naar de actuele situatie (2019).

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j13_6
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j13_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

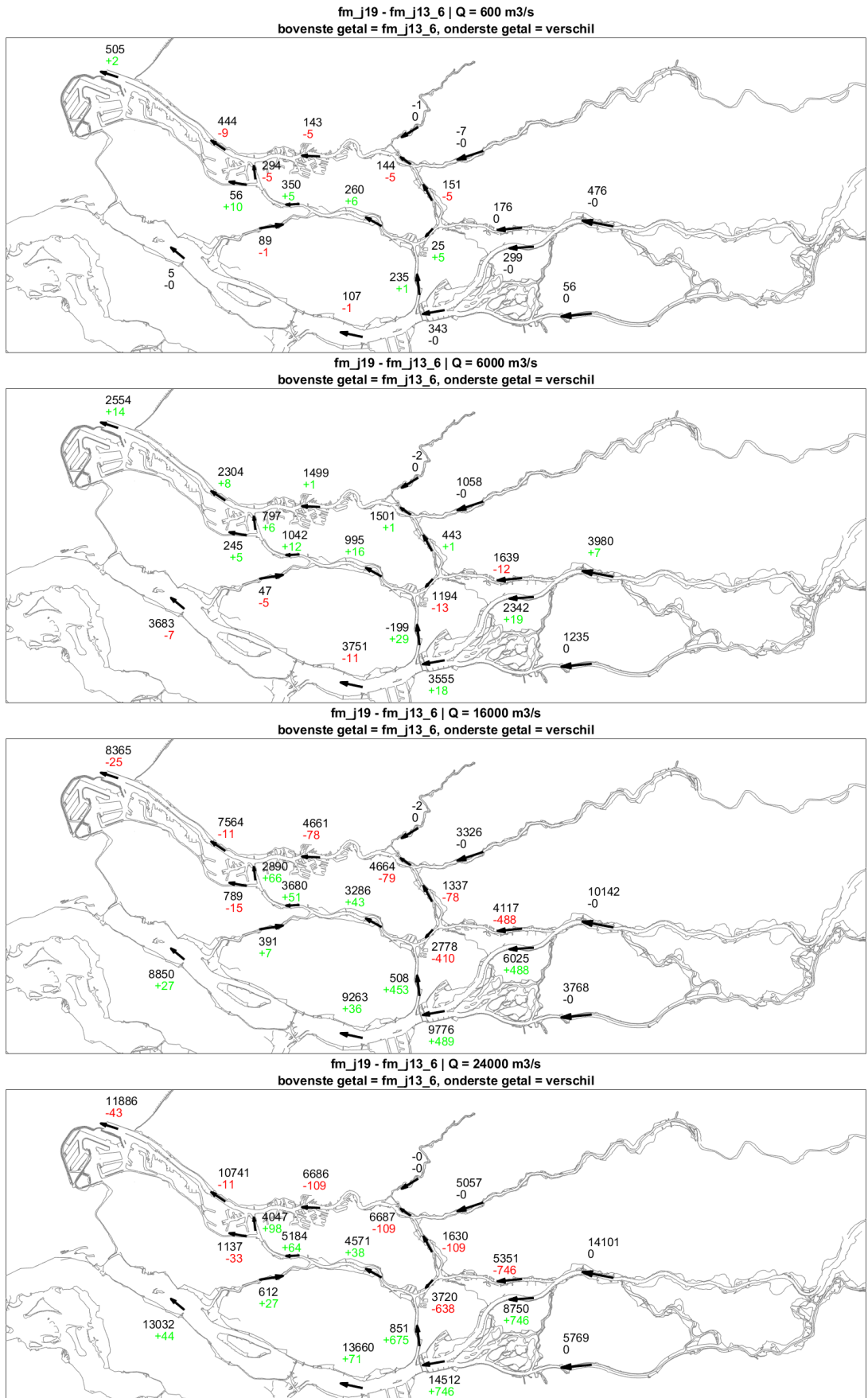
Figuur 8-3 presenteert het effect van de actualisatie vanaf de basisreferentie ([fm_j19] t.o.v. [fm_j13_6]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 8-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 8-3. Figuur 8-4 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 8-3 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van de actualisatie vanaf de nieuwe basisreferentie (fm_j19 t.o.v. fm_j13_6) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 8-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van de actualisatie vanaf de nieuwe basisreferentie (fm_j19 t.o.v. fm_j13_6) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.021	0.010	-0.014	0.038
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.000	0.023	-0.040	0.036
	600	47 m/s, 7,0 m	0.038	0.019	-0.006	0.088
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.002	0.018	-0.044	0.022
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.021	-0.048	0.032
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.017	0.025	-0.010	0.081
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.058	0.065	-0.189	0.010
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.062	0.043	-0.127	0.003
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.031	0.031	-0.070	0.027
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.083	0.075	-0.221	0.015
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.085	0.060	-0.189	-0.001
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.039	0.030	-0.081	0.011
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.003	0.007	-0.037	0.030
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.097	0.028	-0.147	-0.066
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.219	0.038	-0.297	-0.127
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.029	0.043	-0.193	0.023
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.100	0.038	-0.189	-0.057
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.226	0.051	-0.325	-0.158
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.135	0.157	-0.463	0.057
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.175	0.124	-0.400	-0.027
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.148	0.106	-0.349	-0.002
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.169	0.203	-0.610	0.071
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.188	0.157	-0.464	0.010
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.164	0.094	-0.389	-0.010
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.001	0.003	-0.006	0.003
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.085	0.008	-0.101	-0.069
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.189	0.025	-0.231	-0.152
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.014	0.010	-0.014	0.050
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.085	0.007	-0.093	-0.064
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.086	0.063	-0.187	0.007
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.030	0.109	-0.239	0.139
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.111	0.038	-0.200	-0.047
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.136	0.018	-0.210	-0.113
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.060	0.174	-0.381	0.232
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.074	0.059	-0.148	0.112
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.097	0.015	-0.172	-0.071



Figuur 8-4 Afvoerverdeeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van de actualisatie vanaf de nieuwe basisreferentie (fm_j19 t.o.v. fm_j13_6) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Over het algemeen zijn de verschillen negatief en is de waterstand in j19 dus lager dan in j13. Dit is vooral te zien bij de hogere afvoeren. De gemiddelde absolute bias in Tabel 8-4 is 8,5cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 5,5cm en een maximale uitschieter van -61 cm op de Nieuwe Merwede bij de hoge afvoer zonder wind en waterstandsopzet. De verlaging in waterstanden is het gevolg van extra berging en vooral extra stroomvoering in de nieuwe schematisatie, doordat in de tussen 2013 en 2019 rivierverruimende maatregelen zijn uitgevoerd (o.a. Ruimte voor de Rivier). Op de Nieuwe Merwede is een sterke waterstandsdeling te zien als gevolg van het feit dat de Noorwaard in j19 is opgenomen (in 2013 was deze nog niet volledig aangelegd, dus nog niet meegenomen in de schematisatie). Hetzelfde effect is in mindere mate te zien op de Bergsche Maas als gevolg van de Overdiepse polder. Ook op de Lek zijn verschillen tot maximaal circa -20cm te zien voor de hogere afvoeren door kleine maatregelen die daar in j19 zijn opgenomen.

Bij de Haringvlietsluizen is voor de sommen met lage afvoer en extreem harde wind ook een verlaging van de waterstand te zien. Dit is vermoedelijk het gevolg van de extra berging in het bovenstroomse gebied. Het water in het Haringvliet wordt bij de sommen met extreem harde wind in bovenstroomse richting geblazen. Daar kan door de grotere bergingscapaciteit meer water naartoe stromen, waardoor de waterstand in het Haringvliet lager wordt. Bij de sommen met hoge afvoer zijn deze extra bergingsgebieden al voor een groot deel gevuld voordat de verhoogde zeewaterstand en wind optreedt. Daardoor zijn bij die sommen minder grote verschillen te zien op het Haringvliet.

Alleen in de Amer en Bergsche Maas is een duidelijk hogere waterstand (tot +25cm) te zien bij de nieuwe schematisatie voor de sommen met hogere afvoer zonder wind en waterstandsopzet. Dit kan veroorzaakt worden doordat er meer water vanaf de Waal door de Nieuwe Merwede en de Biesbosch richting het Hollands Diep stroomt, zoals te zien in Figuur 8-4.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat het effect van de overgang van j13 naar j19 gering is voor de verdeling over de afvoer tussen de Maasmond en het Haringvliet. Echter is wel de verdeling over de Beneden Merwede en de Nieuwe Merwede significant anders, met meer water via de Nieuwe Merwede in j19. Dit overschot stroomt voornamelijk via de Dordtsche Kil weer terug richting de Oude Maas, waardoor de balans tussen Noord en Zuid weer redelijk hersteld wordt.

8.3 Totaal effect actueel naar beleid (beno)

Het is wenselijk om in beeld te brengen wat het verschil in resultaten is tussen de actuele en beleidssituatie. Er wordt daarom een verschilanalyse gedaan tussen het nieuwe zesde-generatie beno-model (dflowfm2d-rmm-beno19_6) en het actuele model (dflowfm2d-rmm-j19_6). Voor de verschillen tussen deze schematisaties, zie paragraaf 2.5.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het nieuwe actuele D-HYDRO-model (fm_j19 = dflowfm2d-rmm-j19_6) als referentie gebruikt en het meest recente beleidsmodel ten tijde van het schrijven van dit rapport (fm_beno19 = dflowfm2d-rmm-beno19_6) als variant.

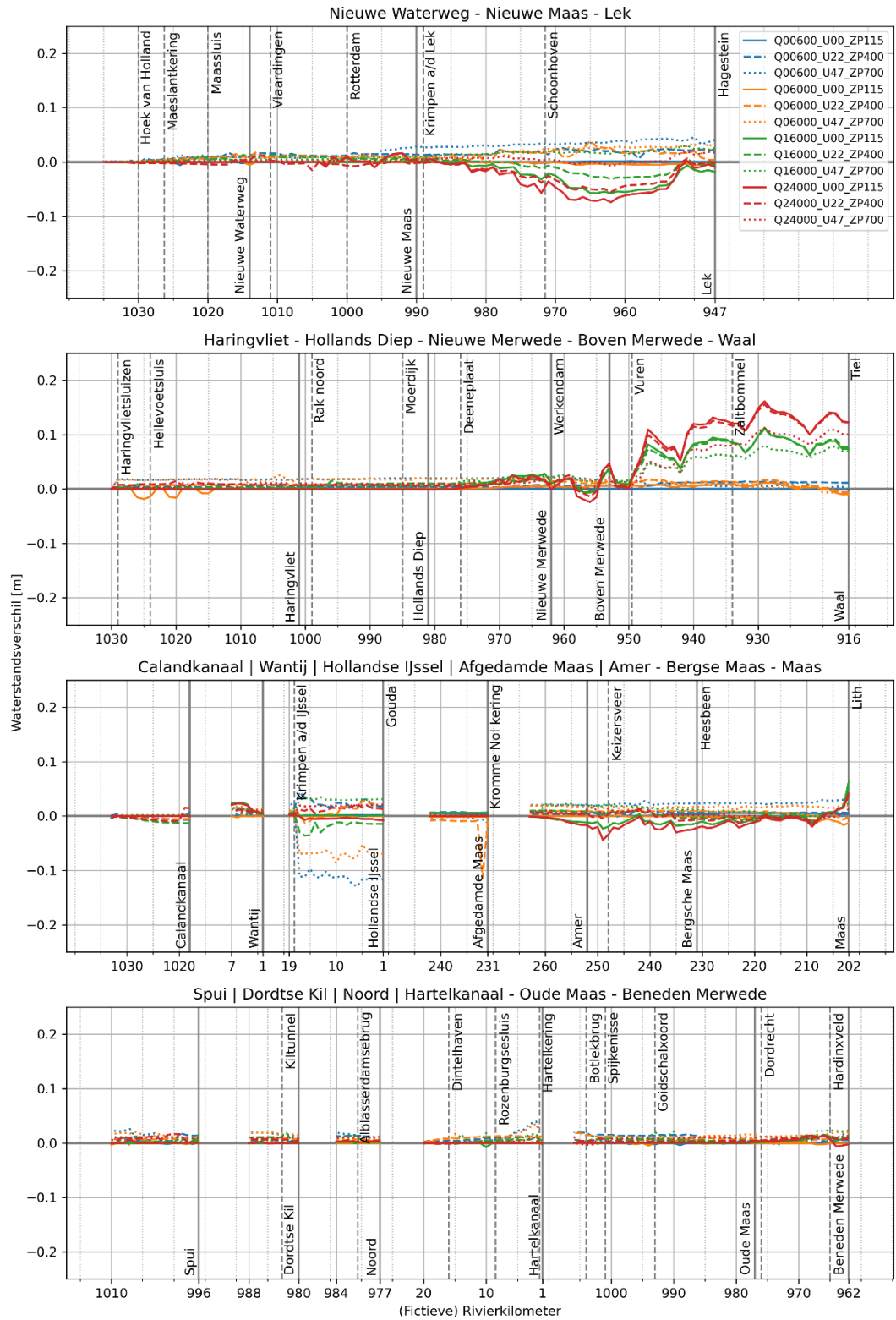
Tabel 8-5 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-5 Instellingen van variant (fm_beno19) en referentie (fm_j19) voor het bepalen van het verschil tussen de actuele en beleidssituatie.

	variant	referentie
	fm_beno19	fm_j19
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	beno19	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

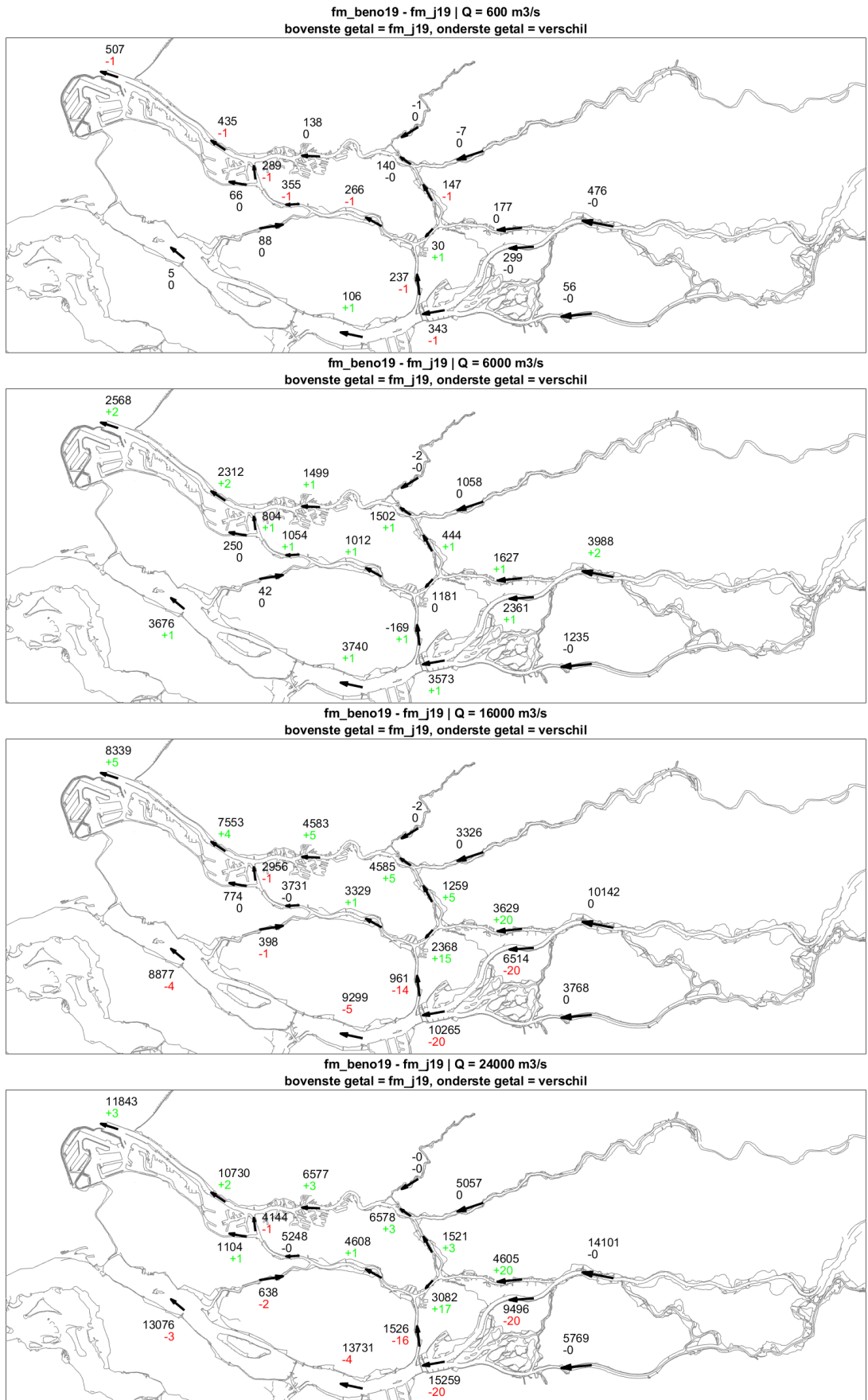
Figuur 8-5 presenteert het verschil tussen de beleidssituatie [fm_beno19] en de actuele situatie [fm_j19]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 8-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 8-5. Figuur 8-6 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 8-5 Waterstandsverschillen in meters tussen beleidssituatie en actueel (fm_beno19 t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 8-6 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) tussen beleidssituatie en actueel (fm_beno19 t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.002	-0.006	0.014
	600	22 m/s, 4,0 m	0.015	0.006	-0.002	0.026
	600	47 m/s, 7,0 m	0.022	0.014	0.000	0.046
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.001	0.002	-0.009	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.012	0.007	-0.002	0.039
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.014	0.009	0.000	0.035
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.020	-0.057	0.002
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.013	-0.031	0.014
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.011	0.007	0.000	0.030
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.017	0.026	-0.074	0.016
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.013	0.018	-0.055	0.013
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.003	0.005	-0.007	0.019
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	-0.002	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.007	0.003	0.002	0.014
	600	47 m/s, 7,0 m	0.015	0.006	0.000	0.023
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.002	0.005	-0.018	0.011
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.010	0.004	-0.007	0.019
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.014	0.007	-0.007	0.025
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.027	0.036	-0.006	0.113
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.029	0.034	-0.002	0.111
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.023	0.026	-0.002	0.080
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.037	0.054	-0.024	0.162
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.039	0.050	-0.014	0.156
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.029	0.035	-0.002	0.111
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.003	0.002	-0.000	0.006
	600	22 m/s, 4,0 m	0.006	0.003	-0.004	0.016
	600	47 m/s, 7,0 m	0.023	0.003	0.018	0.033
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.002	0.004	-0.016	0.001
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.007	0.003	-0.006	0.010
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.017	0.002	0.011	0.022
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.006	0.012	-0.023	0.062
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.004	0.008	-0.011	0.050
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.012	0.006	-0.002	0.023
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.012	0.013	-0.044	0.041
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.001	0.008	-0.016	0.038
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.003	0.006	-0.010	0.016



Figuur 8-6 Afvoerverdeeling en verschillen (in m³/s) tussen beleidssituatie en actueel (fm_beno19 t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

In deze vergelijking zijn over het algemeen kleine verschillen te zien. De gemiddelde absolute bias in Tabel 8-6 is 1,3cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 1,3cm en een maximale uitschieter van +16cm op de Waal voor de hogere afvoeren. Op de Waal ontstaat een hogere waterstand voor de beleidssituatie (beno19) ten opzichte van het actuele model (j19) bij de hogere afvoeren. In de Lek is juist een verlaging van de waterstand tot maximaal -8cm te zien als gevolg van de beleidssituatie.

De verschillen worden veroorzaakt door een combinatie van de vegetatielegger en de vergunningen. Dit komt overeen met de verschillen die in de verschilanalyse van de Rijntakken te zien zijn (Spruyt, 2024b). Daaruit blijkt dat de positieve verschillen, die op de Waal duidelijk te zien zijn, grotendeels door de vegetatielegger 2020 worden veroorzaakt. De verschillen zijn pas te zien voor de hogere afvoeren, omdat dan pas het winterbed mee gaat stromen.

De effecten van de overgang van actueel naar beleid op de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is zeer gering.

9 Verschilanalyse: modelrandvoorwaarden

Dit hoofdstuk analyseert het effect van het gebruik van verschillende modelrandvoorwaarden tussen de vijfde- en zesde-generatie modellering. Het gaat hier om het gecombineerde effect van het gebruik van een andere bovenstroomse afvoer, andere laterale toestromingen, andere zeewaterstandsopzet en bijbehorende windsnelheid. Er wordt daarbij expliciet gekeken naar de modelrandvoorwaarden die voor WBI2017 en BOI2023 worden toegepast. Binnen deze verschilanalyse wordt alleen gekeken naar de totale waterstandseffecten bij een gegeven afvoerniveau en zeewaterstand en windconditie, dus zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI.

9.1 Modelrandvoorwaarden BOI

Het effect van het gebruik van andere modelrandvoorwaarden tussen de toepassing binnen WBI2017 en BOI2023 wordt hier in beeld gebracht. Voor de verschillen tussen deze modelrandvoorwaarden zie paragraaf 3.2.

Uitgangspunten

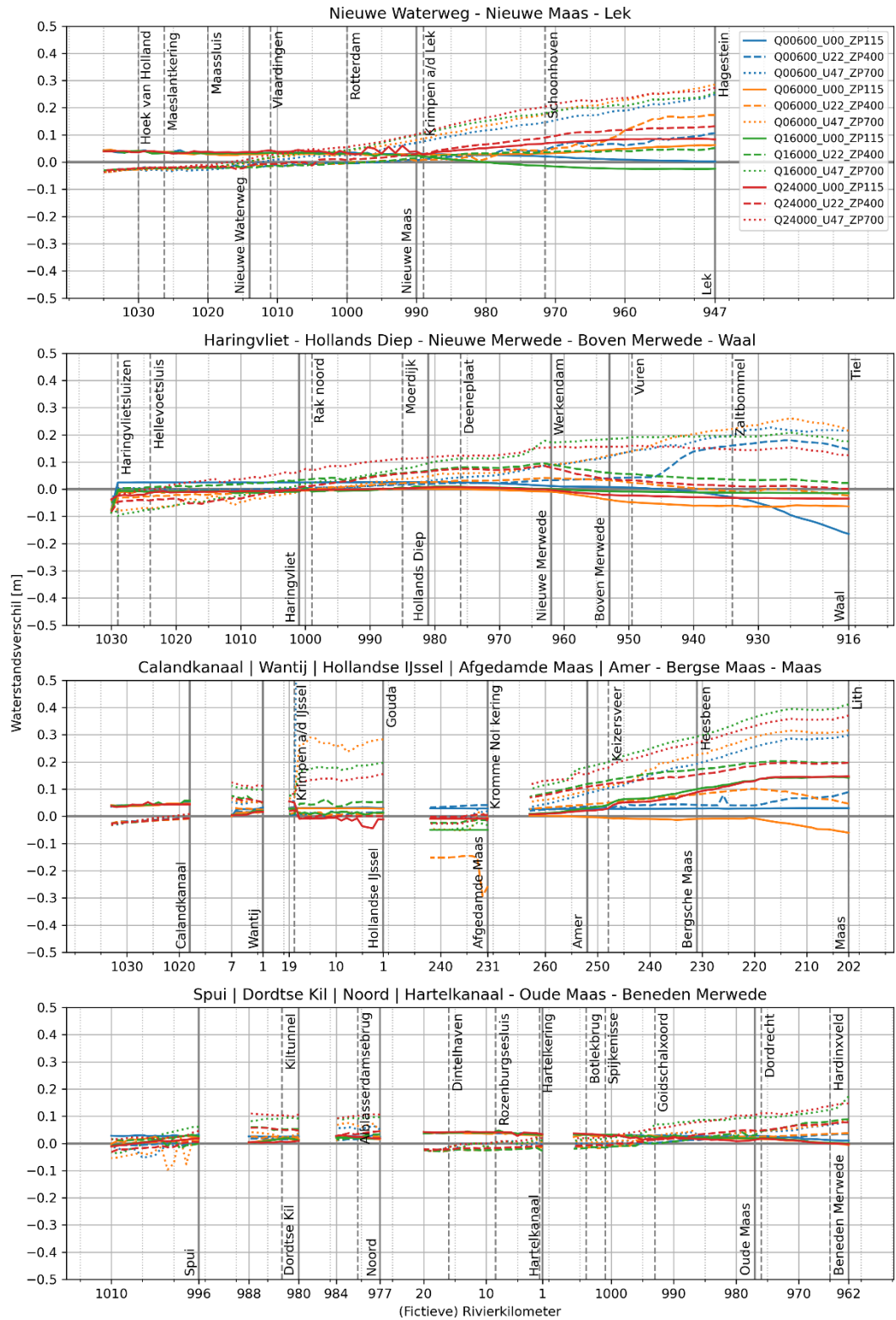
Om alleen het effect van het gebruik van andere modelrandvoorwaarden te analyseren wordt als referentie het actuele beleidsmodel gebruikt (gelijk aan het model dat binnen BOI2023 wordt gebruikt), waarbij de modelrandvoorwaarden van WBI2017 worden toegepast (fm_beno19_rvw_oud). Voor de variant wordt hetzelfde model gebruikt, maar dan met toepassing van de modelrandvoorwaarden uit BOI2023 (fm_beno19_rvw_nieuw). De modelrandvoorwaarden zijn beschreven in paragraaf 3.2. Tabel 9-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 9-1 Instellingen van variant (fm_beno19_rvw_nieuw) en referentie (fm_beno19_rvw_oud) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de nieuwe modelrandvoorwaarden.

	variant	referentie
	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	beno19	beno19
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	hr2023	hr2017
Opzet	hr2023	hr2017
Wind	hr2023	hr2017
Afvoer	hr2023	hr2017

Resultaten

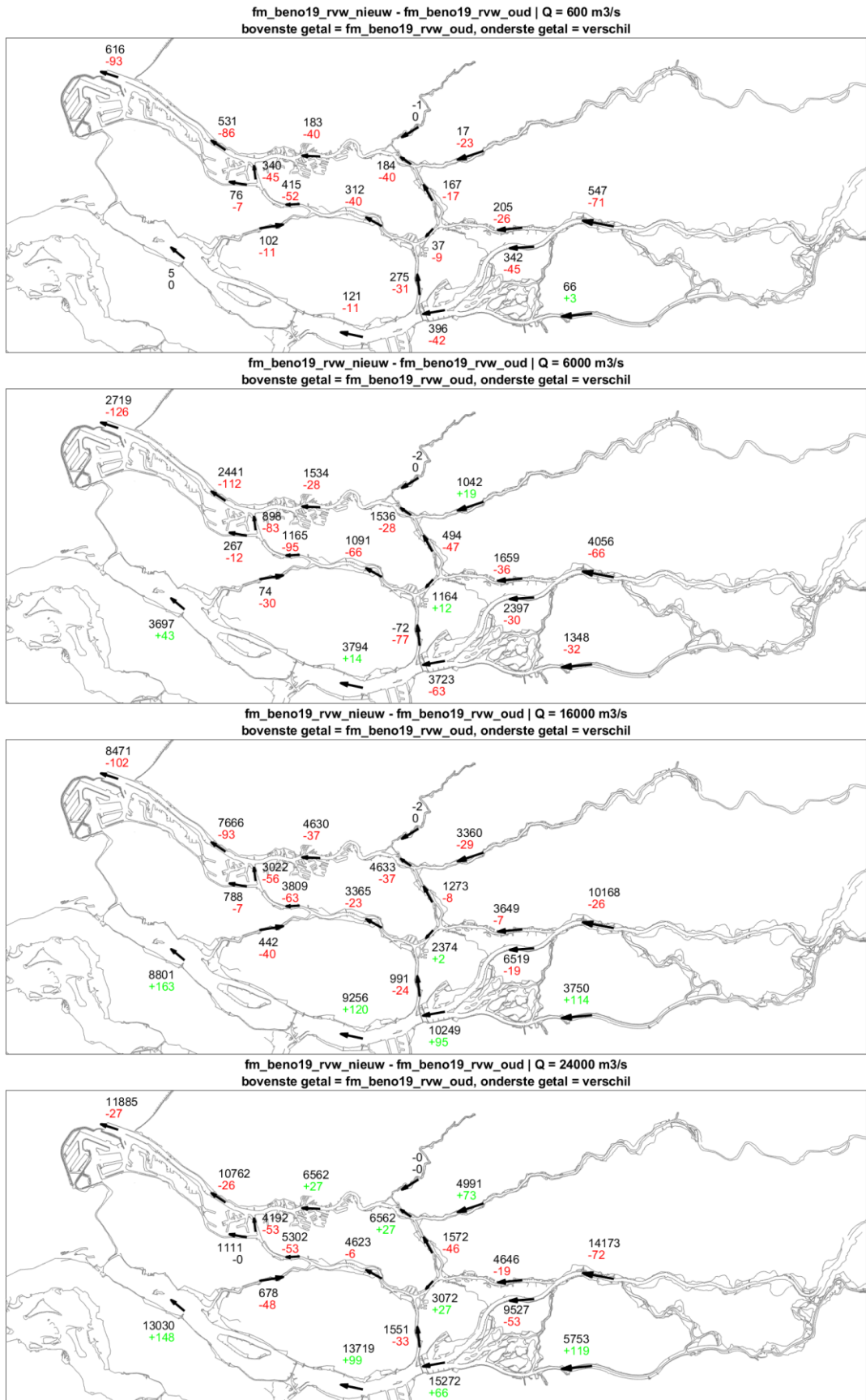
Figuur 9-1 presenteert het effect van de nieuwe modelrandvoorwaarden ([fm_beno19_rvw_nieuw] t.o.v. [fm_beno19_rvw_oud]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 9-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 9-1. Figuur 9-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 9-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van de nieuwe modelrandvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. fm_beno19_rvw_oud) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 9-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van de nieuwe randvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. fm_beno19_rvw_oud) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.025	0.011	0.003	0.044
	600	22 m/s, 4,0 m	0.023	0.039	-0.028	0.107
	600	47 m/s, 7,0 m	0.084	0.089	-0.033	0.249
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.036	0.011	0.025	0.063
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.033	0.062	-0.029	0.173
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.104	0.101	-0.032	0.285
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.009	0.025	-0.025	0.040
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.013	0.027	-0.027	0.052
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.104	0.093	-0.032	0.256
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.054	0.020	0.027	0.086
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.046	0.055	-0.027	0.132
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.118	0.100	-0.031	0.274
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.001	0.046	-0.165	0.027
	600	22 m/s, 4,0 m	0.051	0.064	-0.008	0.180
	600	47 m/s, 7,0 m	0.081	0.084	-0.005	0.227
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.024	0.025	-0.065	0.003
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.006	0.021	-0.033	0.041
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.080	0.105	-0.079	0.260
	16000	0 m/s, 1,15 m	-0.006	0.007	-0.014	0.011
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.044	0.025	-0.003	0.095
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.096	0.097	-0.098	0.208
	24000	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.014	-0.035	0.008
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.020	0.039	-0.054	0.085
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.105	0.053	-0.020	0.160
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.028	0.001	0.027	0.030
	600	22 m/s, 4,0 m	0.046	0.016	0.020	0.090
	600	47 m/s, 7,0 m	0.181	0.086	0.034	0.299
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.015	0.016	-0.061	0.002
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.067	0.022	0.026	0.101
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.204	0.093	0.053	0.316
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.088	0.048	0.009	0.145
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.160	0.040	0.072	0.203
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.280	0.097	0.102	0.411
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.083	0.052	0.007	0.147
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.149	0.040	0.069	0.198
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.259	0.083	0.118	0.371



Figuur 9-2 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van de nieuwe randvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. fm_beno19_rvw_oud) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

In Figuur 9-1 is te zien dat het effect van de nieuwe modelrandvoorwaarden zeer sterk afhankelijk is van de wind en waterstandsopzet. De gemiddelde absolute bias in Tabel 9-2 is 7,6cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 5,0cm en een maximale uitschieter van +41cm. In het algemeen zijn de verschillen op de Maas het grootst. In de simulaties zonder wind en opzet zijn de verschillen beperkt tot enkele centimeters, met een aantal uitschieters tot maximaal -17cm bovenstrooms op de Waal en 15cm bovenstrooms op de Maas. De verschillen op de bovenstroomse randen van de riviertakken zijn te verklaren door de verschillen in bovenstroomse randvoorwaarden. Dit is goed te zien aan de afvoerverschillen in Figuur 9-2. Het verschil van -17cm op de Waal ontstaat bij de som met lage afvoer. De afvoer op de Waal is met de BOI2023 randvoorwaarden relatief gezien fors lager (meer dan 10%) waardoor het waterstandsverschil ontstaat. Op de Maas is voor de twee hogere afvoeren een duidelijke verhoging van de waterstand te zien als gevolg van BOI2023 randvoorwaarden die ontstaan door de hogere afvoer op de Maas.

Bij de extreem harde wind en hoge opzet zijn de waterstanden in het geval van de nieuwe modelrandvoorwaarden significant hoger, tot een maximum van 41cm op de Maas. De verwachting is dat dit grotendeels te maken heeft met de hogere windsnelheid in de nieuwe modelrandvoorwaarden (zie Tabel 3-3). De hoogste windsnelheid is 2,7 m/s groter, resulterend in meer opstuwing in bovenstroomse richting, en dus hogere waterstanden. Bij de tussenliggende windconditie is dit effect ook te zien, maar in mindere mate (effect maximaal 20cm). Dit is het gevolg van de minder extreem harde wind, en dus minder opstuwing. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de windsnelheid in het kwadraat wordt meegenomen in de berekening van de windschuifspanning. Daardoor kan een relatief beperkte toename in wind toch een significant effect hebben. Hierbij moet echter de kanttekening worden geplaatst dat het gebruik van de nieuwe windrandvoorwaarden eigenlijk niet los kan worden gezien van het toepassen van de bijbehorende windschuifspanningscoëfficiënten (zie paragraaf 7.3), die juist voor een verlaging van de waterstand bij (extreem) hoge windsnelheden.

Daarnaast draagt de verhoogde afvoer op de Maas ook bij aan de waterstandsverschillen. Bij de twee hoogste afvoeren is de afvoer via de Maas in de nieuwe modelrandvoorwaarden hoger wat ook zonder wind al leidt tot verhoging van de waterstand.

Een ander aspect wat opvalt, is het verschil dat gezien wordt bij de benedenstroomse rand in de Nieuwe Waterweg. Bij de simulaties zonder wind en opzet gaat het om een verhoogde waterstand in het geval van de nieuwe modelrandvoorwaarden van 4 cm, terwijl het bij de simulaties met wind en opzet gaat om een verhoogde waterstand bij de oude modelrandvoorwaarden van 4 cm. Deze verschillen zijn terug te herleiden naar de gebruikte modelrandvoorwaarden in het model, zoals in Tabel 3-3 te zien is.

De effecten van de nieuwe modelrandvoorwaarden op de afvoerverdeling zijn significant. Bij een rivierafvoer van 600 m³/s werkt de vermindering van de afvoer op de Lek en de Waal door in het gehele systeem. Bij de hoogste drie rivierafvoeren verschuift de verdeling over de noordrand en de zuidrand wat meer naar het zuiden. Behalve de extra afvoer door de Maas trekt ook een groter deel van de verminderde afvoer door de Waal richting het Haringvliet, doordat er minder wordt afgevoerd via het Spui en de Dordtsche Kil.

10 Verschilanalyse: Effect voor BOI

Dit hoofdstuk analyseert het effect van de overstap voor BOI2023 naar een nieuwe modelschematisatie t.o.v. de modelschematisatie die is gebruikt in de vorige toetsingsronde (WBI2017). Voor BOI2023 geldt echter dat zowel de modelschematisatie zelf als de gebruikte modelrandvoorwaarden voor toetsing worden aangepast. Er wordt dus eerst een analyse gedaan waarbij alleen wordt gekeken naar het effect van de overstap naar een nieuwe modelschematisatie (met toepassing van dezelfde modelrandvoorwaarden) en vervolgens een analyse waarbij ook de bijbehorende modelrandvoorwaarden worden toegepast. Binnen deze verschilanalyse wordt alleen gekeken naar de totale waterstandseffecten bij een gegeven afvoerniveau en zeewaterstand en windconditie, dus zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI.

10.1 BOI2023 vs. WBI2017 met dezelfde modelrandvoorwaarden

Voor BOI is het wenselijk om te zien wat het verschil in resultaten is ten opzichte van de vorige ronde (WBI2017), waarbij alleen maar gekeken wordt naar het effect van de overstap naar de nieuwe modelschematisatie (dus met dezelfde modelrandvoorwaarden, hr2023-zss). Er wordt daarom een verschilanalyse gedaan tussen het nieuwe zesde-generatie hr2023-model (dflowfm2d-rmm-hr2023_6) en het vigerende model uit WBI2017 (waqua-rmm-hr2017_5), waarbij dezelfde modelrandvoorwaarden worden gehanteerd als in hoofdstuk 5 t/m 8.

Uitgangspunten

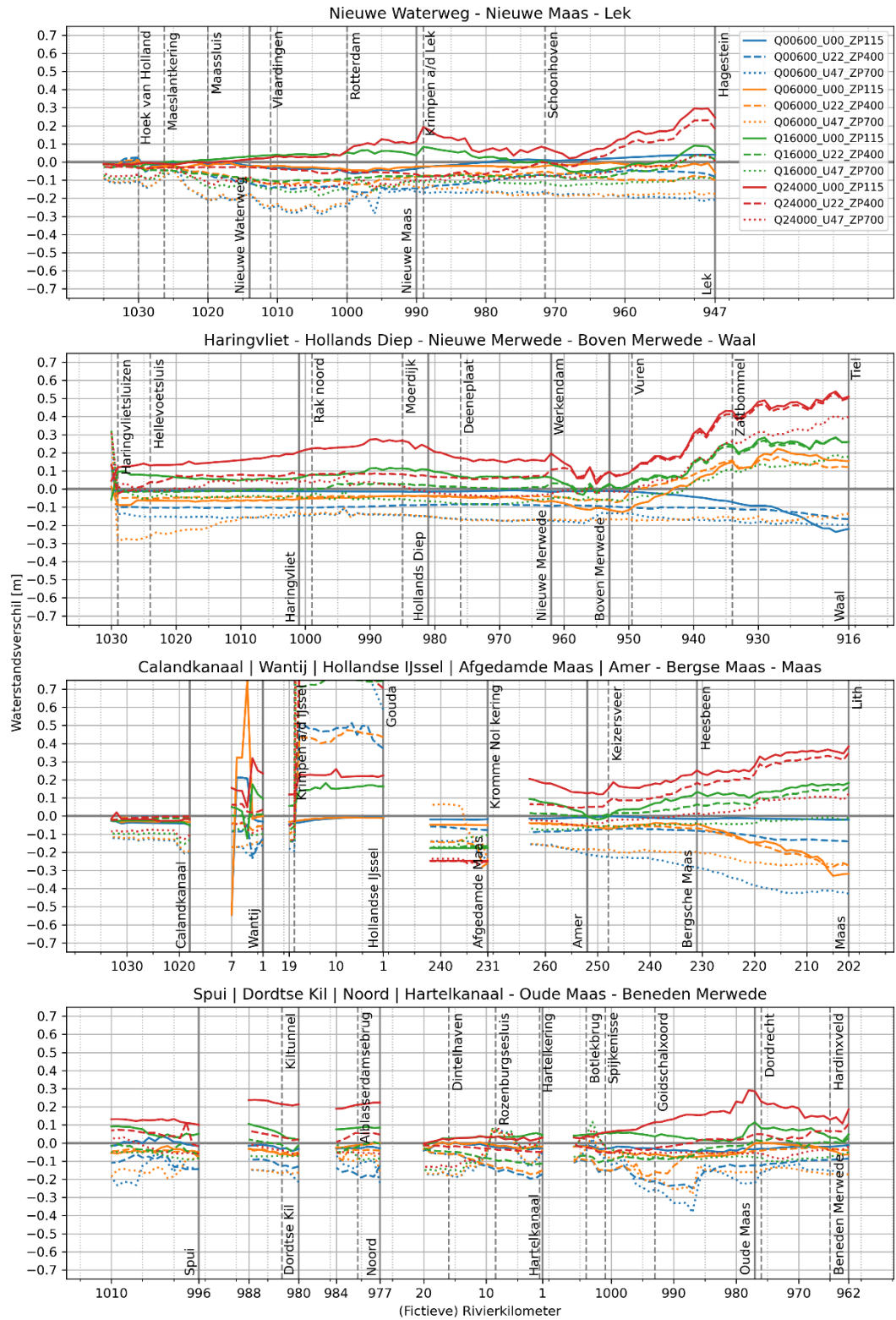
Voor de analyse wordt het vigerende WAQUA-WBI2017-model (waq_hr2017 = waqua-rmm-hr2017_5) als referentie gebruikt en het nieuwe D-HYDRO-BOI2023-model (fm_hr2023 = dflowfm2d-rmm-hr2023_6) als variant. Tabel 10-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 10-1 Instellingen van variant (fm_hr2023) en referentie (waq_hr2017) voor het bepalen van het verschil tussen de schematisatie van WBI2017 en BOI2023.

	variant	referentie
	fm_hr2023	waq_hr2017
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	flexibel (nieuw)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinsky	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	hr2023	hr2017
Trachytopen	G6	G5
Ruwheid zomerbed	G6	G5
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

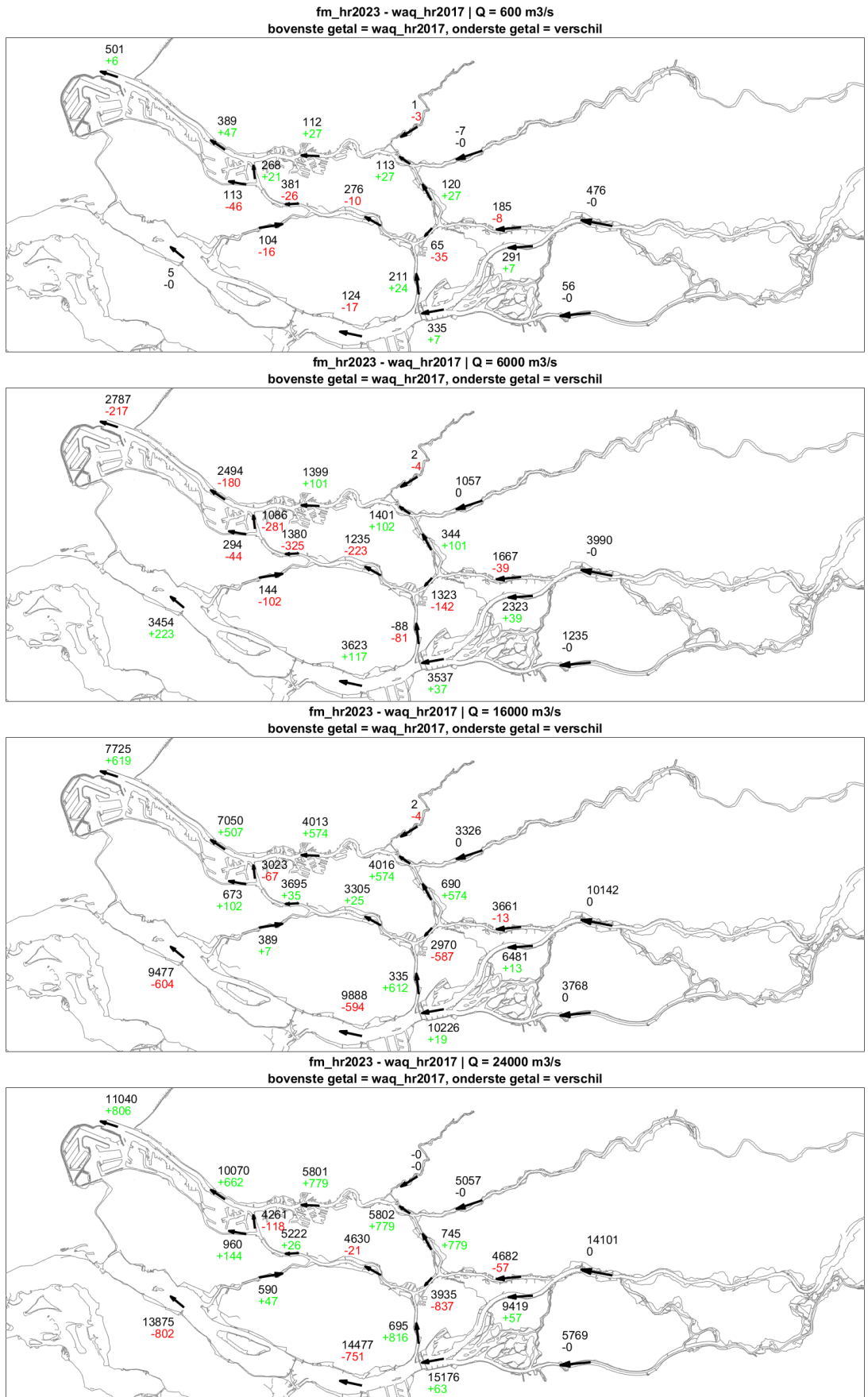
Figuur 10-1 presenteert het verschil tussen het beoogde model voor BOI2023 (D-HYDRO) en het hr2017-model (WAQUA) uit de vorige toetsingsronde (WBI2017) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 10-2 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 10-1. Figuur 10-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverskil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 10-1 Waterstandsverschillen (in meters) tussen nieuw beoogde BOI2023 model (D-HYDRO) en hr2017-model uit vorige toetsronde (WAQUA) (fm_hr2023 t.o.v. waq_hr2017) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 10-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) tussen nieuw beoogde BOI2023 model (D-HYDRO) en hr2017-model uit vorige toetsronde (WAQUA) (fm_hr2023 t.o.v. waq_hr2017) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.007	0.029	-0.064	0.041
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.091	0.046	-0.168	0.026
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.187	0.045	-0.290	-0.050
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.023	0.011	-0.058	0.008
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.080	0.030	-0.126	0.010
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.176	0.042	-0.276	-0.041
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.020	0.036	-0.056	0.091
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.068	0.032	-0.110	0.037
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.117	0.027	-0.186	-0.027
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.080	0.077	-0.017	0.296
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.078	-0.081	0.230
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.080	0.042	-0.153	0.040
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.038	0.055	-0.237	-0.008
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.103	0.016	-0.167	-0.083
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.161	0.018	-0.199	-0.105
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.093	-0.127	0.222
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.000	0.075	-0.074	0.178
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.171	0.035	-0.289	-0.106
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.103	0.078	-0.032	0.285
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.059	0.095	-0.016	0.283
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.013	0.076	-0.087	0.190
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.230	0.126	0.028	0.538
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.156	0.152	-0.025	0.526
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.073	0.127	-0.042	0.405
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.013	0.005	-0.020	-0.002
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.096	0.024	-0.141	-0.068
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.296	0.093	-0.428	-0.156
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.109	0.085	-0.330	-0.038
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.114	0.078	-0.282	-0.042
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.217	0.038	-0.272	-0.154
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.096	0.056	-0.020	0.183
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.059	0.050	-0.001	0.160
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.044	0.020	-0.078	-0.007
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.236	0.082	0.120	0.384
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.171	0.102	0.046	0.346
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.022	0.055	-0.051	0.123



Figuur 10-2 Afvoerverdeeling en verschillen (in m³/s) tussen BOI2023 model (D-HYDRO) en hr2017-model (WAQUA) (fm_hr2023 t.o.v. waq_hr2017) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De verschillen in deze analyse zijn een combinatie van de overstap naar de zesde-generatie model- en gebiedsschematisatie, inclusief onderliggende D-HYDRO en Baselinesoftware, en de verandering in geometrie in het nieuwe hr-model.

De verschillen in Figuur 10-1 komen qua patroon redelijk overeen met de verschillen die in paragraaf 8.1 gepresenteerd zijn, waarin is gekeken naar het totale effect van de overgang van de vijfde naar de zesde generatie. Daarmee lijkt het aannemelijk dat de verschillen deels verklaarbaar zijn door de nieuwe software (D-HYDRO t.o.v. WAQUA) en het nieuwe rekenrooster (ongestructureerd t.o.v. gestructureerd). Op sommige plekken zijn de verschillen anders, doordat er ook verschillen zijn in de toegepaste maatregelen in beide schematisaties. De gemiddelde absolute bias in Tabel 10-2 is 9,8cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 5,9cm en een maximale uitschieter van +54cm. De verschillen liggen tussen de +54 cm en -43 cm als de Hollandsche IJssel en Wantij buiten beschouwing worden gelaten.

Een aantal van de verschillen zijn eerder ook al opgemerkt. Zo is bij de zeerand van de Nieuwe Waterweg bij simulaties met hoge opzet en extreem harde wind een verschil van circa 10 cm te zien. Dit was ook het geval bij de verschilanalyse voor software in hoofdstuk 5. Ook het fenomeen waar het verschil bij de Maeslantkering terugloopt naar nul en vervolgens weer zakt in het negatieve is hetzelfde als geobserveerd bij de softwarevergelijking.

De grote verschillen op de Hollandsche IJssel (groter dan 75 cm) zijn toe te schrijven aan het verschil in keringformulering in vijfde en zesde generatie, waarbij in de zesde generatie de kering kan overstromen, en in de vijfde niet. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.

De duidelijke verschillen tussen de simulaties met verschillende rivierafvoeren, waarbij hogere rivierafvoeren een hogere waterstand in fm_hr2023 veroorzaken vergeleken met waq_hr2017, komen (onder andere) voort uit de verschillende overlaatformulering tussen de vijfde en zesde generatie. Dit verschil is met name terug te vinden in de bovenstroomse delen, zoals beschreven in paragraaf 7.2. Ook in de softwarevergelijking is dit fenomeen terug te zien, ook meer benedenstrooms, zie hoofdstuk 5.

Een hardere wind zorgt voor hogere waterstanden in de waq_hr2017 simulaties. Ook dit is terug te zien in de vergelijkingen voor software en overlaatformulering (hoofdstuk 5 en paragraaf 7.2).

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is te zien dat de hoogste twee rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer via de noordrand, zowel door het Hartelkanaal als de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, in fm_hr2023. Bij een rivierafvoer van 6.000 m³/s trekt er juist meer afvoer door het Hollandsch Diep en het Haringvliet in fm_hr2023. Deze effecten zijn ook geobserveerd bij de softwarevergelijking en het effect van het rekenrooster.

10.2 BOI2023 vs. WBI2017 met bijbehorende modelrandvoorwaarden

Voor BOI is het tevens wenselijk om te zien wat het verschil in resultaten is ten opzichte van de vorige ronde (WBI2017) inclusief het gebruik van de bijbehorende modelrandvoorwaarden. Er wordt daarom ook een verschilanalyse gedaan tussen het nieuwe zesde-generatie hr2023-model (dflowfm2d-rmm-hr2023_6) en het vigerende model uit WBI2017 (waqua-rmm-hr2017_5), waarbij de modelrandvoorwaarden die voor de betreffende HR-berekeningen zijn/worden toegepast zijn gebruikt. Binnen deze verschilanalyse wordt alleen gekeken naar de totale waterstandseffecten bij een gegeven afvoerniveau en zeewaterstand en windconditie, dus zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het vigerende WAQUA WBI2017-model (waq_hr2017 = waqua-rmm-hr2017_5) met toepassing van de WBI2017-modelrandvoorwaarden als referentie gebruikt en het nieuwe D-HYDRO BOI2023-model (fm_hr2023 = dflowfm2d-rmm-hr2023_6) met de nieuwe BOI2023-modelrandvoorwaarden als variant. In het referentiemodel worden de instellingen uit Bak & Vlag (1997) voor de windschuifspanning gebruikt. In de variant zijn dit de instellingen uit Van Vledder (2017).

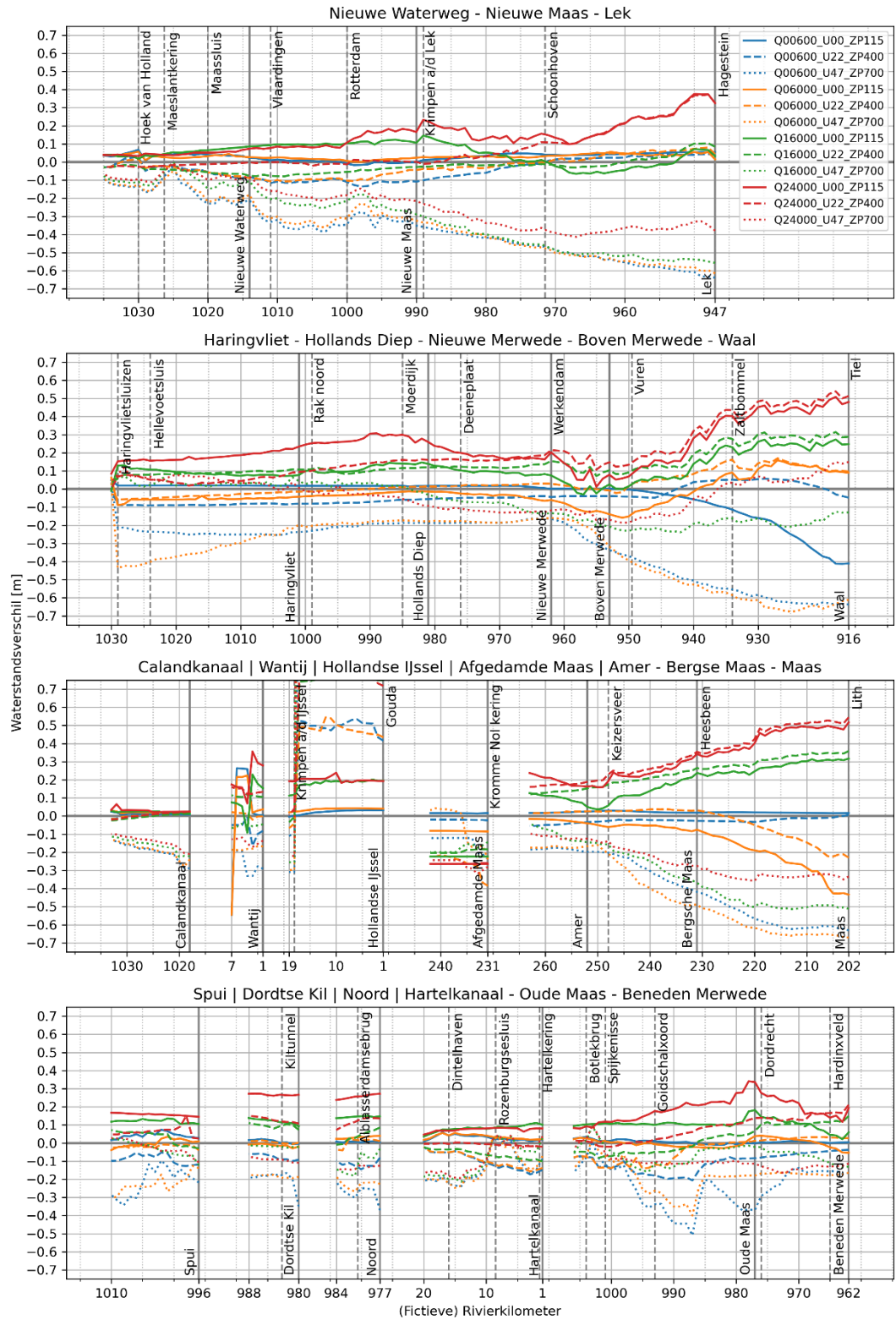
Tabel 10-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 10-3 Instellingen van variant (fm_hr2023_rvw_nieuw) en referentie (waq_hr2017_rvw_oud) voor het bepalen van het verschil tussen de schematisatie van WBI2017 en BOI2023, inclusief het effect van nieuwe modelrandvoorwaarden.

	Variant	referentie
	fm_hr2023_rvw_nieuw	waq_hr2017_rvw_oud
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	flexibel (nieuw)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinsky	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Bak & Vlag (1997)
Schematisatie		
Geometrie	hr2023	hr2017
Trachytopen	G6	G5
Ruwheid zomerbed	G6	G5
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Lateralen	hr2023	hr2017
Opzet	hr2023	hr2017
Wind	hr2023	hr2017
Afvoer	hr2023	hr2017

Resultaten

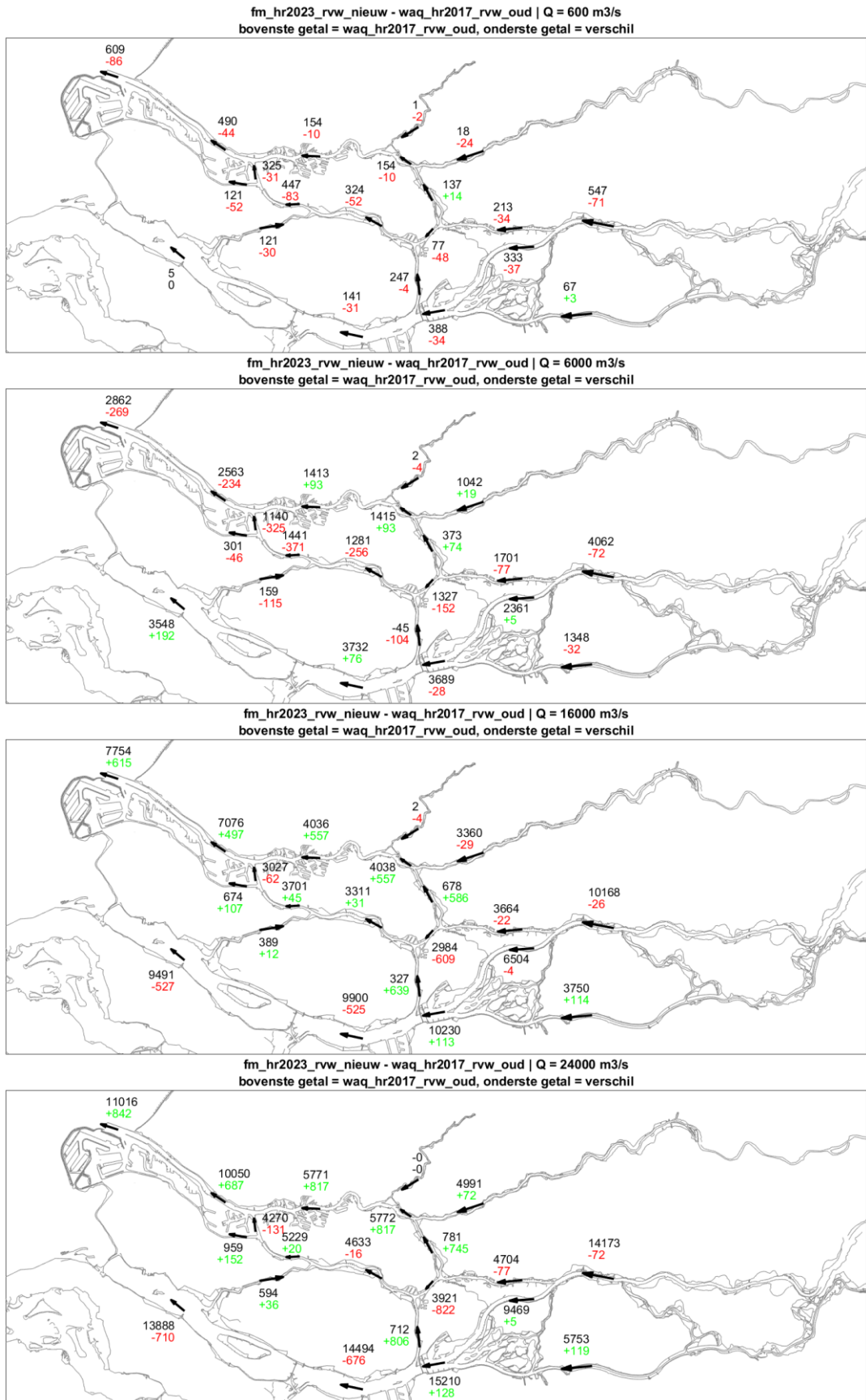
Figuur 10-3 presenteert het verschil tussen het beoogde model voor BOI2023 (= het beoogde beno19_6 model welke voor BOI wordt opgeleverd als hr2023-modelschematisatie: fm_hr2023_rvw_nieuw) en het hr2017-model (WAQUA: waq_hr2017_rvw_oud) uit de vorige beoordelingsronde (WBI2017), waarbij de (beoogde) modelrandvoorwaarden die gebruikt worden in de berekeningen zijn toegepast, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel 10-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur 10-3. Figuur 10-4 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur 10-3 Waterstandsverschillen (in meters) tussen nieuw beoogde BOI2023 model (D-HYDRO) met BOI2023 randvoorwaarden en hr2017-model uit vorige toetsronde (WAQUA) met WBI2017 randvoorwaarden (fm_hr2023_rvw_nieuw t.o.v. waq_hr2017_rvw_oud) voor stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel 10-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) tussen nieuw beoogde BOI2023 model (D-HYDRO) met BOI2023 modelrandvoorwaarden en hr2017-model uit vorige toetsronde (WAQUA) met WBI2017 modelrandvoorwaarden (fm_hr2023_rvw_nieuw t.o.v. waq_hr2017_rvw_oud) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.029	0.021	-0.017	0.068
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.042	0.058	-0.135	0.044
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.382	0.148	-0.638	-0.023
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.030	0.013	-0.000	0.057
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.025	0.056	-0.107	0.080
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.368	0.150	-0.614	-0.050
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.049	0.057	-0.065	0.146
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.024	0.041	-0.080	0.104
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.323	0.164	-0.556	-0.000
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.143	0.085	0.033	0.376
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.070	0.113	-0.027	0.372
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.246	0.118	-0.413	-0.005
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.039	0.111	-0.413	0.020
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.041	0.046	-0.091	0.057
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.323	0.162	-0.638	-0.162
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.023	0.071	-0.158	0.159
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.027	0.060	-0.058	0.170
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.347	0.175	-0.677	-0.159
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.115	0.071	-0.030	0.273
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.142	0.073	0.071	0.314
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.078	0.102	-0.238	0.072
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.236	0.114	0.012	0.508
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.196	0.147	0.018	0.539
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.029	0.090	-0.186	0.149
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.020	0.004	0.015	0.030
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.026	0.013	-0.055	0.006
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.400	0.174	-0.631	-0.175
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.136	0.122	-0.434	-0.016
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.030	0.084	-0.230	0.038
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.443	0.194	-0.670	-0.160
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.191	0.088	0.036	0.317
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.241	0.076	0.120	0.358
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.330	0.161	-0.513	-0.043
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.322	0.120	0.158	0.517
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.337	0.130	0.161	0.545
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.249	0.090	-0.359	-0.098



Figuur 10-4 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) tussen BOI2023 model (D-HYDRO) met BOI2023 randvoorwaarden en hr2017-model (WAQUA) met WBI2017 randvoorwaarden (fm_hr2023_rvw_nieuw t.o.v. waq_hr2017_rvw_oud) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Figuur 10-3 presenteert in feite het gecombineerde verschilbeeld veroorzaakt door de toepassing van andere modelrandvoorwaarden (zie Figuur 9-1), verschillende windinstellingen (zie Figuur 7-5) en het verschil in modelschematisatie (combinatie van software, rooster en schematisatie) tussen BOI2023 en WBI2017 (zie Figuur 10-1). De gemiddelde absolute bias in Tabel 10-4 is 16,8cm, met een gemiddelde standaarddeviatie van 9,7cm en een maximale uitschieter van -68cm. De verschillen zijn maximaal +55cm tot -68cm en de grootste verschillen zitten voornamelijk in de bovenstroomse delen van het domein. Hierbij zijn de verschillen op de Hollandsche IJssel en Wantij buiten beschouwing genomen.

De verschillen in Figuur 10-3 van de sommen zonder extreem harde wind komen qua patroon goed overeen met de verschillen die in paragraaf 10.1 zijn gepresenteerd. Daarmee zijn de verschillen voor de sommen zonder extreem harde wind, net als in paragraaf 10.1, vooral te verklaren door de overstap naar de zesde generatie, inclusief een verandering in geometrie. Bij de hoge afvoeren zijn de grootste verschillen te vinden in de Maas (maximaal +55cm), maar ook in de Waal (maximaal +54cm). In de Lek zijn de verschillen beperkt (maximaal +38cm). De sommen met extreem harde wind worden naast deze effecten voor een groot deel beïnvloed door het effect van de windschuifspanning, wat in paragraaf 7.3 is bekeken. Door dit effect zijn de waterstanden met het nieuwe BOI2023 model en randvoorwaarden veel lager voor de sommen met extreem harde wind.

In de afvoerverdeling bij sommen zonder wind en opzet is hetzelfde beeld te zien als bij de vergelijking tussen BOI2023 en WBI2017 met dezelfde modelrandvoorwaarden. De hoogste twee rivierafvoeren zorgen voor meer afvoer via de noordrand, zowel door het Hartelkanaal als de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, in fm_hr2023. Bij een rivierafvoer van 6.000 m³/s trekt er juist meer afvoer door het Hollandsch Diep en het Haringvliet in fm_hr2023. De effecten bij de laagste rivierafvoer zijn toe te schrijven aan de nieuwe modelrandvoorwaarden.

11 Conclusies en aanbevelingen

Tussen de vijfde- en zesde-generatie modellen zitten grote verschillen in modelopzet en instellingen, zoals de overgang naar nieuwe rekensoftware (van WAQUA naar D-HYDRO), een nieuw rekenrooster (van gestructureerd naar ongestructureerd), andere parameters en modelconcepten (o.a. Villemonthe in plaats van Tabellenboek voor de overlaatformulering), een andere geometrie en een nieuwe kalibratie. Om te kunnen duiden in welke mate onderdelen in de modelopzet en -keuzes invloed hebben op het verschil in modelresultaten, is voorliggende verschilanalyse uitgevoerd voor de Rijn-Maasmonding. Hierbij zijn volgens een vastgestelde procedure stapsgewijs een aantal verschilanalyses gemaakt tussen verschillende modelschematisaties. Enkele van deze schematisaties zijn specifiek voor deze verschilanalyse opgezet. Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste bevindingen op basis van de uitgevoerde verschilanalyses. Er worden hier geen harde conclusies aan verbonden, omdat deze per toepassing van de modelschematisatie kunnen verschillen. Aan het eind worden ook nog enkele aanbevelingen gegeven.

11.1 Algemene opmerkingen voor alle resultaten

De effecten op de waterstand zijn zeer beperkt bij lage afvoer ($600 \text{ m}^3/\text{s}$) en geen wind en opzet. De grootste verschillen zijn bij deze condities te vinden op de bovenstroomse riviertakken, vooral op de Waal. Hier zijn als gevolg van de BOI2023 modelrandvoorwaarden lagere waterstanden te zien bovenstrooms bij Tiel.

De effecten op de waterstand zijn vaak het grootst bij extreem hoge afvoer ($24.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en extreme windsnelheid (47 m/s), welke deel uitmaken van de productiesommen binnen BOI. Deze afvoer is echter tweemaal hoger dan wat ooit gemeten is en ca. 1,4 keer groter dan de verwachtingswaarde van de T100.000-afvoer. Ook de windsnelheid van 47 m/s is 1,6 keer hoger dan ooit gemeten. Ze horen daarmee bij een uiterst kleine overschrijdingskans en/of met significante mate van klimaatverandering en/of een positie in het bovenbereik van de onzekerheidsband. Daarom zijn de verschillen tussen modelvarianten bij $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en/of 47 m/s zoveel groter dan binnen het meetbereik (tot $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 30 m/s).

Er ontstaan grote waterstandsverschillen op de Hollandsche IJssel bij de vergelijking tussen de vijfde en zesde generatie met kunstwerken. De verschillen voor de sommen met extreem harde wind en hoge zeewaterstand zijn daarin het grootst. Deze grote verschillen zijn het gevolg van een andere keringformulering. In de zesde generatie kan de Hollandsche IJsselkering overstroomd bij een waterstand hoger dan $5 \text{ m} + \text{NAP}$, terwijl dit in de vijfde generatie niet mogelijk is. Bij andere verschilanalyses met twee zesde-generatie modellen zijn er ook relatief grote verschillen te zien op de Hollandsche IJssel. Dit is het gevolg van gevoeligheid van de sluitingscriteria van deze kering, waardoor hij op een ander moment sluit.

De resultaten in het Wantij zijn in alle vergelijkingen onrealistisch. Het Wantij is een hele smalle waterweg die in beide modellen niet is uitgelijnd in het rooster. Hierdoor wordt de waterbeweging in het Wantij niet goed gemodelleerd. Wel heeft het zesde-generatie rooster een wat fijnere resolutie waardoor de waterbeweging iets beter wordt gemodelleerd.

Het is belangrijk om bij het interpreteren van de resultaten mee te nemen dat de gegeven kentallen (bias/stddev/min/max) sterk afhankelijk zijn van de locatie, belastingcombinatie en uiteraard de gekozen vergelijkingsvariant.

In deze verschilanalyse wordt er expliciet niet verondersteld dat de effecten van de verschillende onderdelen bij elkaar op te tellen zijn tot het totale effect. Globaal zal een optelling van de onderdelen in de buurt komen van het totale effect, maar er spelen uiteraard niet-lineaire interacties tussen de onderdelen. In de verschilanalyse is gekeken naar de belangrijkste onderdelen voor het totale effect.

11.2 Effect software

Voor de zesde-generatie modellen wordt de overstap gemaakt van de WAQUA naar de D-HYDRO-software. Het gebruik van de D-HYDRO Suite biedt namelijk op diverse vlakken nieuwe kansen en verbeteringen, die eerder niet aanwezig waren.

Het gaat hier o.a. om de verbeterde modelleerflexibiliteit, gebruik van een flexibel rekenrooster, roosteronafhankelijke invoer, andere parameters en modelconcepten en betere afstemming tussen waterbeweging, golven, morfologie en waterkwaliteit. De overstap van de WAQUA- naar D-HYDRO software geeft voor de sommen zonder wind en opzet en de sommen met 24 m/s wind en 4,0 m+NAP waterstand op zee gemiddeld gezien een verhoging van de waterstanden (verschillen tot +21 cm). Sommen met extreme wind (50 m/s) en opzet (7,0 m+NAP waterstand op zee) geven gemiddeld gezien juist een verlaging van de waterstanden (verschillen tot -25 cm). Lokaal zijn er uitschieters naar -44 cm (op de Nieuwe Maas, 600 m³/s, 49,8 m/s en 7,0 m+NAP) en +60 cm (op de Waal, 24.000 m³/s, 0 m/s en 1,15 m+NAP).

Als specifiek wordt gekeken naar het effect van het gebruik van een ander advection-schema, dan zijn de verschillen aanmerkelijk kleiner. Bovenstrooms nemen de verschillen langzaam toe tot -24 cm (op de Maas, 600 m³/s, 49,8 m/s en 7,0 m+NAP) en +28 cm (op de Waal, 24.000 m³/s, 0 m/s en 1,15 m+NAP).

Naast verschillen door een ander advection-schema, blijkt ook het effect in beschrijving van de ruwheid, kunstwerken en overlaten aanzienlijk. De getij-afhankelijke ruwheid resulteert in een grote verlaging van de waterstand op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas die vooral voor de sommen met extreem harde wind en hoge opzet te zien zijn. Ook het effect van de kunstwerken is vooral zichtbaar voor de sommen met extreem harde wind en hoge opzet. Als gevolg van de aanwezigheid van de kunstwerken worden de verschillen over het algemeen echter kleiner. Verder zijn er duidelijke effecten van de overlaten te zien, vooral op de riviertakken. Hier is een verhoging van de waterstand te zien, met name bovenstrooms op de Waal.

De verschillen door de overstap van de WAQUA naar D-HYDRO software kunnen dus grotendeels worden verklaard door het gebruik van een ander advection-schema, een andere beschrijving van de getij-afhankelijke ruwheid en een andere implementatie van de overlaten.

11.3 Effect rekenrooster

Een belangrijk verschil tussen de vijfde en zesde generatie is dat er in de zesde generatie gebruik gemaakt kan worden van een ongestructureerd (flexibel) rooster. Omdat in het ongestructureerde rooster de criteria voor een goed rooster (zoals uitlijning op geometrische onderdelen en gebruik van een meer uniforme resolutie) beter gevolgd kunnen worden, is het de verwachting dat de resultaten met het nieuwe rooster het dichtst in de buurt van de werkelijkheid liggen. Het oude (gestructureerde) rooster gaf vermoedelijk een te hoge numerieke weerstand doordat de stroming in de bochten diagonaal op het rooster stond. Door kalibratie zal dit verschil deels gecorrigeerd zijn (een lagere ruwheid), maar zal de nieuwe modellering in D-HYDRO vermoedelijk een beter resultaat geven.

De (negatieve) verschillen in waterstanden tussen het gestructureerde en het nieuwe ongestructureerde rekenrooster blijken het grootst te zijn in de bochtige delen (het bovenstroomse deel van de Maas en Waal), waar de betere uitlijning met het zomerbed door het ongestructureerde rooster het meeste voordeel oplevert. In de Maas loopt dit verschil bij 6.000 m³/s zonder wind en opzet op tot -15 cm.

Als het effect van een andere projectie van overlaten en kunstwerken buiten beschouwing wordt gelaten, is effect van een ander rekenrooster bij extreem harde wind en hoge opzet aanzienlijk groter. Door een verschil in de drempelvorm van de Haringvlietsluizen (die zonder kunstwerken nog wel in de bodem aanwezig zijn) ontstaat er een groot verschil in stroming. Daarbij ontstaan lagere waterstanden met het D-HYDRO rooster, met verschillen op het Haringvliet en de Waal tot -27 cm.

11.4 Effect parameters en modelconcepten

Om het effect van turbulente processen op het relatief grove rooster mee te kunnen nemen wordt een viscositeitsterm meegenomen in de vergelijkingen. In de vijfde generatie werd hiervoor een vaste waarde gebruikt. In werkelijkheid zal deze waarde echter variëren in ruimte en tijd, afhankelijk van de gridcelgrootte en de lokale stromingsomstandigheden. Binnen de zesde generatie is daarom gekozen om een 'simpel' turbulentiemodel te gebruiken, zodat de viscositeit op een realistischere manier wordt meegenomen. Bij de aanpassing van de viscositeit is de uniforme horizontale eddy viscositeit van 1,0 naar 0,2 m²/s en de Smagorinsky factor in horizontale turbulentie van 0 naar 0,2 gezet. De verschillen zijn relatief klein (tot -9 cm op de Lek). De verschillen zijn het grootst voor de zomerbed vullende afvoer (6.000 m³/s). Dit is het afvoerregime waar de grootste verschillen in stroomsnelheid tussen zomer- en winterbed voorkomen en dus ook het grootste effect wordt verwacht.

Voor het meenemen van de lijnelementen wordt in de zesde generatie de (empirische) overlaatformulering aangepast van Tabellenboek naar Villemonte. Hierdoor wordt het namelijk mogelijk om de vorm van overlaten (waaronder kribben) mee te nemen. Daarnaast is de Villemonte formulering gebaseerd op meerdere en recentere experimenten (die beter zijn gedocumenteerd).

De aanpassing van de overlaatformulering van Tabellenboek naar Villemonte zorgt over het algemeen voor kleine verschillen van enkele centimeters in het benedenstroomse deel. Bovenstrooms op de riviertakken, vooral op de Waal, ontstaan met toenemende afvoer steeds grotere verschillen (tot maximaal +25 cm). De verschillen in de andere takken zijn kleiner, maar nemen ook toe naarmate de afvoer toeneemt. De grotere verschillen op de Waal (ten opzichte van de Maas en ook de Lek) kunnen worden verklaard doordat er meer kribben aanwezig zijn. Daarnaast hebben de kribben op de Waal een grotere lengte.

In de zesde-generatie modellen wordt voor de windschuifspanningscoëfficiënt gebruik gemaakt van de instellingen uit Van Vledder (2017) in plaats van de instellingen uit Bak & Vlag (1997). Met de instellingen uit Van Vledder (2017) wordt bij toenemende windsnelheid de windschuifspanningscoëfficiënt eerder afgekapt. Hierdoor heeft de wind relatief minder invloed op de opstuwning van water bij hoge windsnelheden. Bij de sommen met extreem harde wind (49,80 m/s) zijn grote verschillen te zien. In bovenstroomse richting resulteren de instellingen uit Van Vledder (2017) in steeds lagere waterstanden tot maximaal -1,00 m op de Waal en -1,14 m op de Maas.

11.5 Effect schematisatie

De basisschematisatie van de Rijn-Maasmonding is voor de vijfde generatie die van het jaar 2012. Voor de zesde generatie is dit die van het jaar 2013. Het verschil tussen de oude en nieuwe baseline-referentie is relatief groot, tot maximaal +56 cm bovenstrooms op de Waal, bij hoge afvoer (24.000 m³/s) zonder wind en opzet. De verschillen ontstaan door een combinatie van verschillen in software, rooster, viscositeit, overlaatformulering en schematisatie. De verschillen worden voor het grootste gedeelte veroorzaakt door de overgang in software, zeker in het bovenstroomse gebied en bij de sommen met extreem harde wind. In het benedenstroomse gebied (op de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet) worden ook de verschillen als gevolg van het rooster en schematisatie duidelijk zichtbaar, vooral voor de sommen zonder de extreem harde wind.

Vanaf de basisschematisatie is met behulp van maatregelen de schematisatie steeds geactualiseerd naar recentere jaren. De over het algemeen lagere waterstanden (oplopend tot -61 cm op de Nieuwe Merwede bij hoge afvoer en zonder wind en opzet) voor de actuele situatie van 2019 ten opzichte van 2013 worden vooral veroorzaakt doordat in de tussenliggende periode rivierverruimende maatregelen zijn uitgevoerd (o.a. Ruimte voor de Rivier).

Naast actuele modellen wordt er in de processen van RWS ook gebruik gemaakt van beleidsmodellen (zogenoeten beno-modellen) die een (toekomstige) situatie representeren. In deze modellen wordt in plaats van de actuele vegetatie de vegetatielegger meegenomen en worden naast alle verleende vergunningen ook alle planmaatregelen meegenomen die een officiële status hebben en waarvan het dus (vrij) zeker is dat ze worden uitgevoerd. Het meenemen van de vegetatielegger 2020 t.o.v. de actuele ecotopen zorgt voor een waterstandstoename op de Waal (tot maximaal +16 cm) bij hogere afvoeren waarbij het winterbed gaat meestromen.

11.6 Effect modelrandvoorwaarden

Voor BOI2023 worden andere modelrandvoorwaarden toegepast dan binnen WBI2017. Hierbij verschillen zowel de bovenstroomse afvoeren, de benedenstroomse zeewaterstanden als de windcondities. Daarnaast worden ook de lateralen meegenomen, welke ook verschillen tussen BOI2023 en WBI2017. Het waterstandseffect bij gegeven afvoerniveaus (dus zonder het meenemen van de statistiek) van het gebruik van nieuwe modelrandvoorwaarden (BOI2023 vs. WBI2017) is relatief beperkt (tot enkele centimeters) voor de sommen zonder wind en opzet, met een aantal uitschieters tot maximaal -17 cm bovenstrooms op de Waal en +15 cm bovenstrooms op de Maas. Deze verschillen zijn te verklaren door de verschillen in bovenstroomse randvoorwaarden.

Bij de extreem harde wind en hoge opzet zijn de waterstanden in het geval van de nieuwe modelrandvoorwaarden significant hoger, tot maximaal +41 cm op de Maas. Dit heeft te maken met de hogere openwater windsnelheden in de nieuwe modelrandvoorwaarden. Hierbij moet echter de kanttekening worden geplaatst dat het gebruik van de nieuwe windrandvoorwaarden eigenlijk niet los kan worden gezien van het toepassen van de bijbehorende windschuifspanningscoëfficiënten, die juist voor een verlaging van de waterstand bij (extreem) hoge windsnelheden.

11.7 Effect BOI

Voor BOI2023 speelt er qua specifieke modelveranderingen, naast de overstap naar de zesde generatie, ook een verandering in schematisatie (update van vegetatie en geometrie) en modelrandvoorwaarden ten opzichte van WBI2017. Deze veranderingen zorgen voor zowel verhogingen als verlagingen in de waterstand bij gegeven afvoerniveaus, zeewaterstanden en windcondities.

Als alleen wordt gekeken naar de overstap naar de nieuwe modelschematisatie (dus zonder het meenemen van nieuwe modelrandvoorwaarden) is in het nieuwe toetsingsmodel (hr2023) ten opzichte van het voorgaande model (hr2017) bij hoge afvoer een toename zichtbaar in de waterstanden in het hele Rijn-Maasmonding gebied. Hierbij is alleen gekeken naar de totale waterstandseffecten bij een gegeven afvoerniveau, zeewaterstand en windconditie, dus zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI. Voor de meest extreme afvoer (24.000 m³/s) is de toename maximaal +54 cm op de Waal. Voor de huidige hoogwaterreferentie (16.000 m³/s) is dit echter beperkt tot maximaal +29 cm.

De verschillen komen sterk overeen met de combinatie van de verschillen van de overgang van de vijfde naar de zesde generatie en het effect van actueel naar beleid. Daarbij zijn verschillen ook toe te schrijven aan verschillen in rekenrooster en overlaatformulering.

Het gebruik van bijbehorende modelrandvoorwaarden in de toetsingsmodellen van de vijfde en zesde generatie, levert voor de sommen met extreem harde wind en hoge opzet duidelijke verschillen ten opzichte van de vergelijking met dezelfde modelrandvoorwaarden. Als gevolg van de andere windrandvoorwaarden zijn de waterstanden voor BOI2023 veel lager, tot maximaal -68 cm op de Waal en -67 cm op de Maas. Deze verschillen zijn voor een groot deel te verklaren door het effect van de windschuifspanning.

11.8 Resumé

Het zesde-generatie Rijn-Maasmondingmodel heeft op de riviertakken een vergelijkbare roosterresolutie als die van het vijfde-generatie model. Benedenstrooms daarvan is het rooster iets fijner in het zesde-generatie model. Er zijn scenario's onderzocht van lage naar extreem hoge rivierdebieten en van geen wind/opzet naar zeer extreme windsnelheden en opzet, waarbij hoge stroomsnelheden. Het optreden van hoge stroomsnelheden maakte vooraf al duidelijk dat er grote verschillen zouden kunnen optreden tussen de WAQUA en D-HYDRO modelschematisaties voor de Rijn-Maasmonding. Onder deze omstandigheden kan het effect van het gebruik van andere software (met een ander numeriek schema) namelijk relatief groot zijn. Dit is ook uitgekomen in de analyse. Aspecten m.b.t. de software, het rekenrooster, de modelschematisatie, de gekozen modelleerconcepten en de modelrandvoorwaarden spelen hierbij een rol. Al deze onderdelen beïnvloeden elkaar echter ook, zodat het bepalen van het exacte effect van een specifieke aanpassing op het totaalbeeld niet mogelijk is. Bij de software-aspecten was vooraf al duidelijk dat de discretisatie van de advectietermen een belangrijke rol zou spelen, wat in deze analyse bevestigd is. Daarnaast bleek ook de beschrijving van de getij-afhankelijke ruwheid en de implementatie van de overlaten van grote invloed.

Als alle vorige bevindingen samen worden genomen, dan blijken de waterstandsverschillen tussen het vijfde- en zesde-generatie Rijn-Maasmondingmodel vooral veroorzaakt te worden door de lagere numerieke weerstand in het nieuwe (beter gestroomlijnde) rekenrooster, en ten gevolge van andere numerieke concepten in de gebruikte nieuwe D-HYDRO Suite software (met daarin een andere afhandeling van o.a. advectie, ruwheid en overlaten). Voor beiden wordt gecorrigeerd tijdens de kalibratie van het model, wat resulteert in andere

kalibratiewaarden. Hierdoor is er ook een waterstandsverandering bij afvoeren in het extrapolatiebereik (16.000 tot 24.000 m³/s), omdat daar de kalibratiewaarden uit de hoogste afvoer tijdens de kalibratie worden gebruikt. Hierbij dient te worden opgemerkt dat niet alle kalibratiewaarden afkomstig zijn uit de kalibratie van het RMM-model. Op de riviertakken in het RMM-gebied zijn de kalibratiewaarden bij de hoogste afvoeren afkomstig uit de kalibratie van het Rijntakken- en het Maasmodel. Uit de modelresultaten blijkt dat hierdoor de waterstanden in dit extreme bereik (lokaal) tot 56 cm hoger (en tot 51 cm lager) is. Gelet op de vele aspecten die een rol spelen (rekenrooster, extreme scenario's, vele overlaten met een nieuwe aanpak (Villemonte i.p.v. Tabellenboek), een noodzakelijkerwijs andere numerieke methode vanwege de ongestructureerde roosters, ...) is dit geen onverwacht verschil.

Voor BOI2023 speelt qua specifieke modelveranderingen, naast de overgang naar de zesde generatie, ook een verandering in schematisatie (update van vegetatie en geometrie) en modelrandvoorwaarden (inclusief vernieuwde instellingen voor windschuifspanning) ten opzichte van WBI2017. Deze veranderingen zorgen lokaal voor zowel verhogingen als verlagingen in de waterstand. Als deze veranderingen worden meegenomen, dan lopen de verschillen in het extreme bereik in het geval zonder wind en opzet lokaal met enkele centimeters op. In het geval dat er wel wind en opzet meegenomen wordt, dan zakken de waterstanden door de veranderingen (verlaging in de orde 10-20 cm). Dit is echter geen expliciet gevolg van de overstap naar de zesde-generatie modellen, want deze veranderingen hadden ook plaatsgevonden als binnen de vijfde generatie was gebleven. In deze verschilanalyse is alleen gekeken naar de totale waterstandseffecten bij een gegeven afvoerniveau, zeewaterstand en windconditie, dus zonder het meenemen van de afvoerstatistiek zoals gebruikt binnen BOI.

11.9 Aanbevelingen

Overlaatformulering

Er loopt op dit moment nog nader onderzoek naar de eventuele verdere verbetering van de Villemonte-formulering voor overlaten. Daarbij wordt ook aanbevolen om meer metingen uit te voeren (zowel in het laboratorium als in het veld), zodat de formulering ook in het extremere bereik en voor realistische toepassingen beter getest kan worden.

Modelonzekerheden

De verschilanalyses die uitgevoerd zijn binnen deze rapportage geven ook meer inzicht in de modelonzekerheden binnen de vijfde en zesde generatie. Aanbevolen wordt om een schatting te maken van de nauwkeurigheid van beide modelinstrumentaria bij extrapolatie naar BOI omstandigheden door te berekenen hoe goed het model extrapoleert onder bemeten omstandigheden. Neem hierbij de onzekerheid van extrapolatie expliciet mee en voer deze analyse uit voor alle systemen (Rijn, Maas en Rijnmaasmonding). Hierbij kan worden voortgebouwd op recente raamwerken om dergelijke analyses uit te voeren (Berends, Diermanse & de Jong, 2021; De Jong, 2021), waarin de basis voor deze studie reeds is gelegd.

Validatie

Momenteel is er geen directe vergelijking tussen de validaties van de zesde-generatie D-HYDRO met vijfde-generatie WAQUA mogelijk, omdat de modellen zijn doorgerekend voor andere condities, andere periodes en bijbehorende schematisaties. Er wordt aanbevolen om in de volgende ronde te zorgen dat deze condities, periodes en schematisaties gelijk zijn, zodat deze vergelijking wel kan worden gemaakt. Dit geldt ook voor de vergelijking tussen de overlappende delen van de modelschematisatie van het Rijn-Maasmonding gebied met die van de modelschematisatie van de Rijntakken en de Maas.

12 Referenties

- Agtersloot, R. & A.J. Paarlberg (2016): WAQUA Productieberekeningen Rijn-Maasmonding - Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1220082-001
- Bak, C., & Vlag, D. (1997): Achtergonden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied; Deelrapport 5; Modellerings Waterbeweging (WAQUA). RIZA, rapport 99.042
- Berends, K., Diermanse, F. & de Jong, J. (2021): Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat, Deltares rapport 11206813-018.
- Botterhuis, T., M. Duits & J. Stijnen (2023): Productie databases "Beperkte Set" – Benedenrivieren. HKV rapport PR4836.10
- Botterhuis, T., D. Honingh & J. Stijnen (2022): Minimal Feedforward script - Keringenscript Rijn-Maasmonding. HKV rapport PR4538.10
- Chavarrías, V. (2023): Role of fixed weirs in the 6th generation models for BOI. Deltares memo: 11000641-010-OA-0001_v1.0.25
- Chebab, H. & H. de Waal (2017): Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen – Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1230087-008-HYE-0001.
- Deltares (2017): Horizontal eddy viscosity settings for the 6th generation models, Deltares memo: 11200569-003-ZWS-0013
- Deltares (2022): Aanpassing schematisatie drempel Maeslantkering. Deltares memo: 11208053-004-ZWS-0014
- Deltares (2023): D-Flow Flexible Mesh; Technical Reference manual. Version: 2023 Revision: 78564. 25 August 2023
- Goede, E. D. de (2011): Validatie van Villemonte overlaatformulering in WAQUA met praktijkmetingen, Tech. Rep. 1204153-001-ZWS-0001, Deltares, Delft, 23 pp
- Groenenboom (2022): Inventarisatie winddrag-relaties in zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen. Deltares memo: 11208054-009-ZKS-0002
- Jong, J.S. de & M. Youssef (2016): Riviermodellen in D-HYDRO – Pilotapplicatie Rijntakken - Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de zesde-generatie modellen van RWS. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0012, v1.0 okt 2021
- Jong, J.S. de (2021): Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014, v1.1 okt 2021
- Kaaij, T. van der (2019): Diagnostisch versus prognostisch rekenen zesde-generatie RMM. Deltares rapport 11203714-007-ZWS-0009, sep 2019.
- Kernkamp, H.W.J, Petit, H.A.H., Gerritsen, H., de Goede, E.D. (2005): A unified formulation for the three-dimensional shallow water equations using orthogonal co-ordinates: theory and application. Ocean Dynamics volume 55, pages 351–369

- Kernkamp, H.W.J., van Dam, A., Stelling, G.S., and de Goede, E.D. (2011): Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf, *Ocean Dyn.*, vol. 61, no. 8, pp. 1175–1188
- Minns, T., A. Spruyt, D. Kerkhoven (2022): Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO – Generieke technische en functionele specificaties (v1-2022). Deltares rapport 11208053-012-ZWS-0002.
- Oosterlo, O. (2023): Overstap hydrodynamisch model WBI2017 – BOI2023 Rijn-Maasmonding - Invloed op waterstanden in de Rijn-Maasmonding volgens Hydra-NL-berekeningen met databases op basis van een beperkte sommenset. RWS-memo 15 aug. 2023
- Platzek, F. (2019): Advection errors and grid dependency in numerical river - Comparing codes Telemac, D-Flow FM, UnTRIM and Delft3D. Project report version 1.0
- RWS (2021): Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart – versie 2021.1, 19 juli 2021. Smale, A. (2015): Qh-relatie voor benedenstroomse randvoorwaarden Rijntakken en Maas. Deltares memo 1220082-001-HYE-0001. Februari 2015
- RWS (2023): Oplegnotitie bij Deltares memo: Chavarrías, V. (2023): Role of fixed weirs in 6th generation models for BOI. RWS memo d.d. 14 december 2023.
- Spruyt, A., B.C.A. Domhof. & J.S. de Jong (2024a): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas. Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en randvoorwaarden. Deltares rapport 11209233-003-ZWS-0028
- Spruyt, A., B.C.A. Domhof. & J.S. de Jong (2024b): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijntakken. Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en randvoorwaarden. Deltares rapport 11209233-002-ZWS-0001
- Uittenbogaard, R.E.; Stolker, C.; Goede, E.D. de; Kester, J.A.T.M. van; Jagers, H.R.A. ; Wijbenga, J.H.A. (2005): Eddy viscositeit in WAQUA modellen voor Rijntakken en Maas. WL Delft Hydraulics, Report Q3846
- Veenstra, J. (2022): Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model. Modelbouw, kalibratie en validatie 2D model. Deltares rapport 11208053-004-ZWS-0003, v2.0 nov 2022
- Vledder, G. (2017). Stappenplan aanpassing hydraulische randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag. Van Vledder Consulting, document vvc55m1r4.
- Vossen, B. van, & Uittenbogaard, R. E. (2004): Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water. *Shallow Flows* (pp. 575-582): Taylor & Francis
- Zijl, F., D. Kerkhoven, A.Z. Visser & T. van der Kaaij (2011): WAQUA-model Rijn-Maasmonding - Modelopzet, calibratie en verificatie. Deltares rapport 1202199-005
- Zijlker, T. (2023): Prognostisch versus diagnostisch rekenen in RMM 2D. Analyse van impact prognostisch rekenen op zoutvelden en waterstanden. Deltares rapport 11208053-004-ZWS-0023, v0.2 jan 2023

A Modelschematisaties

A.1 Overzicht gebruikte modelschematisaties voor de verschilanalyses

Tabel A-1 Toegepaste modelschematisaties voor de verschillende verschilanalyses in dit rapport met hun gebruikte instellingen per onderdeel.

onderdeel	code	waq_j15	fm_waq_j15	fm_waq_j15_adv	waq_j15_adv	fm_j19	fm_j19_waq_grid	fm_j19_zo	fm_j19_waq_grid_zo	fm_j13_6	waq_j12_5	fm_j19_waq_visc	fm_j19_tab	fm_j19_wd	fm_beno19	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud	waq_hr2017	waq_hr2017_rvw_oud	fm_hr2023	fm_hr2023_rvw_nieuw
software	WAQUA	x			x						x							x	x		
	D-HYDRO		x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x			x	x
rooster	curvilineair (G5)	x	x	x	x		x		x		x							x	x		
	flexibel (G6)					x		x		x		x	x	x	x	x	x			x	x
overlaten	Tabellenboek	x	x								x		x					x	x		
	Villemonste					x	x			x		x		x	x	x	x			x	x
	geen			x	x			x	x												
viscositeit	WAQUA-waarde (1,0)	x	x								x	x						x	x		
	Smagorinsky					x	x	x	x	x			x	x	x	x	x			x	x
	klein (0,2)			x	x																
wind drag	Van Vledder (2017)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
	Bak & Vlag (1997)													x					x		
geometrie	j12_5										x										
	j13_6									x											
	j15_5	x	x	x	x																
	j19_6					x	x	x	x			x	x	x							
	beno19														x	x	x				
	hr2017																	x	x		
	hr2023																			x	x
trachtyopen	G5	x	x								x							x	x		
	G6					x	x			x		x	x	x	x	x	x			x	x
	geen			x	x			x	x												
ruwheid	G5 kalibratie	x	x								x							x	x		
zomerbed	G6 kalibratie					x	x			x		x	x	x	x	x	x			x	x
	constant (WhiteColebrook 0,2)			x	x			x	x												
structures	G5	x									x							x	x		
	G6		x			x	x			x		x	x	x	x	x	x			x	x
	geen (alleen Volkerak)			x	x			x	x												
thin dams	G5	x	x	x	x						x							x	x		
	G6					x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x			x	x
lateralen	hr2023															x					x
	hr2017																x		x		
	geen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x	

onderdeel	code	Modelcomponenten																			
		waq_j15	fm_waq_j15	fm_waq_j15_adv	waq_j15_adv	fm_j19	fm_j19_waq_grid	fm_j19_zo	fm_j19_waq_grid_zo	fm_j13_6	waq_j12_5	fm_j19_waq_visc	fm_j19_tab	fm_j19_wd	fm_beno19	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud	waq_hr2017	waq_hr2017_rvw_oud	fm_hr2023	fm_hr2023_rvw_nieuw
afvoer	hr2023	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
	hr2017																x		x		
opzet	hr2023															x					x
	hr2017																x		x		
wind	hr2023, zonder zss	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x	
	hr2023	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
	hr2017																x		x		

A.2 Modelopbouw per component

Deze bijlage beschrijft de herkomst van alle modelcomponenten in de twee modelschematisaties die specifiek voor deze verschilanalyse zijn opgezet (fm_waq_j15 en fm_j19_waq_grid). “-” in de tabel betekent dat dit niet is opgenomen in dit model. “(default)” betekent dat dit overgenomen wordt uit j19_6. “Baseline 6” geeft aan dat het bestand uit de Bas2FM methode in Baseline 6 komt. “Matlabconversie” geeft aan dat het bestand uit Matlab conversie scripts voor WAQUA naar D-HYDRO modellen komt.

Tabel A-2 Overzicht van modelcomponenten van modelschematisaties die specifiek voor deze verschilanalyse zijn opgezet.

Modelcomponenten	Extensie	fm_waq_j15	fm_j19_waq_grid
Bedlevel	_net.nc	Matlabconversie	Baseline6
Enclosure	_enc.pli	knip VZM ⁽¹⁾	Baseline6 + verschuiving ⁽⁶⁾
Fixed weirs	_fxw.pliz	Matlabconversie	(default)
Thin dams	_thd.pli	Matlabconversie	(default)
Dry points	_dry.xyz	Matlabconversie	(default)
Roughness area	_trachytopes.arl	Matlabconversie	Baseline6
Trachytopo definitions	*.tttd	Matlabconversie + Q-afhankelijk fix ⁽²⁾	(default)
Calibration sections	_calibration.cll	Baseline6	Baseline6
Calibration factors	*.cld	Eb-vloed en Q-afhankelijke ruwheden ⁽³⁾	(default)
Bridges	_bridges.pliz	-	(default)
Structures	structures_*.ini	(default)	(default)
Boundary locations	.pli	Matlabconversie	(default) + verschuiving ⁽⁶⁾
ObservationPoints	_obs.xyz	Matlabconversie + fix ⁽⁴⁾	(default)
CrossSections	_crs.pli	Matlabconversie + fix ⁽⁵⁾	(default)

⁽¹⁾ Er is met de hand een enclosure geklikt, waarbij het Volkerak-Zoommeer wordt afgeknipt zoals ook in WAQUA gebeurt door het VZM domein niet mee te nemen.

⁽²⁾ In het trachytopen bestand wat uit de matlabconversie komt zijn de afvoerafhankelijke ruwheden uitgezet. Deze zijn vervolgens toegevoegd aan het kalibratie bestand (zie ⁽³⁾).

⁽³⁾ Er is een kalibratiebestand gemaakt met daarin de eb-vloed ruwheden en de afvoerafhankelijke ruwheden.

⁽⁴⁾ In het observationpoints bestand uit de matlabconversie zijn dubbele locaties verwijderd. Ook zijn er enkele locaties toegevoegd ten behoeve van de structures.

⁽⁵⁾ In het crosssections bestand uit de matlabconversie zijn punten van raaien verwijderd omdat deze versprongen naar een ander deel van het model. Ook zijn er raaien toegevoegd voor de afvoerafhankelijke ruwheden.

⁽⁶⁾ De zeerand van het WAQUA rooster is naar buiten verschoven om deze op dezelfde locatie te leggen als de zeerand in het D-HYDRO model, zie ook paragraaf A.3.1.

A.3 Aanpassingen aan modelschematisaties

In deze bijlage worden aanpassingen aan de verschillende modelschematisaties beschreven, welke zijn gedaan voor deze verschilanalyse. Het gaat hierbij niet om de specifiek opgezette modellen (die zijn beschreven in bijlage A.2), maar om aanpassingen aan bestaande modelschematisaties.

A.3.1 Zeerand Voordelta Haringvliet

Zoals in paragraaf 2.5.2 al genoemd zijn er twee verschillende liggingen van de modelrand in de Voordelta van het Haringvliet. In de vijfde-generatie modellen ligt de rand wat verder landwaarts ('aan de binnenkant'), wanneer vergeleken met de zesde-generatie modellen (meer zeewaarts, 'aan de buitenkant'). Om een goede vergelijking te kunnen maken in de verschilanalyse is het voor een aantal modellen nodig om de zeerand te verplaatsen, zodat deze in de vergelijking op dezelfde locatie ligt. Dit is het geval bij de volgende modellen:

- In waq_j12_5 is de zeerand verschoven naar de buitenkant, zodat deze gelijk is aan de locatie van de rand in fm_j13_6.
- In fm_j19_waq_grid is de rand verschoven naar de buitenkant, zodat deze gelijk is aan de locatie van de rand in fm_j19.
- De enige vergelijking met in beide modellen de zeerand aan de binnenkant is de software vergelijking. Bij fm_waq_j15 en waq_j15 ligt de rand dus op meer de landwaartse locatie.
- In de vergelijking tussen waq_hr2017 en fm_hr2023 is de zeerand niet gelijk tussen beide modellen. In waq_hr2017 ligt de rand aan de binnenkant, terwijl deze bij fm_hr2023 aan de buitenkant ligt. De reden hiervoor is dat de onaangepaste modellen met elkaar vergeleken worden.

A.3.2 Aanpassingen aan kunstwerken

In D-HYDRO zijn de keringen op een aantal aspecten aangepast. De hoofdreden hiervoor is dat keringen bij extreme condities kunnen overstromen, of dat er kortsluiting tussen de Waal en de Maas kon plaatsvinden. De volgende aanpassingen zijn gedaan:

- De *GateHeight* van de Kromme Nolkering is verhoogd van 9m naar 19m.
- De *GateHeight* van de Volkeraksluizen is verhoogd, van 7,75m naar 17,75m.
- Er is een kering toegevoegd bij St. Andries en bij de Wilhelminasluisen, waardoor hier altijd een dichte barrière ligt.
- Bij simulaties zonder kunstwerken zijn de Volkeraksluizen in het model gehouden, omdat deze doorgang afgesloten dient te blijven. Het gebied achter de Volkeraksluizen is geen onderdeel van deze verschilanalyse.

In WAQUA zijn de definities van de Maeslantkering aangepast. De *gate height* stond hier op 7m en de *sill depth* op -7m, waardoor er bij een waterstand hoger dan 7m geen vrije doorstroom meer is. Om deze reden zijn de *gate height* en *sill depth* op respectievelijk 98m en -98m gezet. Daarnaast is de *sill depth* van de Hartelkering verhoogd naar -6,5m (deze was -7m) om deze gelijk te maken aan de D-HYDRO modellen.

A.3.3 Aanpassingen aan thin dams/schotjes

In alle modellen behalve de hr modellen zijn thin dams (D-HYDRO) of schotjes (WAQUA) toegevoegd op de volgende locaties:

- Afgedamde Maas, zodat het Heusdens Kanaal echt is afgesloten als de Kromme Nolkering gesloten is.
- Maeslantkering-Rozenburg, zodat er geen water vanuit de Nieuwe Waterweg naar het Calandkanaal kan stromen.
- Hollandsche IJssel, zodat er geen water langs de kering kan stromen.
- Langs het Oude Maasje

A.3.4 Overige aanpassingen

Ten slotte zijn er nog een aantal kleine aanpassingen aan de modellen:

- In de WAQUA ruwheden zijn een aantal ruwheidscodes verwijderd omdat deze niet in het modeldomein lagen. Omdat er met een nieuwere versie van Simona (versie 2019) wordt gerekend, geeft dit foutmeldingen.
- De randvoorwaarden van D-HYDRO en WAQUA zijn in de tijd gelijk getrokken.
- Het Volkerak-Zoommeer is bij alle modellen uit de schematisatie geknipt. In D-HYDRO is dit gedaan door aanpassing van de enclosure, in WAQUA door het domein VZM niet te gebruiken.

B Extra analyses software

In deze bijlage worden de resultaten van een aantal extra verschilanalyses weergegeven om bepaalde tussenstappen te onderbouwen voor het totale effect van software.

B.1 Effect software met kleine viscositeit

In WAQUA en D-HYDRO wordt de algemene afhandeling van viscositeit anders uitgevoerd. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software is gekeken, herhaald waarbij zowel voor WAQUA als D-HYDRO in het hele model de viscositeit een kleine waarde van 0,2 heeft gekregen.

Tabel B-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

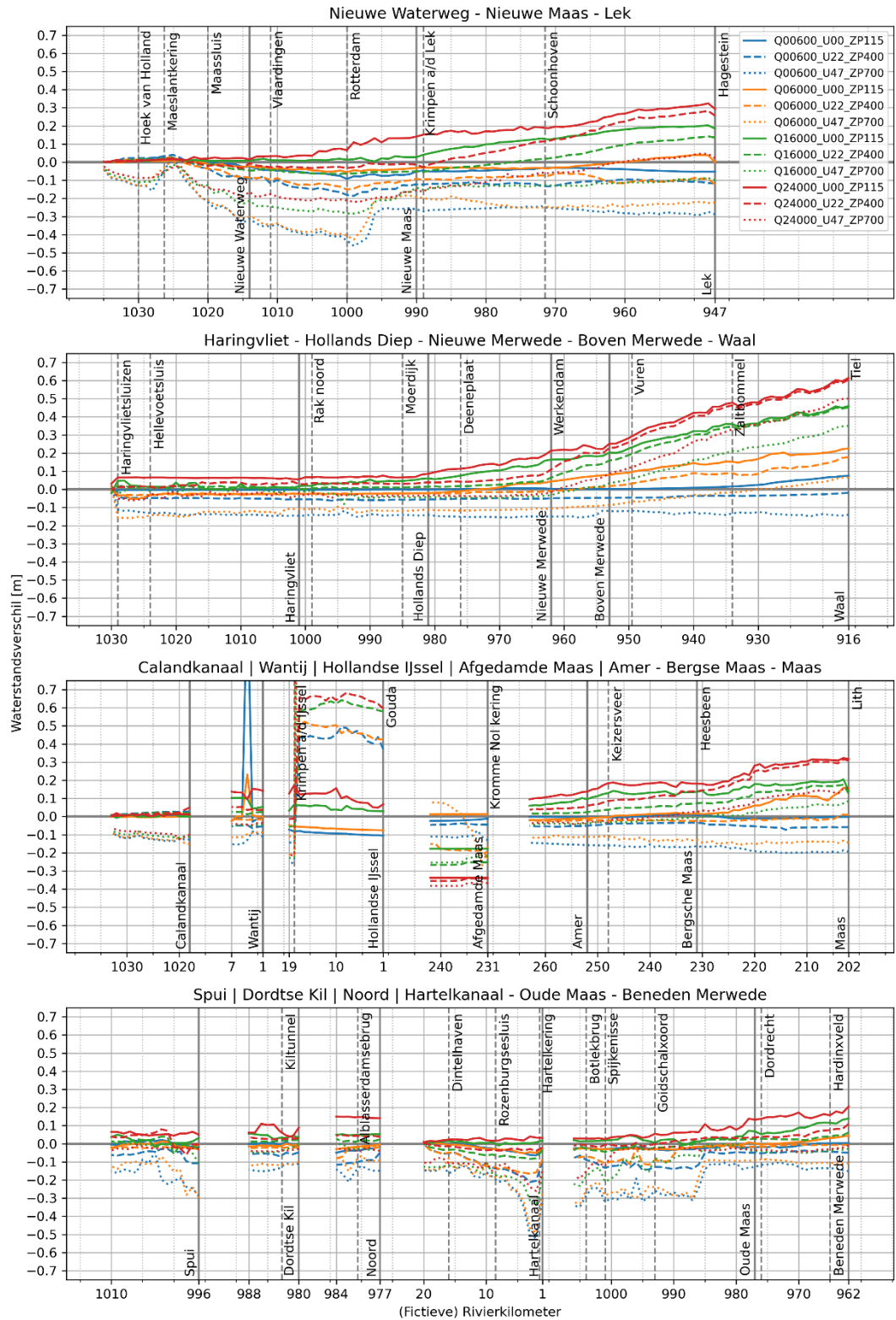
Tabel B-3 Instellingen van variant (*fm_waq_j15_visc*) en referentie (*waq_j15_visc*) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software met een kleine viscositeit.

	variant	referentie
	waq_j15_visc02	fm_waq_j15_visc02
Software	WAQUA	D-HYDRO
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	klein (0,2)*	klein (0,2)*
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	G5	G5
Ruwheid zomerbed	G5	G5
Structures	G5	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

* Op de bovenstroomse randen bij de Lek en Waal en bij de Haringvlietsluizen wordt lokaal een viscositeit van 10 m²/s toegepast. Bij de zeerand van de Maasmond wordt lokaal een viscositeit van 100 m²/s toegepast. Dit is beschreven in paragraaf 2.4.1.

Resultaten

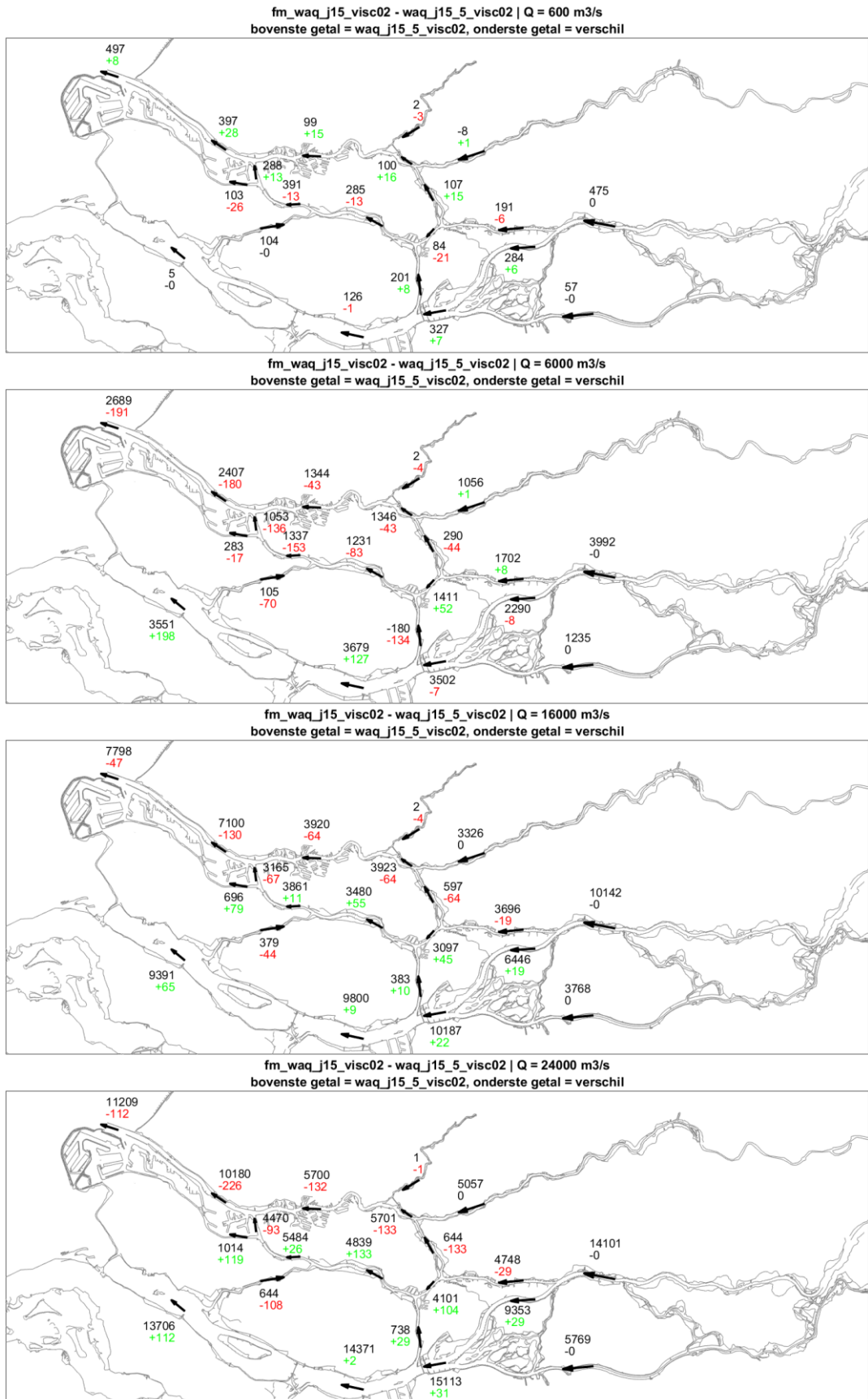
Figuur B-1 presenteert het effect van de overstap naar de nieuwe software met een kleine viscositeit, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel B-4 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur B-1. Figuur B-2 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur B-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware met een kleine viscositeit (fm_waq_j15_visc02 t.o.v. waq_j15_visc02) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel B-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware met een kleine viscositeit (fm_waq_j15_visc02 t.o.v. waq_j15_visc02) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.039	0.026	-0.093	0.025
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.101	0.051	-0.186	0.041
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.272	0.085	-0.462	0.036
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.018	0.024	-0.055	0.040
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.082	0.040	-0.151	0.029
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.242	0.083	-0.427	0.015
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.077	0.073	0.003	0.203
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.006	0.063	-0.065	0.142
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.156	0.065	-0.283	-0.013
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.138	0.101	0.004	0.324
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.066	0.105	-0.033	0.283
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.102	0.081	-0.220	0.047
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.008	0.019	-0.005	0.074
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.047	0.009	-0.062	-0.019
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.139	0.010	-0.155	-0.112
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.046	0.085	-0.052	0.225
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.016	0.058	-0.036	0.178
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.085	0.057	-0.159	0.066
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.155	0.148	-0.002	0.459
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.126	0.152	0.001	0.453
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.051	0.117	-0.081	0.350
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.217	0.180	0.055	0.614
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.178	0.194	0.007	0.604
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.085	0.173	-0.063	0.501
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.002	0.006	-0.011	0.012
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.049	0.010	-0.073	-0.034
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.173	0.018	-0.200	-0.145
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.036	0.050	-0.019	0.158
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.019	0.007	-0.026	0.012
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.131	0.014	-0.157	-0.100
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.136	0.039	0.059	0.205
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.082	0.053	0.016	0.175
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.002	0.039	-0.045	0.086
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.206	0.070	0.095	0.323
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.158	0.093	0.037	0.316
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.038	0.065	-0.043	0.155



Figuur B-2 Afvoerverdeling en verschillen (in m^3/s) ten gevolge van andere rekensoftware met een kleine viscositeit ($fm_waq_j15_visc02$ t.o.v. waq_j15_visc02) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De gevonden verschillen zijn sterk vergelijkbaar met die uit paragraaf 5.1. Als gevolg van de kleinere viscositeit ontstaan grotere verschillen, maar het effect ten opzichte van de verschillen in paragraaf 5.1 is klein (enkele centimeters).

B.2 Effect software met constante ruwheid

In zowel WAQUA als D-HYDRO wordt de ruwheid meegenomen via een zogeheten ‘trachytopen’ definitie om ruimtelijk afhankelijke (ecotopen) ruwheid mee te kunnen nemen. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software is gekeken, herhaald waarbij zowel voor WAQUA als D-HYDRO in het hele model een constante ruwheid is toegepast (WhiteColebrook 0,2).

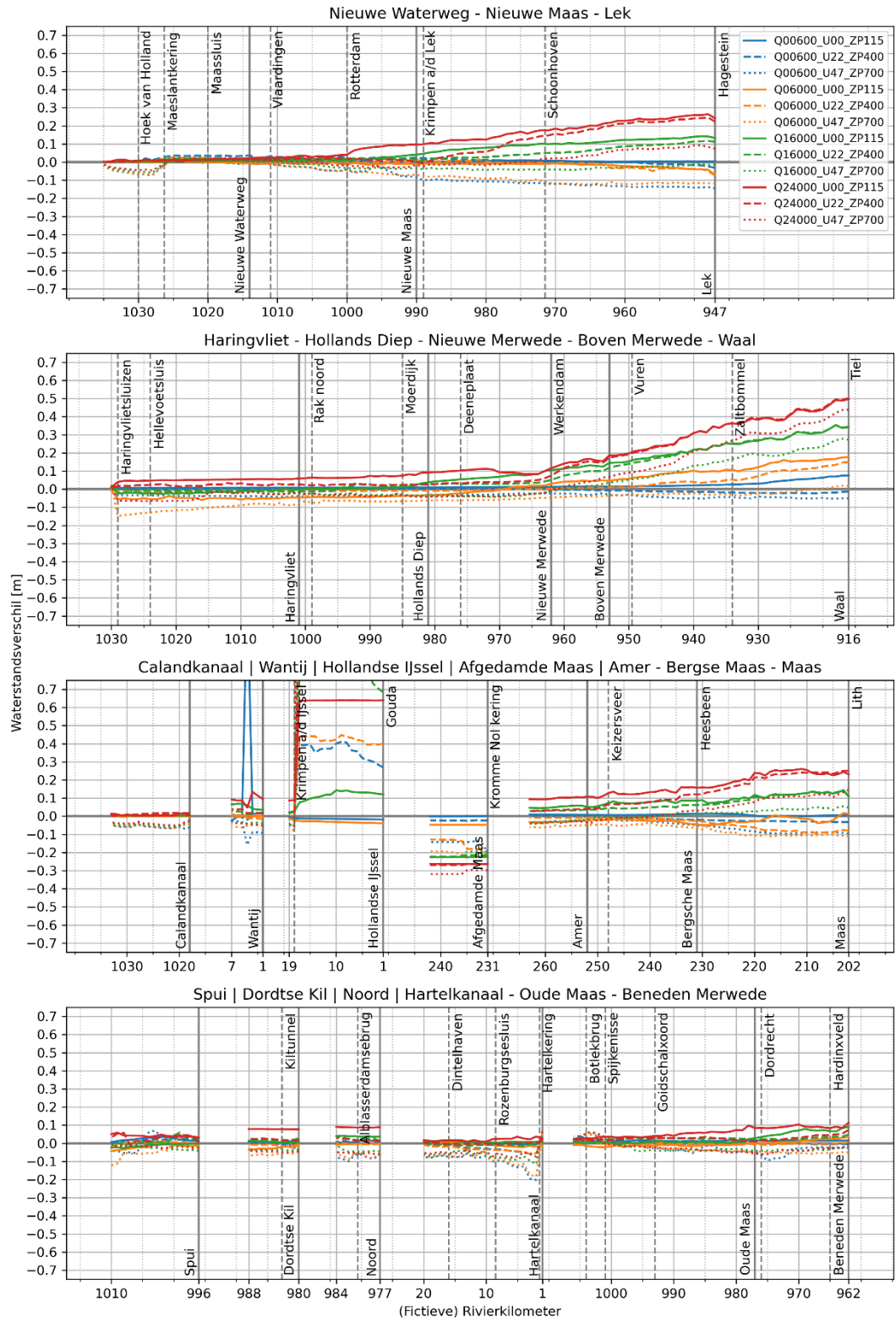
Tabel B-5 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel B-5 Instellingen van variant (fm_waq_j15_wc02) en referentie (waq_j15_wc02) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software met een constante ruwheid.

	variant	referentie
	waq_j15_wc02	fm_waq_j15_wc02
Software	WAQUA	D-HYDRO
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1,0)	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	geen	geen
Ruwheid zomerbed	constant (WhiteColebrook 0,2)	constant (WhiteColebrook 0,2)
Structures	G5	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

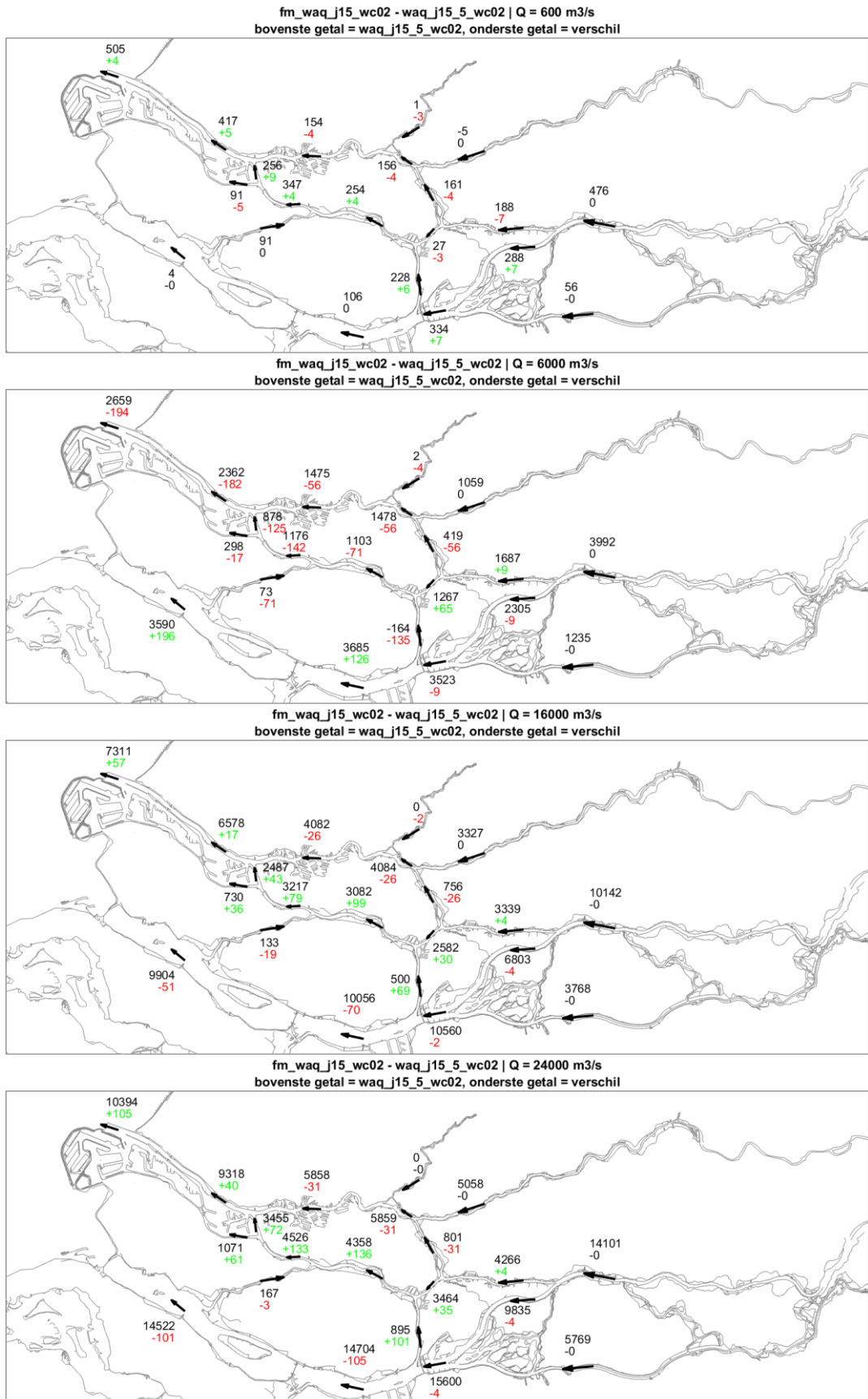
Figuur B-3 presenteert het effect van de overstap naar de nieuwe software, waarbij in het hele model een constante ruwheid is gebruikt, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel B-8 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur B-3. Figuur B-4 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur B-3 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware met een constante ruwheid (fm_waq_j15_wc02 t.o.v. waq_j15_wc02) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel B-6 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware met een constante ruwheid (fm_waq_j15_wc02 t.o.v. waq_j15_wc02) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

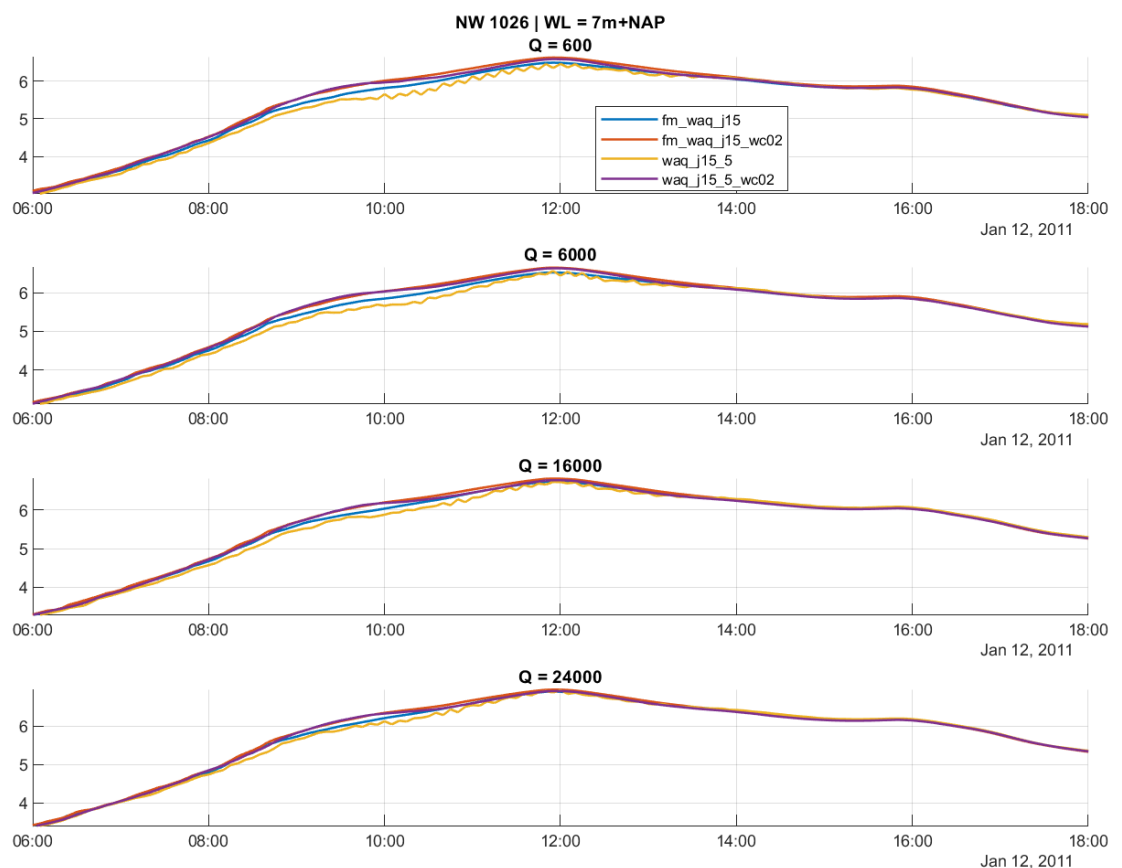
Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.008	0.006	-0.005	0.020
	600	22 m/s, 4,0 m	0.013	0.017	-0.031	0.038
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.077	0.051	-0.147	0.024
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.012	0.012	-0.069	0.006
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.020	-0.075	0.027
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.070	0.043	-0.127	0.020
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.057	0.050	0.001	0.143
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.040	0.032	0.002	0.116
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.025	0.020	-0.059	0.019
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.112	0.086	0.004	0.264
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.081	0.087	-0.006	0.246
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.012	0.037	-0.046	0.092
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.018	0.016	0.007	0.075
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.009	-0.023	0.006
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.038	0.008	-0.052	-0.022
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.020	0.075	-0.060	0.177
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.016	0.043	-0.018	0.150
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.058	0.036	-0.149	0.019
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.098	0.116	-0.026	0.353
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.092	0.116	-0.014	0.353
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.036	0.094	-0.042	0.278
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.165	0.138	0.040	0.498
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.140	0.156	0.015	0.501
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.064	0.149	-0.067	0.439
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.007	0.004	-0.001	0.014
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.017	0.012	-0.033	0.002
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.054	0.029	-0.096	-0.020
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.025	0.014	-0.049	0.017
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.039	0.032	-0.095	-0.007
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.074	0.026	-0.112	-0.033
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.087	0.028	0.044	0.144
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.072	0.037	0.028	0.140
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.009	0.027	-0.041	0.055
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.167	0.057	0.092	0.261
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.130	0.080	0.027	0.251
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.036	0.058	-0.042	0.147



Figuur B-4 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van andere rekensoftware met een constante ruwheid (fm_waq_j15_wc02 t.o.v. waq_j15_wc02) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Bij de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas zijn grote verschillen te zien ten opzichte van de vergelijking in paragraaf 5.1 (orde 40cm). Met een constante ruwheid zijn de waterstandsverschillen op een groot gedeelte van Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas bovenstrooms van de Maeslantkering bijna 0. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de verschillen op dit traject bij het totale software effect in paragraaf 5.1 het gevolg zijn van de getij-afhankelijke ruwheid. In WAQUA ontstaan hier instabiliteitsgolven, zoals te zien aan de gele lijn in Figuur B-5. De instabiliteit ontstaat doordat de eb-vloed gerelateerde bodemruwheid wordt bepaald aan de hand van waterstandsverschillen. Bij een beginnende waterstandsverstoring ontstaan daardoor foutieve bodemruweden die de instabiliteitsgolven kunnen versterken. In D-HYDRO wordt de eb-vloed gerelateerde ruwheid gebaseerd op positieve/negatieve debieten. Hierdoor ontstaat deze instabiliteit niet in D-HYDRO.

Verder zijn er bovenstrooms op de riviertakken nog kleine effecten te zien tot circa 10 cm, waarbij de waterstandsverschillen kleiner worden als gevolg van een constante ruwheid.



Figuur B-5 Waterstandtijdseries voor D-HYDRO (blauwe en rode lijnen) en WAQUA (gele en paarse lijnen) met getijafhankelijke ruwheid (blauwe en gele lijnen) en constante ruwheid (rode en paarse lijnen) op de Nieuwe Waterweg rivierkilometer 1026.

B.3 Effect software zonder overlaten

In WAQUA en D-HYDRO wordt de algemene afhandeling van overlaten net iets anders uitgevoerd. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software is gekeken, herhaald waarbij zowel voor WAQUA als D-HYDRO in het hele model de overlaten zijn verwijderd.

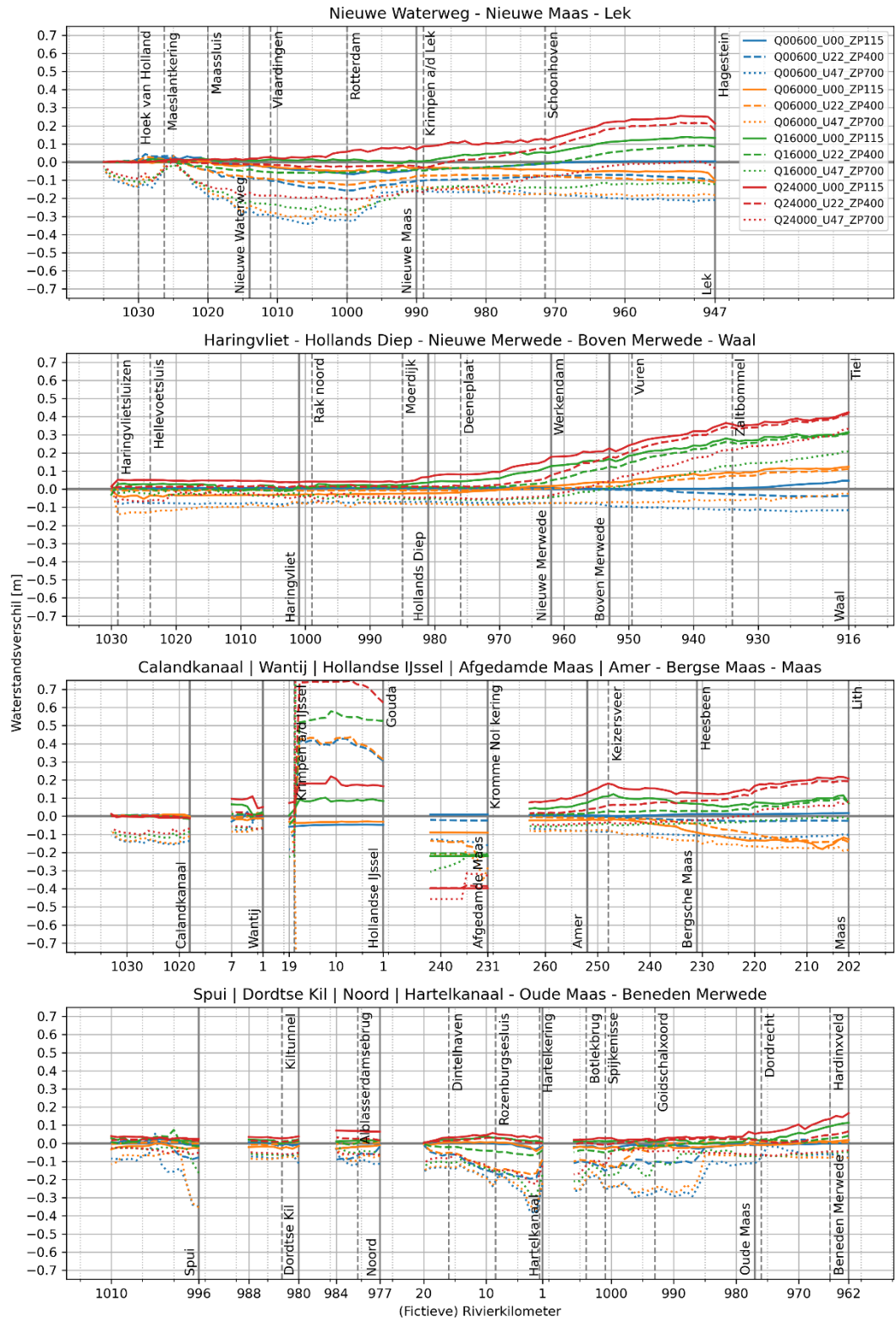
Tabel B-7 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel B-7 Instellingen van variant (*fm_waq_j15_zo*) en referentie (*waq_j15_zo*) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software zonder overlaten.

	variant	referentie
	<i>waq_j15_zo</i>	<i>fm_waq_j15_zo</i>
Software	WAQUA	D-HYDRO
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Geen	Geen
Viscositeit	WAQUA-waarde (1,0)	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	G5	G5
Ruwheid zomerbed	G5	G5
Structures	G5	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

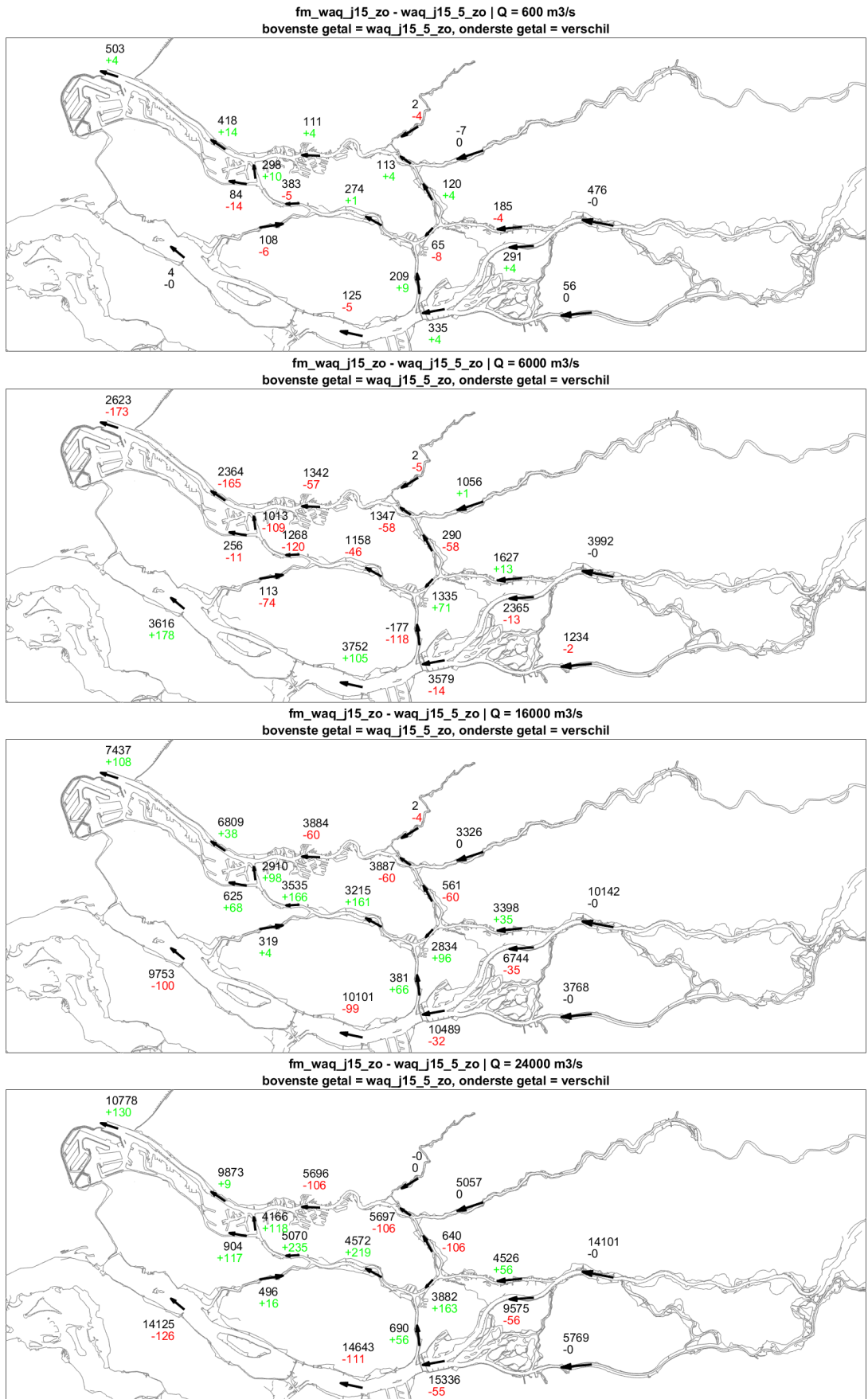
Figuur B-6 presenteert het effect van de overstap naar de nieuwe software, waarbij in het hele model alle overlaten zijn verwijderd, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel B-8 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur B-6. Figuur B-7 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur B-6 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware zonder overlagen (fm_waq_j15_zo t.o.v. waq_j15_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel B-8 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware zonder overlaten (fm_waq_j15_zo t.o.v. waq_j15_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.017	0.025	-0.067	0.031
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.084	0.043	-0.158	0.044
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.202	0.070	-0.340	0.031
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.035	0.019	-0.100	0.005
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.078	0.035	-0.126	0.030
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.183	0.065	-0.311	0.039
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.044	0.047	-0.005	0.139
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.008	0.048	-0.060	0.092
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.158	0.058	-0.268	-0.015
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.101	0.083	-0.004	0.255
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.050	0.087	-0.031	0.218
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.110	0.070	-0.208	0.010
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.009	0.009	0.001	0.047
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.006	0.015	-0.040	0.007
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.087	0.018	-0.123	-0.064
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.017	0.055	-0.054	0.123
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.020	0.038	-0.011	0.112
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.079	0.023	-0.140	-0.025
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.114	0.109	-0.008	0.315
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.088	0.111	-0.010	0.308
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.013	0.081	-0.059	0.208
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.162	0.133	0.037	0.424
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.125	0.143	0.010	0.417
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.041	0.122	-0.069	0.334
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.009	0.004	0.002	0.017
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.016	0.011	-0.028	0.004
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.100	0.016	-0.125	-0.069
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.080	0.054	-0.182	-0.018
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.060	0.052	-0.144	-0.006
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.131	0.039	-0.191	-0.076
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.077	0.021	0.041	0.122
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.038	0.025	0.010	0.099
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.035	0.016	-0.057	-0.004
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.149	0.039	0.076	0.218
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.097	0.058	0.016	0.194
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.006	0.041	-0.048	0.081



Figuur B-7 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van andere rekensoftware zonder overlaten (fm_waq_j15_zo t.o.v. waq_j15_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

Zonder de overlaten worden de verschillen wat kleiner, vergeleken met die uit paragraaf 5.1. De grootste verschillen zijn te zien bij de riviertakken waar de waterstandsverschillen tot circa 20 cm kleiner worden zonder overlaten.

B.4 Effect software zonder kunstwerken

In WAQUA en D-HYDRO wordt de algemene afhandeling van kunstwerken anders uitgevoerd. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software is gekeken, herhaald waarbij zowel voor WAQUA als D-HYDRO in het hele model de kunstwerken zijn verwijderd.

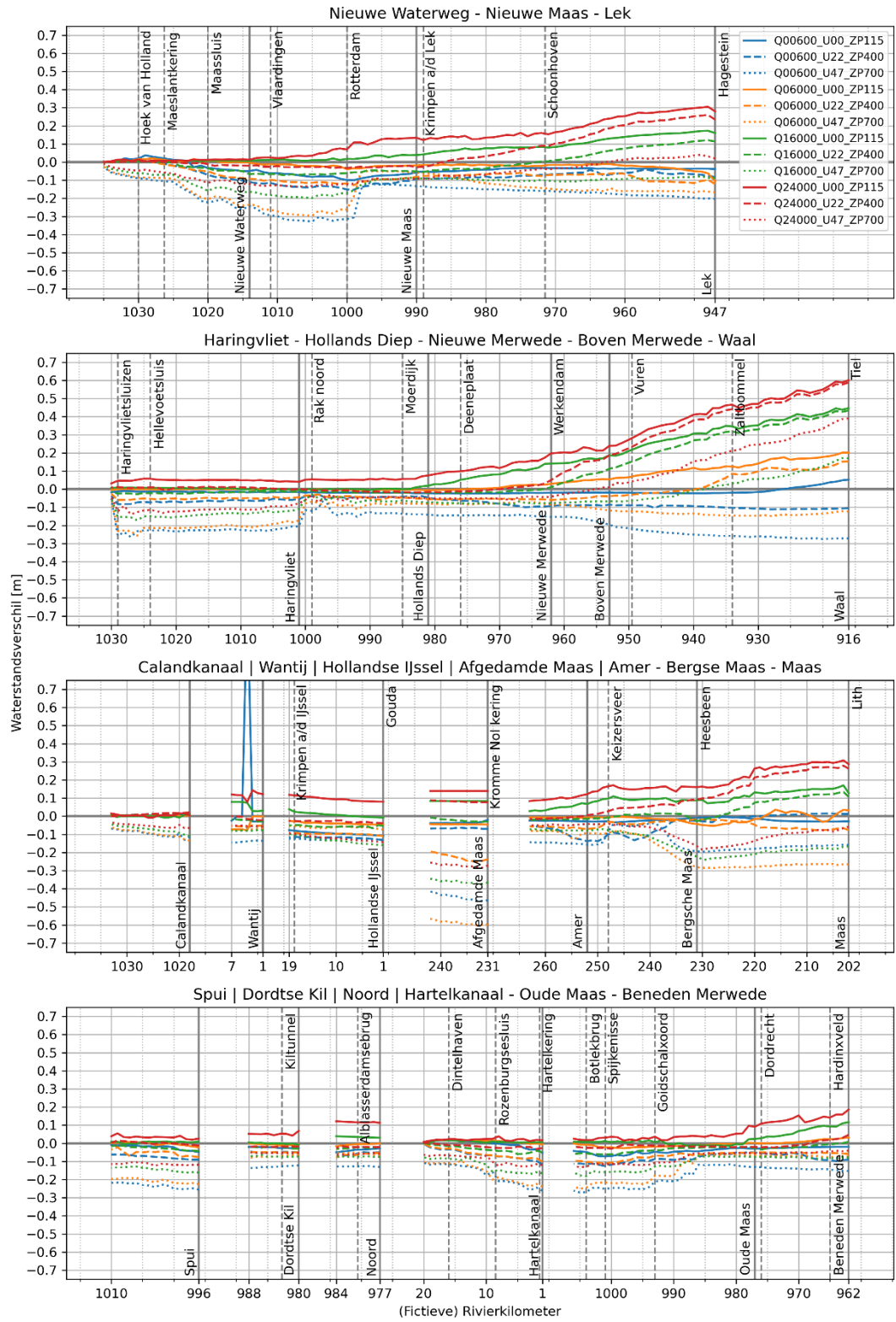
Tabel B-7 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel B-9 Instellingen van variant (fm_waq_j15_zk) en referentie (waq_j15_zk) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software zonder kunstwerken.

	variant	referentie
	waq_j15_zk	fm_waq_j15_zk
Software	WAQUA	D-HYDRO
Rooster	curvilineair (oud)	curvilineair (oud)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1,0)	WAQUA-waarde (1,0)
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Schematisatie		
Geometrie	j15_5	j15_5
Trachytopen	G5	G5
Ruwheid zomerbed	G5	G5
Structures	geen (alleen Volkerak)	geen (alleen Volkerak)
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

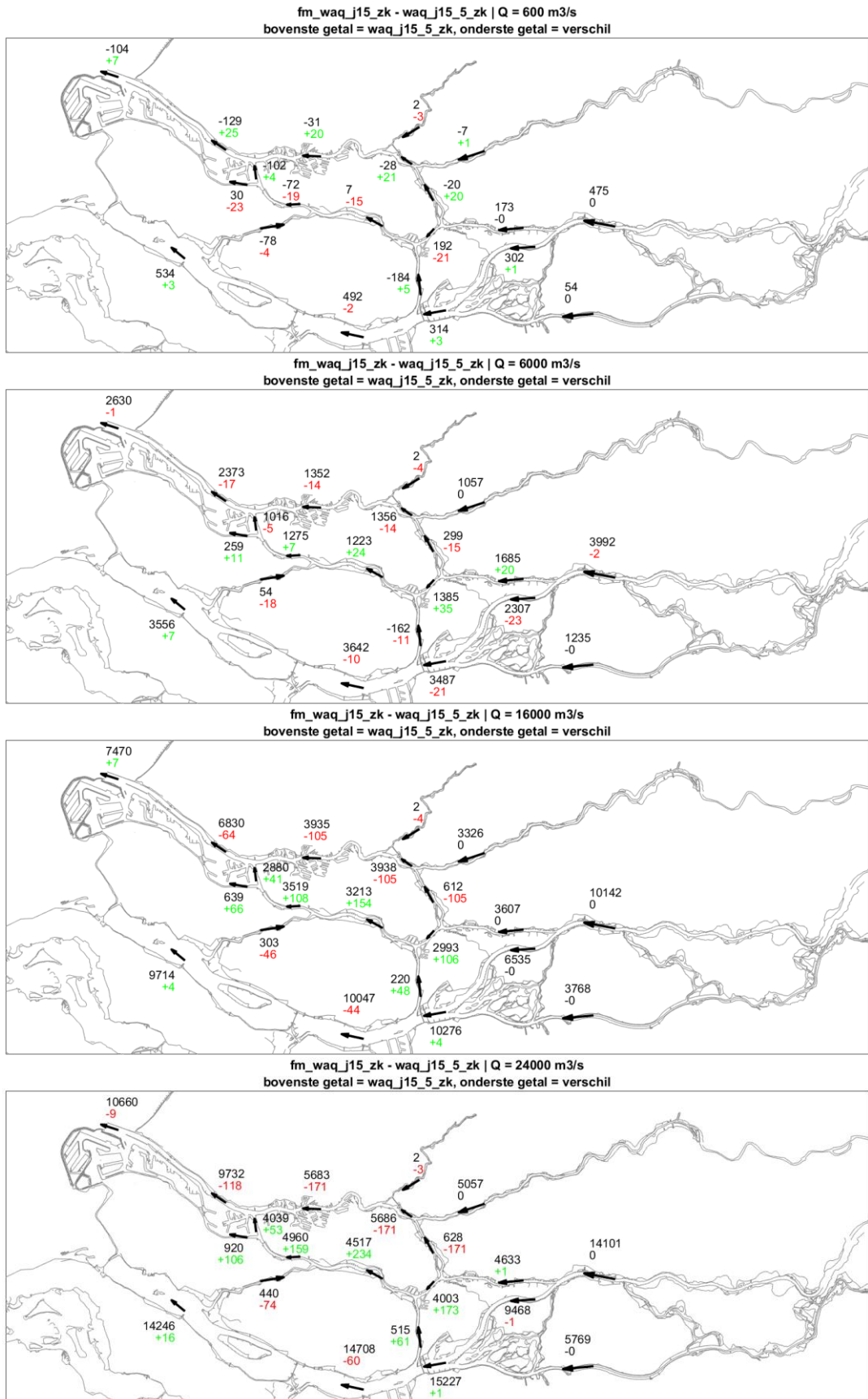
Figuur B-8 presenteert het effect van de overstap naar de nieuwe software, waarbij in het hele model alle kunstwerken (behalve Volkerak) zijn verwijderd, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel B-10 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur B-8. Figuur B-9 presenteert de afvoerverdeling en het afvoerverschil in de riviertakken voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.



Figuur B-8 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware zonder kunstwerken (fm_waq_j15_zk t.o.v. waq_j15_zk) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel B-10 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware zonder kunstwerken (fm_waq_j15_zk t.o.v. waq_j15_zk) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	-0.043	0.028	-0.100	0.038
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.081	0.039	-0.153	0.016
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.187	0.067	-0.328	-0.068
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.017	0.018	-0.106	0.021
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.078	0.032	-0.127	0.011
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.154	0.071	-0.296	-0.051
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.062	0.055	0.003	0.173
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.007	0.058	-0.072	0.120
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.114	0.039	-0.198	-0.046
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.125	0.095	0.004	0.305
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.055	0.098	-0.033	0.259
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.062	0.053	-0.134	0.040
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	-0.014	0.015	-0.025	0.052
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.077	0.023	-0.111	-0.028
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.200	0.054	-0.275	-0.050
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.047	0.064	-0.007	0.202
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.016	0.061	-0.060	0.153
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.133	0.051	-0.256	-0.067
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.135	0.152	-0.012	0.446
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.093	0.155	-0.028	0.433
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.054	0.079	-0.172	0.171
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.204	0.183	0.040	0.601
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.146	0.202	-0.018	0.589
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.020	0.145	-0.139	0.391
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	-0.022	0.009	-0.034	-0.004
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.044	0.052	-0.138	0.015
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.145	0.047	-0.196	-0.038
	6000	0 m/s, 1,15 m	-0.010	0.022	-0.053	0.036
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.049	0.020	-0.078	-0.017
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.197	0.086	-0.286	-0.080
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.098	0.036	0.028	0.170
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.032	0.052	-0.028	0.134
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.151	0.059	-0.240	-0.071
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.188	0.071	0.083	0.308
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.114	0.102	-0.016	0.279
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.091	0.045	-0.185	-0.041



Figuur B-9 Afvoerverdeling en verschillen (in m³/s) ten gevolge van andere rekensoftware zonder kunstwerken (fm_waq_j15_zk t.o.v. waq_j15_zk) voor de verschillende stationaire afvoeren, zonder wind en opzet.

De verschillen die bij de Maeslantkering naar 0 gingen in paragraaf 5.1 zijn in deze vergelijking zonder kunstwerken niet meer te zien. Dit betekent dat dit effect wordt veroorzaakt door de kunstwerken. Hoewel de Maeslantkering in de vergelijking in paragraaf 5.1 geheel open staat, zit de drempel daar nog wel in het model. In de modellen in deze paragraaf is het gehele kunstwerk, inclusief drempel verwijderd. Dit veroorzaakt in beide modellen een andere stroming en opstuwning waardoor de verschillen ontstaan.

Bij extreem harde wind en hoge zeewaterstand zijn grotere verschillen te zien op het Haringvliet, in de Waal en de Maas (circa -10cm, wanneer vergeleken met paragraaf 5.1). Op de Lek zijn de verschillen juist kleiner (ook circa 10cm). Bij de andere sommen is de invloed gering.

C Extra analyses wind

In deze bijlage worden de resultaten van twee extra vershilanalyses weergegeven, gerelateerd aan windinstellingen.

C.1 Effect wind met partial dry

In WAQUA en D-HYDRO wordt de afhandeling van wind op gedeeltelijk droge flow links anders uitgevoerd. In D-HYDRO is er de optie om een gereduceerde windschuifspanning op te leggen op gedeeltelijk droge flow links (windpartialdry = 1). Deze instelling staat standaard aan en wordt ook in fm_j19 toegepast. In WAQUA bestaat deze optie niet. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in beeld te brengen, wordt een vergelijking gemaakt met (fm_j19) en zonder (fm_j19_pd0) gereduceerde windschuifspanning.

Tabel C-11 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

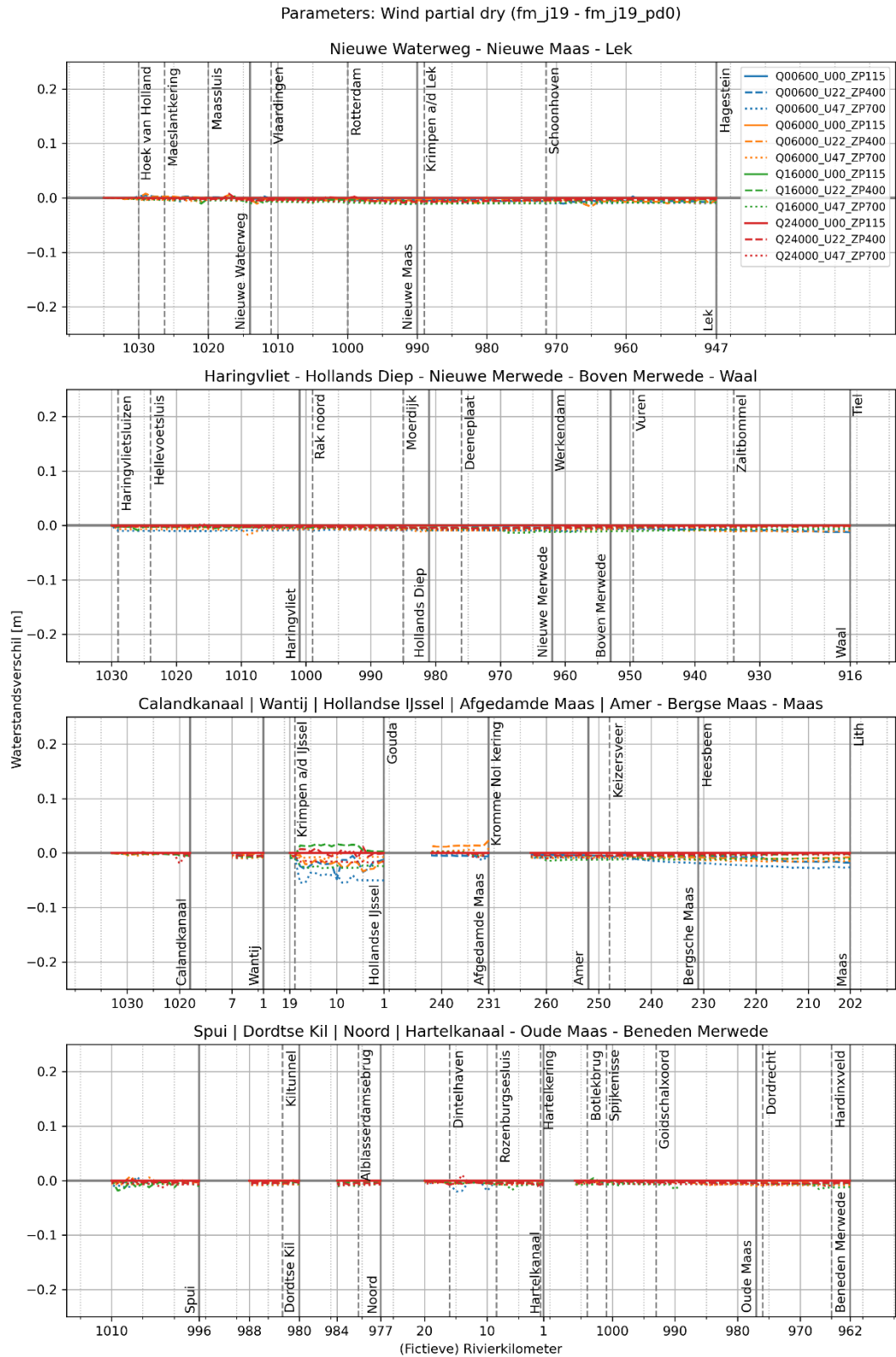
Tabel C-11 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_pd0) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een andere windschuifspanningscoëfficiënt.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_pd0
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Wind partial dry	Ja	Nee
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur C-10 presenteert het effect van een gereduceerde windschuifspanning op droge flow links, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel C-12 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur C-10.

Er zijn geen resultaten gepresenteerd voor de afvoerverdeling en het afvoerverschil over de splitsingspunten omdat er geen verschillen zijn voor de sommen zonder wind en opzet.



Figuur C-10 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een reductie op windschuifspanning (fm_j19 t.o.v. fm_j19_pd0) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel C-12 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een reductie op windschuifspanning (fm_j19 t.o.v. fm_j19_pd0) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.003	-0.011	0.005
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.007	0.003	-0.012	0.000
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.004	0.004	-0.016	0.008
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.007	0.002	-0.010	0.002
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.004	0.002	-0.010	0.003
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.008	0.003	-0.011	-0.000
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.003	-0.009	0.008
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.004	0.001	-0.007	-0.000
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.005	0.003	-0.013	0.000
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.008	0.001	-0.011	-0.005
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.001	-0.005	0.000
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.009	0.002	-0.017	-0.004
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.002	-0.009	0.001
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.006	0.003	-0.014	-0.001
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.002	0.001	-0.006	0.003
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.004	0.002	-0.009	0.000
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	-0.009	0.005	-0.018	-0.003
	600	47 m/s, 7,0 m	-0.018	0.007	-0.028	-0.008
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	-0.008	0.002	-0.011	-0.004
	6000	47 m/s, 7,0 m	-0.012	0.003	-0.016	-0.007
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	-0.004	0.001	-0.006	-0.002
	16000	47 m/s, 7,0 m	-0.011	0.001	-0.014	-0.007
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	-0.003	0.001	-0.005	-0.001
	24000	47 m/s, 7,0 m	-0.005	0.002	-0.010	-0.003

De verschillen zijn zeer klein tot maximaal -3cm op de Maas. Alleen op de Hollandsche IJssel zijn iets grotere verschillen te zien tot maximaal -5cm. De gereduceerde windschuifspanning heeft dus weinig invloed op de resultaten.

C.2 Effect wind met hu of zws gebaseerd

In zowel WAQUA als D-HYDRO wordt de wind meegenomen op basis van Hu (waterdiepte in snelheid), zoals in Delft3D. In D-HYDRO is ook de optie mogelijk om het toepassen van de wind te baseren op de eindige volume methode van omliggende waterdieptes (Zws). Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in beeld te brengen, wordt een vergelijking gemaakt met Hu gebaseerde (fm_j19) en eindige volume gebaseerde (fm_j19_zws) wind.

Tabel C-13 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

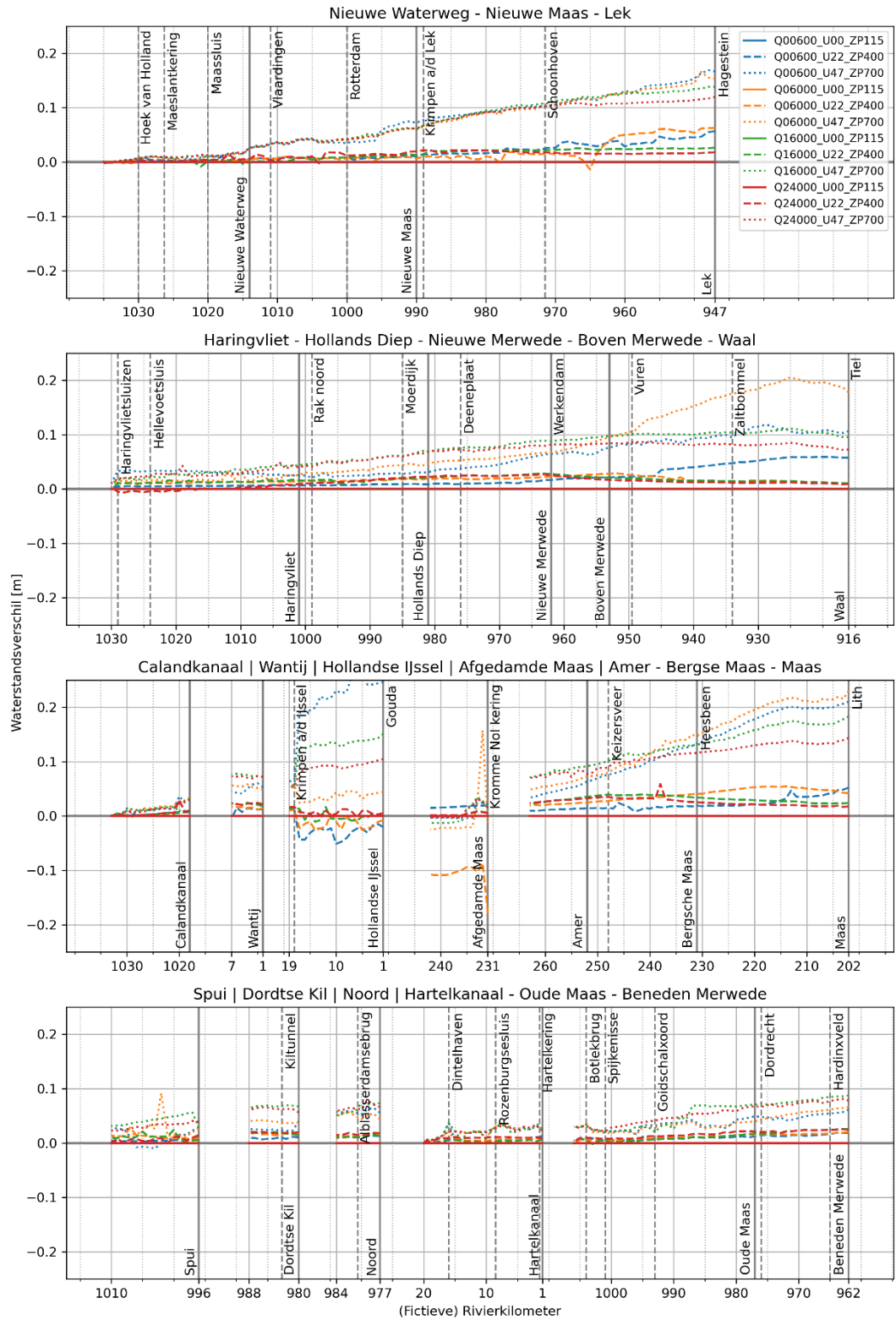
Tabel C-13 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j19_zws) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door een andere windbenadering.

	variant	referentie
	fm_j19	fm_j19_zws
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (nieuw)	flexibel (nieuw)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinsky	Smagorinsky
Wind drag	Van Vledder (2017)	Van Vledder (2017)
Wind hu of zws gebaseerd	Hu	Zws
Schematisatie		
Geometrie	j19_6	j19_6
Trachytopen	G6	G6
Ruwheid zomerbed	G6	G6
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Lateralen	geen	geen
Opzet	hr2023, zonder zss	hr2023, zonder zss
Wind	hr2023	hr2023
Afvoer	hr2023	hr2023

Resultaten

Figuur C-11 presenteert het effect van de verschillende windbenaderingen, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden. Tabel C-14 presenteert de statistieken voor alleen de grote doorgaande lijnen in Figuur C-11. Er zijn geen resultaten gepresenteerd voor de afvoerverdeling en het afvoerverskil over de splitsingspunten omdat er geen verschillen zijn voor de sommen zonder wind en opzet.

Parameters: Wind Hu or zws-based (fm_j19 - fm_j19_zws)



Figuur C-11 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een andere windbenadering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_zws) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Tabel C-14 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een andere windbenadering (fm_j19 t.o.v. fm_j19_zws) voor de verschillende stationaire afvoeren en zeewaterstanden.

Riviertak	Afvoer	Wind/opzet	Bias	Stdev	Min	Max
Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.018	0.015	-0.002	0.057
	600	47 m/s, 7,0 m	0.072	0.049	0.000	0.169
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.016	0.020	-0.014	0.063
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.070	0.047	-0.000	0.166
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.014	0.010	-0.008	0.026
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.071	0.045	0.000	0.138
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.013	0.007	-0.002	0.022
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.065	0.039	0.002	0.120
Haringvliet – Hollands Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede - Waal	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.021	0.019	0.005	0.059
	600	47 m/s, 7,0 m	0.057	0.032	0.021	0.118
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.017	0.005	0.009	0.029
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.081	0.064	0.013	0.205
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.017	0.005	0.010	0.028
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.071	0.030	0.016	0.112
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.013	0.009	-0.006	0.027
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.062	0.022	0.019	0.087
Amer – Bergse Maas – Maas	600	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	600	22 m/s, 4,0 m	0.022	0.011	0.009	0.052
	600	47 m/s, 7,0 m	0.128	0.058	0.034	0.211
	6000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	6000	22 m/s, 4,0 m	0.038	0.012	0.018	0.055
	6000	47 m/s, 7,0 m	0.142	0.060	0.049	0.230
	16000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	16000	22 m/s, 4,0 m	0.031	0.006	0.022	0.040
	16000	47 m/s, 7,0 m	0.130	0.033	0.071	0.183
	24000	0 m/s, 1,15 m	0.000	0.000	0.000	0.000
	24000	22 m/s, 4,0 m	0.026	0.007	0.017	0.059
	24000	47 m/s, 7,0 m	0.111	0.022	0.070	0.144

De instelling van deze parameter heeft significante effecten. Bij extreem harde wind wordt het maximale verschil bovenstreams op de Maas gevonden (+23 cm). Bij de zachtere wind is dit +6 cm op de Lek. Aangezien de verschillen aanzienlijk zijn en het niet voldoende duidelijk is dat een eindige volume aanpak tot betere resultaten leidt, is de huidige aanbeveling om de parameter te baseren op Hu, zoals dit ook al in de vijfde generatie het geval was.

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