

Verschilanalyse overstap zesde- generatie modellering Maas

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



Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas

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

Auteur(s)

Aukje Spruyt

Voorkant: Stuw Belfeld op 16 juli 2021 (helikopterfoto van Waterschap Limburg)

Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas

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

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

Documentgegevens

Versie	0.11
Datum	12-10-2023
Projectnummer	11209233-002
Document ID	11209233-002-ZWS-0001
Pagina's	97
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Aukje Spruyt	Deltares
	Boyan Domhof	Deltares
	Jurjen de Jong	Deltares

Samenvatting

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende modelschematisaties van de Rijkswateren en het Hoofdwatersysteem. 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 Maas wordt er weer een actueel en 'state of the art' basismodel 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. De eventuele consequenties voor de toepassing binnen de verschillende primaire processen van RWS worden buiten beschouwing gelaten.

De verschilanalyses in deze rapportages zijn 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 en overlaatformulering (verschil tussen Tabellenboek en Villemonte-formulering).

4 Schematisatie

Het gebruik van een andere schematisatie (o.a. verbetering basisreferentie, actualisatie, vegetatielegger, vergunningen, planmaatregelen).

5 Randvoorwaarden

Het gebruik van andere BOI-randvoorwaarden.

Daarnaast is het totale effect voor BOI2023 in beeld gebracht.

Iedere verschilanalyse is in onderliggende rapportage individueel gerapporteerd en wordt zoveel als mogelijk nader verklaard. De belangrijkste bevindingen zijn opgenomen in de conclusies en samengevat zijn deze:

- Het totale verschil in waterstanden berekend met het vijfde- en zesde-generatie Maas-model wordt vooral veroorzaakt door de lagere numerieke weerstand in het nieuwe (beter gestroomlijnde) rekenrooster en het gebruik van de nieuwe D-HYDRO Suite software (met daarin een andere numerieke afhandeling (nodig vanwege het ongestructureerde rekenrooster) van o.a. advectie, viscositeit en overlaten).
- De verschillen door de overstap van WAQUA naar D-HYDRO kunnen grotendeels worden verklaard door het gebruik van een ander advectieschema, een andere discretisatie van de horizontale viscositeit en een andere implementatie van de overlaten.
- De verschillen in waterstanden tussen het gestructureerde en het nieuwe ongestructureerde rekenrooster blijken groot te zijn bij (middel)hoge afvoeren door een reductie van de numerieke weerstand, als gevolg van een beter uitlijning van het rooster met stroombepalende elementen zoals de oever.

- Doordat allerlei onderdelen elkaar beïnvloeden en er ook voor waterstandseffecten wordt gecorrigeerd tijdens de kalibratie van het model, 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 kleine verschillen op de Maas (ten opzichte van de Rijn) bij het toepassen van een andere overlaatformulering (Villemonte naar Tabellenboek) kunnen worden verklaard doordat er weinig (lange) kribben aanwezig zijn en er ook over het algemeen weinig overlaten in het model zijn opgenomen die dwars op de stroming staan.
- Het grootste verschil tussen het vijfde- en zesde-generatie model wordt bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s gevonden, met de grootste verschillen rondom de stuw bij Grave in de Zandmaas (tot -77 cm). Dit verschil lijkt vooral te komen door beduidend hogere kalibratieruwheden in het vijfde-generatie model t.o.v. het zesde-generatie model en een andere viscositeitsafhandeling (zowel numeriek als modelconcept). Hierbij moet worden aangetekend dat het vijfde generatie model te hoge en het zesde generatie model iets te lage waterstanden berekent als vergeleken wordt met metingen.
- Bij afvoeren in het extreme (extrapolatie)bereik (4118 tot 6000 m³/s) zijn de waterstanden (lokaal) tot 30-40 cm hoger (en tot 20 cm lager) voor de dynamische sommen.
- Voor BOI2023 speelt er ook een verandering in schematisatie (update van vegetatie en geometrie) en randvoorwaarden ten opzichte van WBI2017. Als deze veranderingen worden meegenomen, dan lopen de verschillen in het extreme bereik verder op. Dit is echter geen gevolg van de overstap naar de zesde generatie modellen, want deze veranderingen hadden ook plaatsgevonden als binnen de vijfde generatie was gebleven. In totaal (dus inclusief gebruik van andere randvoorwaarden) zijn de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 voor de twee dynamische extreme afvoeren (5000 en 6000 m³/s) gemiddeld genomen rond de -4 en 0 cm, maar kunnen lokaal oplopen tot -47 en +110 cm.

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

- het verschil in afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed tussen de vijfde en zesde generatie
- de invloed van de kalibratiewaarden in het extreme afvoerbereik
- eventuele verbeteringen aan de Villemonte-formulering met aanvullende metingen
- modelonzekerheden bij extrapolatie naar BOI-omstandigheden

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Introductie	9
1.2	Software versies	10
1.3	Leeswijzer	10
2	Uitgangspunten verschilanalyse	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Software	12
2.2.1	Numeriek schema	12
2.3	Rekenrooster	13
2.4	Modelleringsconcepten	14
2.4.1	Viscositeit	14
2.4.2	Overlaatformulering	15
2.5	Schematisatie	16
2.6	Randvoorwaarden	16
2.6.1	Bovenstroomse randvoorwaarde	16
2.6.2	Benedenstroomse randvoorwaarde	17
2.6.3	Lateralen	17
2.7	Kalibratie en validatie	17
3	Methodiek verschilanalyse	20
3.1	Onderdelen verschilanalyse	20
3.2	Gebruikte randvoorwaarden	21
3.3	Aanpak resultaten	22
4	Algemene opmerking m.b.t. alle resultaten	23
4.1	Stuwpanen bij lage afvoeren	23
4.2	Topvervlakking	23
5	Vershilanalyse: Software	24
5.1	Totaal effect software	24
5.2	Advectieschema	27
5.3	Rekentijd	30
6	Vershilanalyse: Rekenrooster	32
6.1	Totaal effect rekenrooster	32
6.2	Rekenrooster zonder overlaten en kunstwerken	34

7	Verschilanalyse: Parameters en Modelconcepten	38
7.1	Horizontale viscositeit	38
7.2	Overlaatformulering	41
8	Verschilanalyse: Schematisatie	44
8.1	Verbetering Basisreferentie 1995	44
8.2	Actualisatie van 1995 naar 2019	47
8.3	Effect overgang G5 naar G6 voor actueel model 2019	49
8.4	Vegetatielegger	52
8.5	Vergunningen	54
8.6	Planmaatregelen	57
8.7	Totaal effect actueel naar beleid (beno)	59
9	Verschilanalyse: randvoorwaarden	62
9.1	Randvoorwaarden BOI	62
10	Verschilanalyse: Effect voor BOI	65
10.1	BOI2023 vs WBI2017 met dezelfde randvoorwaarden	65
10.2	BOI2023 vs WBI2017 met bijbehorende randvoorwaarden	67
11	Conclusies en aanbevelingen	71
11.1	Algemene opmerkingen voor alle resultaten	71
11.2	Effect software	71
11.3	Effect rekenrooster	72
11.4	Effect parameters en modelconcepten	73
11.5	Effect schematisatie	74
11.6	Effect randvoorwaarden	75
11.7	Effect BOI	75
11.8	Kalibratie	75
11.9	Resumé	77
11.10	Aanbevelingen	77
12	Referenties	79
A	Modelschematisaties	82
A.1	Overzicht gebruikte modelschematisaties voor de verschilanalyses	82
A.2	Modelopbouw per component	83
B	Randvoorwaarden	85
B.1	Bovenstroomse randvoorwaarden	85
B.2	Qh-relatie benedenstrooms	86

C	Extra analyses	87
C.1	Effect rekentijdstep WAQUA	87
C.2	Effect overlaatformulering in WAQUA	89
C.3	Effect software met constante ruwheid	91
C.4	Effect software zonder overlaten	93
C.5	Effect software met kleine viscositeit	95

1 Inleiding

1.1 Introductie

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende modelschematisaties van de Rijkswateren en het Hoofdwatersysteem. 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 van 2020 t/m 2022 zijn diverse zogeheten 'zesde-generatie' Maas- en Rijntakken-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, of de Qf-relaties, 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 Villemonte voor de overlaatformulering, andere viscositeitsmodellering) en andere modelschematisaties (gebiedsbeschrijvingen).

De vijfde-generatie WAQUA-modellen van Rijn en Maas 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 Maas en is een uitbreiding op de eerdere versie van Domhof & De Jong (2022). Voor de Rijntakken is een vergelijkbare verschilanalyse uitgevoerd en deze staat beschreven in Spruyt et al. (2023).

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 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 2.12.09.67490 (2021.04)
- Simona 2019 (WAQUA)
- Matlab-scripts uit OpenEarth repository t.b.v. omzetting (uitgecheckt begin 2021)

Alle berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux H6 cluster bij Deltares. Dit is gebeurd op het CentOS 7 besturingssysteem. Alle eerder uitgevoerde berekeningen, welke waren uitgevoerd op het voormalige CentOS 6 besturingssysteem, zijn opnieuw gedraaid op CentOS 7.

Voor de analyse van reketijden is gebruik gemaakt van Simona 2019, omdat alleen deze versie op de CentOS 7 machines staat. Dit heeft geen gevolgen voor de resultaten. Alle sommen ten behoeve van analyse reketijden zijn uitgevoerd op de normal-e3-c7 machines.

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 randvoorwaarden 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 Randvoorwaarden

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 op tijd 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, actuele 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.

2.2.1 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 advectieterm 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). In WAQUA wordt een impliciet rekenschema gebruikt, waardoor de tijdstap niet wordt beperkt door de stabiliteit, maar door de gewenste nauwkeurigheid en beschikbare rekestijd. 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 te voren een weloverwogen keuze in te maken, afhankelijk van het rekenrooster en stroomsnelheden.

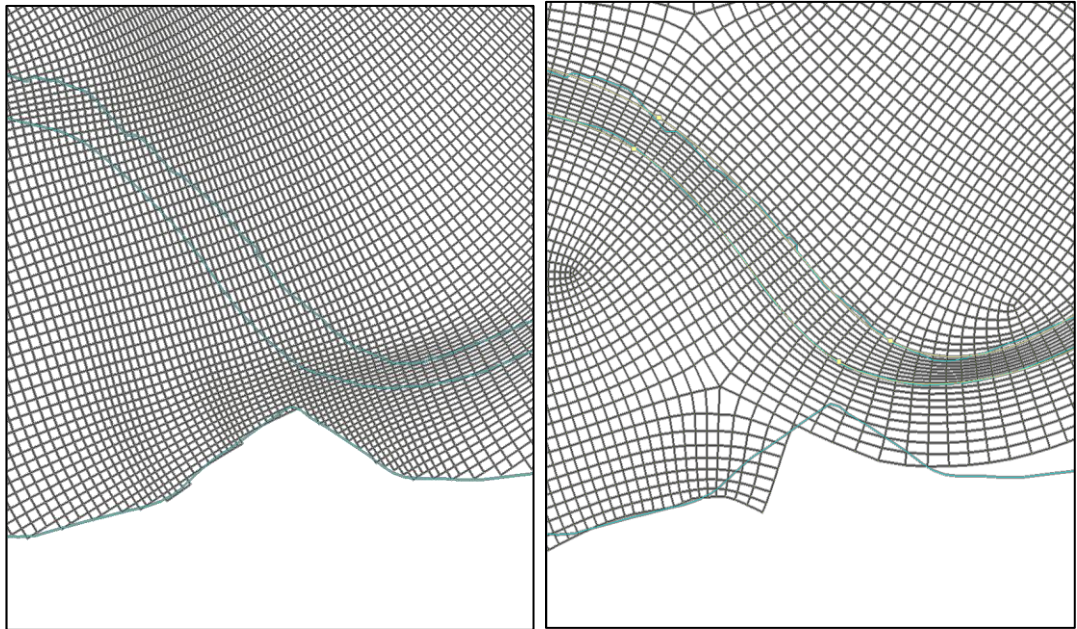
Het vijfde-generatie Maas-model in WAQUA draait met een vaste tijdstap van 7,5 sec. Bij deze tijdstap kunnen echter (lokale) oscillaties voorkomen op de Grensmaas. Vanaf een tijdstap van 1,5 sec (= een factor 5 lager) lijkt het model zonder slingeren in waterstanden te rekenen. Vanwege beschikbare rekestijd is echter altijd een tijdstap van 7,5 sec gehanteerd. Het effect hiervan op de totale resultaten is echter lokaal (ook in de tijd) en beperkt (zie bijlage C.1). 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 tijdstap in de range van 2 tot 6 seconden.

2.3 Rekenrooster

Het rekenrooster is het fundament van het model en is zeer bepalend voor de nauwkeurigheid, de toepasbaarheid en de rekestijd van een model. Binnen de vijfde generatie modelschematisaties (WAQUA) kan alleen gebruik gemaakt worden van een gestructureerd rooster. 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, omdat er geen sprake is van veelhoeken maar alleen vierhoeken, maar geeft 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, 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 rekening gehouden met overige belangrijke stroomlijnen (nevengelen, zomerbedverbredingen en stroomgeleidingskades, etc).

De inspanning die bij de roostergeneratie wordt besteed om een zo optimaal mogelijke verhouding van nauwkeurigheid versus rekestijd versus toepassingsgebieden te verkrijgen, zal zich terugbetalen in alle simulaties die vervolgens met het model gemaakt worden. Voor de zesde generatie is er na een resolutietest (de Jong & Yossef (2016)) voor gekozen om de roosterresolutie vergelijkbaar te houden aan die van de vijfde generatie (orde grootte 40 meter in lengterichting van het zomerbed). Voor meer details over de roostergeneratie voor de Maas zie De Jong (2021).



Figuur 2.1 Uitsnede uit het rooster bij de Maasplassen (Linne) in WAQUA (links) en een tussenversie van 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 $1.0 \text{ m}^2\text{m}^2/\text{s}$ gebruikt (Uittenbogaard et al. 2005). In werkelijkheid zal deze waarde echter 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 $1.0 \text{ m}^2\text{m}^2/\text{s}$ is destijds gekozen, omdat deze gemiddeld het beste paste voor alle Rijntakken en de Maas 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.

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.

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).

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 vermenigvuldigd met het minimum van de waterdiepte in de twee naburige waterstandspunten. Dit laatste zal in het algemeen een kleinere waarde opleveren, 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 viscositeitscoëfficiënt, die in D-HYDRO groter dient te zijn dan in WAQUA.

2.4.2 Overlaatformulering

Vanwege de gebruikte roosterresolutie kunnen niet alle lijnelementen (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. In de vijfde generatie ging dit door de zogenaamde *Tabellenboekmethode*. Deze methode is gebaseerd op experimenten uit 1968⁶ waarvan de onderliggende data verloren zijn gegaan. Bovendien kan deze methode 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. Dit is, net als de Tabellenboekmethode, ook een empirische formulering, maar dan gebaseerd op meerdere experimenten en met de technische mogelijkheid om de vorm van de overlaat mee te nemen⁷. 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 moesten 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 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.

⁶ Helaas is hiervan de onderliggende data niet meer beschikbaar.

⁷ Er zijn echter nog geen experimenten beschikbaar die een goed onderbouwde keuze van de aanvullende parameters toestaan, laat staan een validatie van de uitgebreide formulering.

In D-HYDRO en in WAQUA wordt op een 'identieke' manier het energieverlies door overlaten berekend⁸. Echter, er zijn ook verschillen in het concept voor overlaten. In D-HYDRO wordende 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.

2.5 Schematisatie

De onderliggende geometrie en ruwheid (o.a. vegetatie) 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 De Jong (2021b).

De basisschematisatie van de Maas is voor zowel de vijfde als de zesde generatie die van het jaar 1995 (j95). Bij de overstap naar de zesde-generatie modellen zijn verbeteringen doorgevoerd in deze basisschematisatie t.o.v. de versie zoals gebruikt in de vijfde generatie. Voor meer details zie Bijlage B in De Jong (2021b). 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 vershilanalyse (Van der Deijl, De Jong & Visser, 2022). Tevens is van deze situatie ook een model beschikbaar uit de vijfde generatie, zodat hiermee kan worden vergeleken.

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. De invloed van het verschil in schematisatie is ook voor een beno-schematisatie onderzocht.

2.6 Randvoorwaarden

2.6.1 Bovenstroomse randvoorwaarde

De bovenstroomse rand bevindt zich in de zesde-generatie kalibratiemodellen, net als in de vijfde-generatie modellen, bij Eijsden, waar de Maas Nederland binnen stroomt. Omdat stuw Lixhe slechts enkele kilometers bovenstrooms van Eijsden ligt, wordt de modelrand vanaf het actuele zesde-generatie model (j19_6) naar Lixhe verplaatst. Hierdoor worden de rekenresultaten voor het bovenstroomse deel van de Nederlandse Maas minder beïnvloed door de opgelegde modelrand. Op deze bovenstroomse rand wordt een afvoerrandvoorwaarde opgelegd. Binnen beleidstoepassingen wordt daarbij gebruik gemaakt van fictieve standaardafvoergolven. Voor de zesde-generatie modellen worden hier dezelfde type afvoergolven gebruikt als in de vijfde generatie, die beide gebaseerd zijn op de 50% golf zoals binnen GRADE is gedefinieerd. In BOI2023 wordt dezelfde golfvorm gebruikt als in WT12017. Alleen de gebruikte afvoerniveaus tijdens de piek en het aantal gesimuleerde dagen rond de top zijn veranderd. Zie ook de figuren in bijlage B.1.

⁸ Met andere woorden, de respectievelijke routines ENLOSS.F90 en WAGENL.F90 zijn identiek.

2.6.2 Benedenstroomse randvoorwaarde

De benedenstroomse rand bevindt zich in de zesde-generatie modellen ter hoogte van het meetpunt Keizersveer. Dit is een verplaatsing van 100 meter ten opzichte van de waterstandsrand in de vijfde generatie, toen de modelrand bij de A27 brug lag (De Jong, 2019). Voor het simuleren van voorgekomen situaties wordt hier een gemeten waterstand opgelegd. Binnen beleidstoepassingen wordt echter een Qh-relatie gebruikt om de waterstand benedenstrooms te bepalen.

Voor zowel de vijfde-generatie als zesde-generatie modellen is de Qh-relatie bij Keizersveer afgeleid met het op dat moment meest recente model van de Rijn-Maasmonding, volgens vergelijkbare methodiek. Voor de vijfde generatie is dit met het j15_5 model gedaan (Van der Wijk, 2016) en voor de zesde met het j19_6 model (Van der Wijk, 2022). Voor beleidstoepassingen is voor de zesde generatie ook een Qh-relatie inclusief verwachte zeespiegelstijging afgeleid (deze wordt ook binnen BOI2023 toegepast).

In WBI2017 is echter destijds een alternatieve Qh-relatie gebruikt die aansluit op het probabilistische resultaat in combinatie met Ruimte voor de Rivier-ingrepen (Smale, 2014). Binnen BOI2023 zal het gebruik van de nieuwe Qh-relatie bij Keizersveer leiden tot lagere waterstanden bij lage afvoeren ten opzichte van WBI2017. Bij hoge afvoeren zijn de waterstanden hoger ten opzichte van de vijfde generatie o.a. door de hogere ruwheid op het Haringvliet/Hollands Diep en vergelijkbaar met WBI2017, zie ook het figuur in bijlage B.2.

2.6.3 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. Voor het afleiden van laterale onttrekkingen en toestromingen in de zesde-generatie modellen wordt gebruik gemaakt van de Randvoorwaarden Generator Water Modellen (RGWM) (Tanis, 2020). Bij deze software is een aantal regressie-formuleringen beschikbaar waarmee uit een beperkte set randvoorwaarden een volledige set verkregen kan worden. De RGWM is de opvolger van de Lateralen Afvoergenerator (LAG) de Hulpprogrammatuur die voor de vijfde-generatie modellen is gebruikt. Naast het gebruik van andere regressierelaties is ook het aantal lateralen en de locaties van diverse lateralen aangepast van de vijfde naar de zesde generatie. Bij het vergelijken van de nieuwe en de oude relaties (inclusief een andere hoeveelheid en locatie van de lateralen) voor een standaardafvoergolf van 4118 m³/s is vastgesteld dat (zie Van der Veen, 2018) de verschillen in piekstanden in het algemeen beperkt blijven tot -0.01 – 0.02 m, oplopend tot ca. 0.04 m. Afvoerverschillen zijn geconcentreerd in het golffront en lopen op tot ca. 80 m³/s. Rond de piek blijft het verschil beperkt tot maximaal ca. -30 tot +65 m³/s.

2.7 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. 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 het winterbed wordt meegenomen in de kalibratie kan namelijk de impact van een vergunning of planmaatregel veranderen. 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. Verder wordt ook onnauwkeurigheid geïntroduceerd door bijvoorbeeld geometrische variaties die kleiner zijn dan de roosterresolutie of door afwijkingen in de energieverliezen van overlaten (o.a. kribben). De kalibratie zal ook compenseren voor deze, alsmede voor fouten in schematisaties en randvoorwaarden.

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 de Kalkmaas en Grensmaas is dit op basis van de White-Colebrook vergelijking ($k=0.3$ m) en benedenstrooms hiervan op basis van de versimpelde formule van Van Rijn (met $A=0.1$ en $B=2.5$). 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 meetstations) en per afvoerbereik afgeregeld.

Tijdens een kalibratie op waterstanden bij LMW-metstations is de kalibratiefactor aangepast tot de bias tussen meting en model is gereduceerd tot maximaal enkele millimeters voor specifieke afvoerniveaus. Tussen alle meetstations geldt een andere kalibratiefactor, met uitzondering van de stations direct bovenstrooms van de stuwen, resulterend in 25 kalibratietrajecten. Daarnaast is de kalibratiefactor afhankelijk gemaakt van de rivierafvoer. De afvoerafhankelijkheid is opgedeeld in 5 afvoerniveaus: Laag (L, bij $100 \text{ m}^3/\text{s}$), Midden 1 (M1, bij $800 \text{ m}^3/\text{s}$), Midden 2 (M2, bij $1700 \text{ m}^3/\text{s}$), Hoog 1 (H1, bij $2250 \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoog 2 (H2, bij $2700 \text{ m}^3/\text{s}$).

Voor ieder afvoerniveau is een kalibratieperiode gekozen met de juiste waarde voor de afvoer(golf), goede kwaliteit data, en zo recent mogelijk periode. Voor de laagste afvoeren (L en M1) is gekalibreerd op metingen in 2015, voor hogere afvoeren (M2 en H1) is gekalibreerd op hoogwaters in 2010 en 2011 en voor zeer hoge afvoeren (H2) is gekalibreerd op het hoogwater 1995. Gezamenlijk vormen deze kalibraties een set van afvoerafhankelijk kalibratiefactoren voor toepassing in de zesde-generatie modellen.

In de vijfde generatie is geen kalibratiefactor gebruikt, maar is er direct gekalibreerd op de zomerbedruwheid, waarbij ook de trajecten over de stuwen zelf zijn meegenomen. Hierbij wordt overal de versimpelde Van Rijn formulering gebruikt, waarbij de A-waarde als kalibratiefactor is gebruikt ($B=2.5$, net als in de zesde generatie). Er worden echter maar vier afvoerniveaus onderscheiden: Extreem Laag (EL, bij $25 \text{ m}^3/\text{s}$), Laag (L, bij $150 \text{ m}^3/\text{s}$), Midden (M, bij $1450 \text{ m}^3/\text{s}$) en Hoog (H, bij $2700 \text{ m}^3/\text{s}$). De extreem lage afvoer is gekalibreerd op metingen uit 2015, de lage afvoer op metingen uit 2014, de midden afvoer op het hoogwater van 2010 en het hoge niveau op het hoogwater 1995 (De Jong, 2016). 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. Hierbij is zowel gekeken hoe het model presteert tijdens perioden (validatievensters) waarin de afvoeren vergelijkbaar waren met de afvoerniveaus van de kalibratie, maar is ook de kwaliteit van het model getoetst tijdens de gehele periode. Er is met name vergeleken tussen waterstanden en afvoeren bij de meetstations van het LMW-meetnet. Voor de (korte) validatievensters is de bias enkele centimeters, tot iets meer dan een decimeter. Deze grotere verschillen worden veroorzaakt door grote veranderingen in geometrie tussen het kalibratiejaar en het validatiejaar (zie onderstaande passage over niet-stationariteit). Voor de gehele periode is de bias beperkt tot enkele centimeters (gemiddeld over alle stations).

Sinds 1995 is er veel veranderd in het stroomgebied van de Maas. Hierdoor kan het zijn dat de berekende kwaliteit in het ene jaar, afwijkt van de kwaliteit in een ander modeljaar (naar dit proces wordt verwezen als de niet-stationariteit (Berends, 2020)). Hoe groter het verschil in geometrie met het kalibratie- of validatiejaar, hoe minder er (zonder aanvullende validaties) gezegd kan worden over de kwaliteit van het model. Over de kwaliteit van het model voor een golf als 1995 is voor de huidige geometrie lastig wat te zeggen. Deze niet-stationariteit en het effect van de extrapolatie hiervan naar extreme afvoeren (hoger dan 2700 m³/s) dient meegenomen te worden als mogelijke onzekerheid bij toepassingen met hoge en extreem hoge afvoeren. Dit geldt zowel voor de vijfde als zesde-generatie modellen.

Er is echter geconcludeerd dat H2 (op basis van 1995) weliswaar afwijkingen introduceert door mindere mate van stationariteit, maar nog steeds de beste optie is in de kalibratie (De Jong, 2021a). Wel is op basis van dit onderzoek ervoor gekozen op het traject Heesbeen-Keizersveer een handmatige aanpassing door te voeren omdat de lage ruwheden mogelijk niet representatief zijn voor zeer hoge afvoeren (met terugwerkende kracht verwerkt in De Jong, 2021b). Deze aanpassing is conform de vijfde generatie.

Op de Grensmaas is bij zeer lage afvoeren (lager dan 100 m³/s) de afwijking tussen model en metingen te groot en kan de waterstand niet gekalibreerd worden via de (kalibratie)ruwheid. Daardoor zijn de berekende waterstanden op de Grensmaas te laag bij lage afvoeren. Dit geldt zowel voor de vijfde als de zesde-generatie modellen.

De afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed is zowel in de vijfde als de zesde generatie geen onderdeel geweest van de kalibratie en validatie omdat hier onvoldoende informatie over bekend is. Alle mogelijke fouten in geometrie, discretisatie, numerieke benadering zijn verdisconteerd in de kalibratiefactor (zesde generatie) of de ruwheid (vijfde generatie) van het zomerbed. De afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed kan hiermee zijn beïnvloed.

In principe is het in de zesde-generatie modellen (vanwege het gebruik van een kalibratiefactor) ook mogelijk om het winterbed (samen met het zomerbed) te kalibreren. Hier is in eerste instantie echter niet voor gekozen omdat de consequenties hiervan nog niet voldoende duidelijk zijn (vanwege het introduceren van rechtsongelijkheid bij het beoordelen van vergunningsvraagstukken en om voor BOI aan te sluiten bij bestaande methodiek). Er wordt eerst verder onderzoek gedaan welke opties ten aanzien van kalibreren er verder zijn en wat hiervan de consequenties zijn. 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).

3 Methodiek verschilanalyse

In dit hoofdstuk wordt de methodiek uiteengezet die is toegepast voor de verschilanalyse van de Maas. Daarbij wordt eerst ingegaan op de verschillende analyses die in deze rapportage aan bod komen. Vervolgens wordt ingegaan op de gebruikte randvoorwaarden 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) inclusief de invloed daarvan op de rekentijd
 - a Totaal effect van de overgang van de software
 - b Advectieschema (effect van het gebruik van een ander advectieschema)
 - c Rekentijd
- 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)
- 4 Het gebruik van een andere schematisatie
 - a De verbetering van de Basisreferentie van 1995 in Baseline (en de overgang van de Baseline 5- naar Baseline 6-software)
 - b De actualisatie van de schematisatie (van 1995 naar 2019)
 - c Het totale effect van de overgang van het vijfde naar het zesde-generatie model voor de schematisatie van 2019
 - d Vegetatielegger (effect opname vegetatielegger)
 - e Vergunningen (effect opname vergunningsmaatregelen)
 - f Planmaatregelen (effect opname planmaatregelen)
 - g Beno (totale vergelijking beleidsmodel (incl. vegetatielegger, vergunningen en planmaatregelen) t.o.v. actueel model)
- 5 Het gebruik van andere BOI-randvoorwaarden (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 randvoorwaarden)
 - b Het totale effect voor BOI (andere modelschematisatie en andere randvoorwaarden)

Voor de verschilanalyses worden steeds verschillende modelschematisaties (met bijbehorende randvoorwaarden) 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 randvoorwaarden

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 de modelschematisatie zelf, dus hierbij worden de gebruikte randvoorwaarden steeds hetzelfde gehouden. Er worden dan de verschillen tussen de 2 modelvarianten van 2 modelsommen gepresenteerd: 1) quasi-stationair en 2) dynamisch. Hierbij worden geen lateralen meegenomen in de modelberekening. Voor de quasi-stationaire som wordt vervolgens voor elke 'afvoertrede' het resultaat apart getoond.

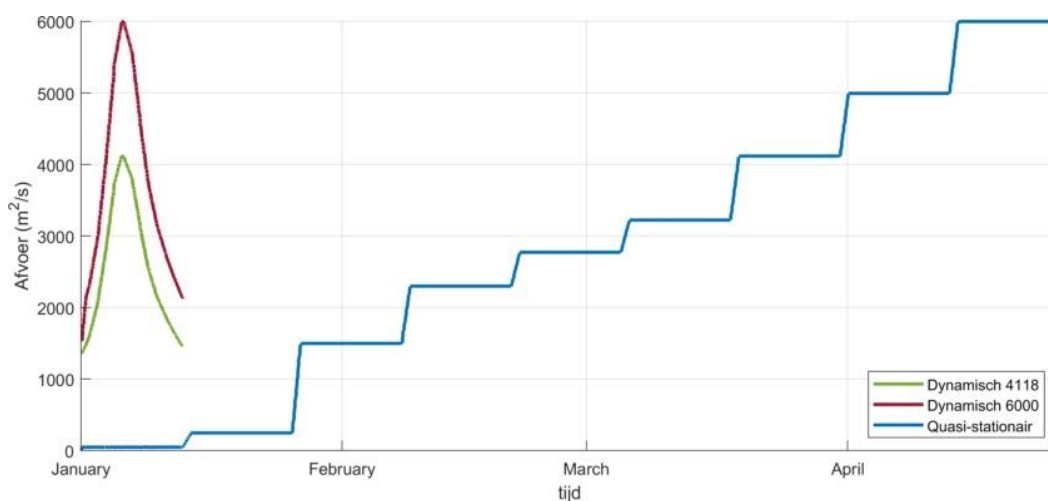
Voor de quasi-stationaire som gelden de volgende bovenstroomse afvoerrandvoorwaarden:

- 50, 250, 1500, 2302, 2776, 3224, 4118, 5000, 6000 m³/s

De quasi-stationaire som is als één berekening uitgevoerd, waarbij de afvoerrandvoorwaarde trapsgewijs oplopend is opgelegd. De overgang naar een nieuwe afvoertrede duurt 1 dag en de trede zelf duurt 12 dagen om het model genoeg tijd te geven om een stationaire situatie te berekenen.

Voor de dynamische modelsommen geldt voor de bovenstroomse afvoerrandvoorwaarde de WBI2017-afvoergolf met respectievelijk een piek op 4118 en 6000 m³/s bij Eijsden. Figuur 3-1 presenteert de bovenstroomse afvoerrandvoorwaarden visueel in een grafiek. In de modelsommen wordt de bovenrand bij Eijsden of Lixhe gelegd, maar wordt wel dezelfde afvoerkromme (zoals getoond in Figuur 3-1) toegepast. Daardoor kunnen verschillen ontstaan in het tijdstip waarop de top van de afvoer plaatsvindt benedenstrooms van de randvoorwaarde en kan topvervlakking optreden door een verschil in berging.

Voor de benedenstroomse randvoorwaarden wordt de 'oude' Qh-relatie bij Keizersveer (Qh-Keizersveer-j15_5-v1) toegepast.



Figuur 3-1 Bovenstroomse afvoer randvoorwaarden opgelegd op het Maas model zoals gebruikt in de quasi-stationaire en dynamische sommen.

Figuur 3-2 toont visueel de verschillen in afvoerniveaus tussen de niveaus gebruikt in de verschilanalyse en zoals gebruikt in de kalibratie van het vijfde- en zesde-generatie model en de afvoerniveaus zoals toegepast binnen BOI2023.



Figuur 3-2 Visuele weergave van verschil tussen gebruikte afvoerniveaus in deze verschilanalyse en de kalibratie afvoerniveaus zoals gebruikt voor het vijfde-generatie (De Jong, 2016), zesde-generatie model (De Jong, 2021) en de afvoerniveaus toegepast in BOI2023 (in m³/s).

3.3 Aanpak resultaten

De resultaten zijn als volgt opgesteld per type afvoergolf:

- Quasi-stationair: de scalaire modeluitvoer is op 1 uur ingesteld. De resultaten van de verschillende afvoeren zijn genomen op het tijdstip 1 uur voordat de volgende 'afvoer trede' begint. Er wordt aangenomen dat op dat moment de situatie stationair is geworden.
- Dynamisch: de scalaire modeluitvoer is op 5 minuten ingesteld. 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). Deze locaties worden echter wel ter referentie van de locatie op de lengte van de rivieras als verticale stippellijnen in de figuren getoond. Tabel 3-1 presenteert de LMW-meetlocaties met bijbehorende rivierkilometer.

Tabel 3-1 LMW-meetlocaties met bijbehorende rivierkilometers

rkm	LMW-meetlocatie	rkm	LMW-meetlocatie
2.56	Eijsden-Grens	79.75	Roermond boven
10.80	St-Pieter Noord	90.11	Neer
16.00	Borgharen dorp	102.69	Belfeld beneden
18.40	Lanaken-Smeermaas	107.47	Venlo
25.25	Uikhoven	132.10	Well-dorp
29.32	Elsloo	147.70	Sambeek
34.76	Eisden-Mazenhoven	155.10	Gennep
38.93	Meeswijk-Veer	165.80	Mook
42.50	Negenoord	177.00	Grave beneden
44.95	Grevenbicht / Rotem	190.75	Megen dorp
52.80	Maaseik	202.37	Lith dorp
61.57	Stevensweert	230.61	Heesbeen
70.40	Linne beneden	247.60	Keizersveer

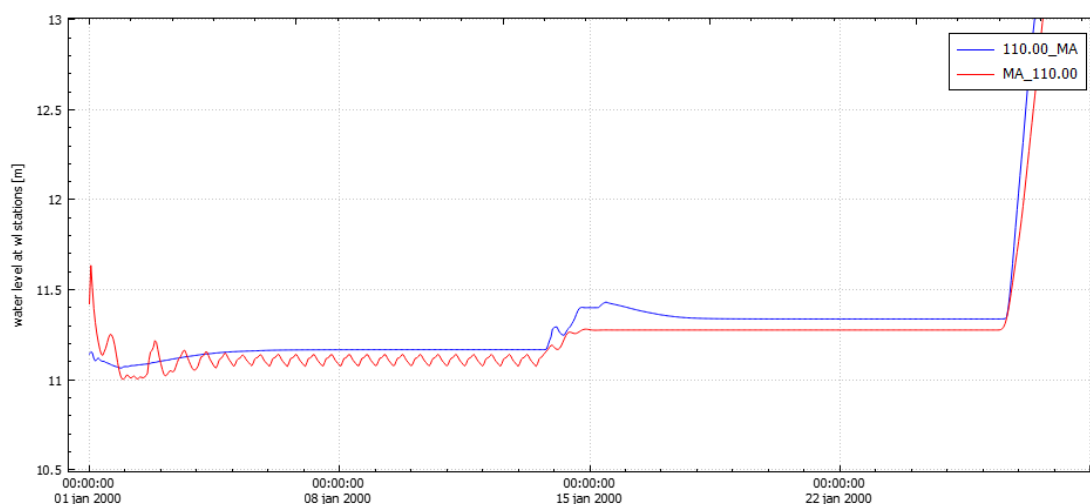
4 Algemene opmerking m.b.t. alle resultaten

4.1 Stuwpannen bij lage afvoeren

In de volgende hoofdstukken zijn er, bij vergelijkingen tussen WAQUA-modellen (waq_j19, hr2017) en D-HYDRO-modellen (de overige modellen), verschillen in de stuwpannen te zien bij de laagste stationaire afvoer (50 m³/s). Bij deze afvoer wordt verwacht dat in werkelijkheid het streefpeil van de stuwpannen wordt gehandhaafd en dat daarmee nagenoeg geen waterstandsverschillen tussen de WAQUA- en D-HYDRO modellen optreden.

Desondanks treden er wel verschillen op tussen de WAQUA- en D-HYDRO-modellen. De stuwsturing in RTC van de D-HYDRO-modellen is bij deze lage afvoer in sommige stuwpannen licht instabiel (zie Figuur 4-1). In de stuwsturing van WAQUA worden binnen een bandbreedte rondom het streefpeil geen correcties uitgevoerd, waardoor in de WAQUA-resultaten geen instabiel gedrag te zien is, maar wel altijd een afwijking met het streefpeil kan ontstaan van maximaal 5 cm.

In de vergelijking tussen WAQUA- en D-HYDRO modellen bij een stationair afvoer van 50 m³/s kan een eventueel verschil door deze verschillen in sturing worden verklaard. Bij hogere afvoeren treden deze schommelingen niet meer op. De afwijking van het streefpeil in de WAQUA-modellen blijft bij alle gestuwde afvoeren bestaan (tot ongeveer 1700 m³/s).



Figuur 4-1 Waterstand resultaten bij rivierkilometer 110 (stuwpan Belfeld-Sambeek) bij stationaire afvoer van 50 m³/s (14 januari) en 250 m³/s (tussen 15 en 26 januari) voor berekening met WAQUA [waq_j19] (110.00_MA, blauwe lijn) en met D-HYDRO [V1_softw] (MA_110.00, rode lijn). Het resultaat van D-HYDRO toont een golfbeweging als gevolg van de niet voldoende afgeregelde stuwsturing in RTC.

4.2 Topvervlakking

In de Maas treden sterke retentie-effecten op als er een hoogwatergolf voorbij komt, doordat verschillende (retentie)gebieden instromen. Dit betekent dat de afvoer ten tijde van de piek afneemt naarmate je verder benedenstrooms komt. Hierdoor zullen de (verschillen in) resultaten van de waterstanden bij gebruik van een afvoergolf met een specifieke piekwaarde Q of een stationaire afvoer met dezelfde waarde voor Q sterk van elkaar verschillen (dit effect neemt ook toe naar benedenstrooms). Dit effect is in de Maas veel groter dan in de Rijntakken.

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 en het verschil in rekentijd.

5.1 Totaal effect software

Het effect van de overgang van SIMONA (WAQUA) naar D-HYDRO Suite wordt hiermee in beeld gebracht. Hiervoor wordt het bestaande WAQUA j19_5 model rechtstreeks omgezet naar D-HYDRO-invoer (via Matlab-scripts) en worden de instellingen zoveel mogelijk hetzelfde gehouden (behalve de rekentijdstap) als in het WAQUA model (waqua-maas-j19_5). De resultaten worden vervolgens vergeleken met die van het oorspronkelijke WAQUA-model.

Uitgangspunten

Voor de referentie wordt het waqua-maas-j19_5-v1 [*waq_j19*] 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_j19*]. 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). Hiervoor zijn de afvoerafhankelijke zomerbedruwheden uit het waq_j19 model gekopieerd (dit is mogelijk, omdat het D-HYDRO format weinig verschilt van WAQUA) en is de wijze van specificeren aangepast naar het D-HYDRO format. De kalibratiefactoren zijn uitgezet in deze modelvariant. Zie ook bijlage A.2.

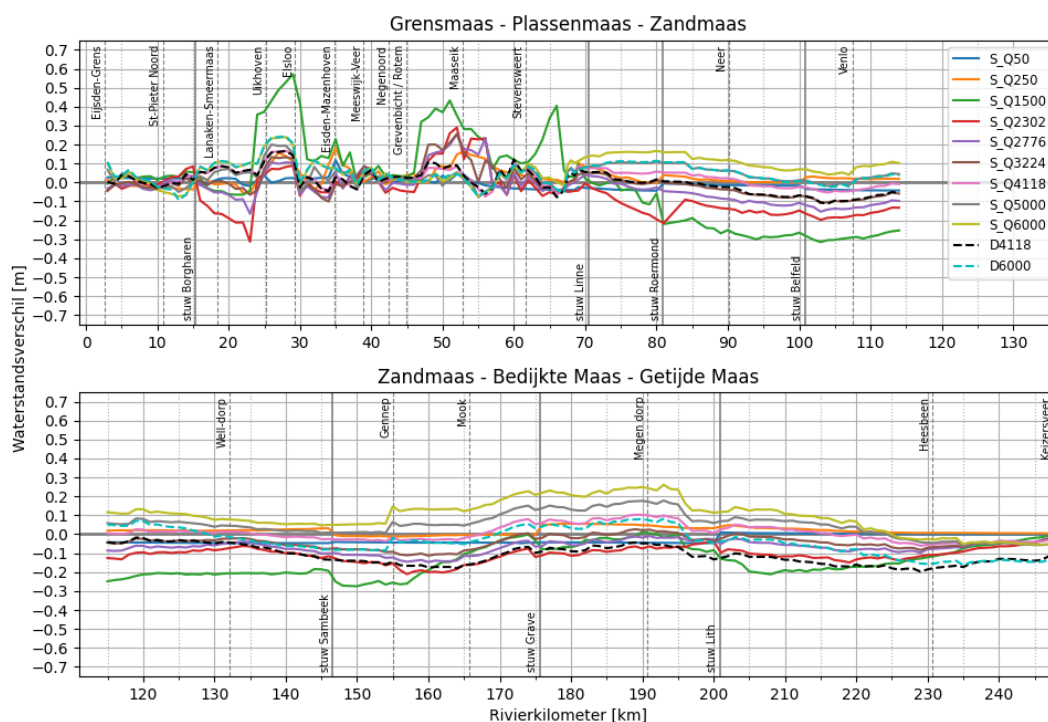
Tabel 5-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 5-1 Instellingen van variant (fm_waq_j19) en referentie (waq_j19) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door de overstap van de SIMONA software naar de D-HYDRO Suite software.

	variant		referentie	
	fm_waq_j19		waq_j19	
Software	D-HYDRO		WAQUA	
Rooster	curvilineair (G5)		curvilineair (G5)	
Parameters				
Overlaten	Tabellenboek		Tabellenboek	
Viscositeit	WAQUA-waarde (1.0)		WAQUA-waarde (1.0)	
Schematisatie				
Geometrie	j19_5 (G5)		j19_5 (G5)	
Ecotopen	ecotopen 2017		ecotopen 2017	
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie		G5 kalibratie	
Structures	G5		G5	
Randvoorwaarden				
Locatie bovenrand	Eijsden		Eijsden	
Lateralen	geen		geen	
Qh-relatie	G5		G5	

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 de dynamische afvoergolven. Tabel 5-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van andere rekensoftware (fm_waq_j19 t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 5-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere rekensoftware (fm_waq_j19 t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.018	0.028	-0.048	0.117
	stationair Q250	0.023	0.035	-0.056	0.181
	stationair Q1500	-0.071	0.179	-0.315	0.572
	stationair Q2302	-0.083	0.085	-0.313	0.290
	stationair Q2776	-0.046	0.067	-0.166	0.255
	stationair Q3224	-0.022	0.059	-0.113	0.255
	stationair Q4118	0.015	0.047	-0.074	0.168
	stationair Q5000	0.046	0.058	-0.078	0.200
	stationair Q6000	0.086	0.078	-0.073	0.261
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.058	0.081	-0.197	0.165
	dynamisch Q6000 (max13)	0.002	0.078	-0.164	0.244

In Figuur 5-1 is aan de groene lijn te zien dat vooral in het midden afvoer bereik (rond 1500 m³/s) de verschillen groot zijn met uitschieters van -32 tot +57 cm. In de Grensmaas zijn de verschillen vooral positief, terwijl ze benedenstrooms van de Grensmaas voornamelijk negatief zijn voor afvoeren tot 4118 m³/s. Als we kijken naar de bias, dan berekent D-HYDRO over het algemeen lagere waterstanden dan WAQUA tot een (stationaire) afvoer van 4118 m³/s. Daarboven neemt de bias toe met toenemende afvoer, dit is vooral zichtbaar op het benedenstroomse deel van de Maas, waar de verschillen oplopen tot 25 cm bij een stationaire afvoer van 6000 m³/s (bij een dynamische afvoer is deze ca. 15 cm lager, dit wordt veroorzaakt door een verschillend gedrag van topvervlakking). Bij lage afvoeren (minder dan 500 m³/s) blijven de verschillen beperkt en zijn de effecten van een verschillende werking van de stuwen zichtbaar. Ook bij de hogere afvoeren (tussen de 2302 en 4118 m³/s) zijn de verschillen beperkter.

In Figuur 5-1 valt met name op dat D-HYDRO fors lagere waterstanden berekent in het benedenstroomse deel dan WAQUA. In deze simulatie is een relatief grote horizontale viscositeit van 1.0 toegepast. Uit ervaring weten wij dat de discretisatie in D-HYDRO lagere opstuwings geeft voor de horizontale viscositeit dan in WAQUA. Bij een debiet van 1500 m³/s gaat het winterbed meestromen en zullen de grootste snelheidsgradiënten optreden en zal de impact van de horizontale viscositeit optreden. Dit is precies wat in Figuur 5-1 te zien is, want voor dit debiet is het verschil tussen D-HYDRO en WAQUA het grootst op de Getijde Maas. In Bijlage C.55 is een extra berekening uitgevoerd, waaruit blijkt dat de verschillen in het benedenstroomse deel vrijwel volledig verklaard worden door een verschil in discretisatie van de horizontale viscositeit.

In Figuur 5-1 valt ook het 'schokkerige' patroon van verschillen op. De impact van de stuwen in combinatie met de hoge stroomsnelheden vormen een plausibele verklaring hiervoor.

Nadere interpretatie

Er is ook nog gekeken naar de verschillen in ruimtelijke stroombeelden bij een afvoer van 4000 m³/s. Hierbij is specifiek gekeken rond rkm 35, omdat hier het waterstandsverschil klein is, zodat stroombeelden van de beide modellen goed te vergelijken zijn. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er geen waarneembare verschillen zijn in de ruwheidsvelden tussen het WAQUA en D-HYDRO model. De stroomsnelheid geeft in grote mate hetzelfde beeld tussen beide modellen. Wel valt op dat bij lokale meergeulen-stroming in D-HYDRO veel meer stroming door de secundaire geul gaat. Dit kan worden verklaard doordat de stroming daarbij vaak diagonaal op de roosterrichting staat en er sprake is van hoge stroomsnelheden in een smalle geul. In WAQUA worden voor de advection 4 achtereenvolgende gridcellen meegenomen in de berekening. Door de diagonale stroming (we maken hier gebruik van het vijfde generatie rooster, wat niet overal goed is uitgelijnd) door een smalle stroombaan (het zomerbed) voelt de advectionoplossing het winterbed aan beide kanten. Doordat in D-HYDRO gebruik wordt gemaakt van een lokale oplossing van de advection wordt in theorie de stroming beter berekend.

De verschillen bij afvoerniveau van 4118 m³/s kunnen vergeleken worden met de acceptatietesten van de D-HYDRO-Suite software in 2015, waarin het j95_5-model van de Maas naar D-HYDRO was geconverteerd (De Goede et al., 2015). Uit een visuele vergelijking (met Figuur 4.3 van De Goede et al., 2015) volgen uit beide analyses sterk vergelijkbare verschillen: op de Zandmaas⁹ een verschil tussen -10 en +10 cm, op de Grensmaas¹⁰ oplopend van 0 tot +20 cm.

5.2 Advectieschema

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

Uitgangspunten

Het is helaas niet mogelijk om binnen hetzelfde softwarepakket beide advectieschema's te gebruiken om ze onderling te kunnen vergelijken.

Om het effect van het gebruikte advectieschema in WAQUA beter in beeld te brengen worden in het waqua-maas-j19_5-v1 [waq_j19] model de overlaten 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_adv).

Om het effect van het gebruikte advectieschema 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-maas-j19_5 [fm_waq_j19] model de overlaten 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_adv).

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

⁹ Zandmaas = rivierkilometer 55 tot 164

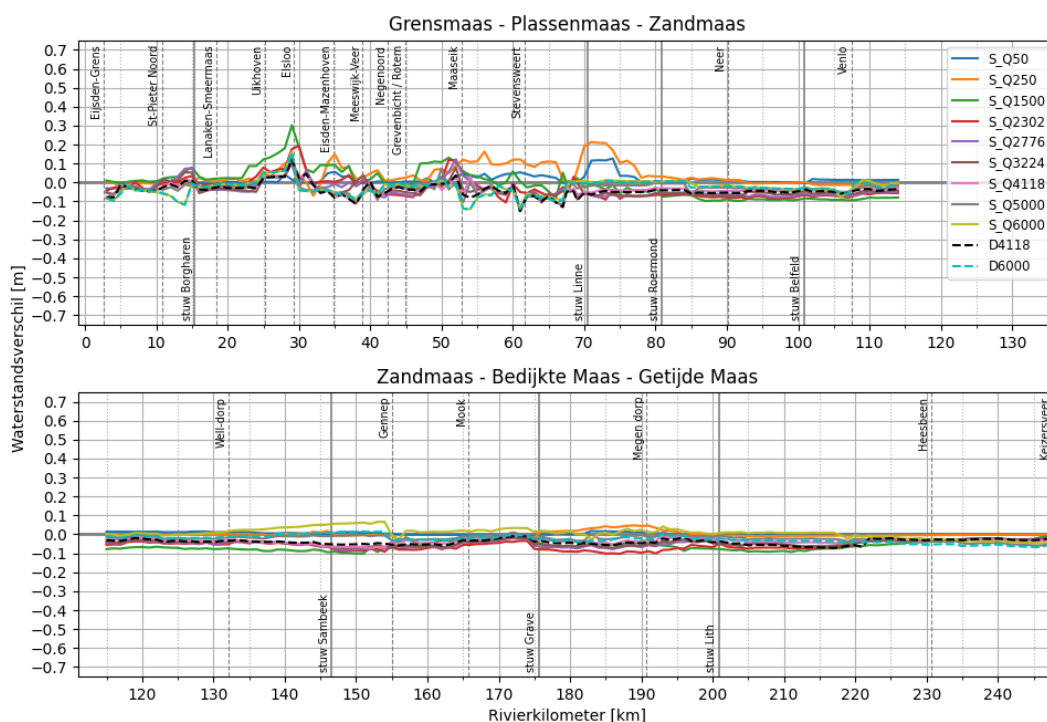
¹⁰ Grensmaas = rivierkilometer 0 tot 55

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

	variant	referentie
	fm_adv	waq_adv
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	geen	geen
Viscositeit	klein (0.2)	klein (0.2)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	geen	geen
Ruwheid zomerbed	constant (WhiteColebrook 0.2)	constant (WhiteColebrook 0.2)
Structures	geen	geen
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 5-2 presenteert het effect van het gebruik van een ander advectionschema tussen WAQUA en D-HYDRO ([fm_adv] t.o.v. [waq_adv]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de dynamische afvoergolf. Tabel 5-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 5-2.



Figuur 5-2 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een ander advectionschema (fm_waq_j19 t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 5-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een ander advectionsschema (fm_adv t.o.v. waq_adv) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.009	0.019	-0.032	0.127
	stationair Q250	0.017	0.045	-0.069	0.213
	stationair Q1500	-0.033	0.062	-0.101	0.303
	stationair Q2302	-0.045	0.043	-0.105	0.194
	stationair Q2776	-0.043	0.031	-0.143	0.122
	stationair Q3224	-0.042	0.028	-0.150	0.119
	stationair Q4118	-0.036	0.025	-0.150	0.121
	stationair Q5000	-0.026	0.026	-0.144	0.129
	stationair Q6000	-0.009	0.038	-0.141	0.162
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.040	0.026	-0.151	0.120
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.027	0.032	-0.142	0.159

De grootste positieve verschillen zijn te zien voor de lagere afvoeren, tot max 30 cm bij 1500 m³/s bij de bocht bij Elsloo. In de overige sommen zijn de verschillen beperkt tot maximaal 20 cm op het bovenstroomse deel van de Maas en maximaal -10 cm op het benedenstroomse deel.

Over het algemeen is te zien dat het advectionsschema van D-HYDRO zorgt voor hogere waterstanden op de Grensmaas (ongeveer +20 cm) en lagere waterstanden (ongeveer -10 cm) meer benedenstrooms.

Nadere interpretatie

In Figuur 5.1, waarin naar het totale verschil door de nieuwe software wordt gekeken, blijkt dat er veel grotere verschillen optreden. Daarom kan het totale effect van de overstap naar de nieuwe software niet verklaard worden door alleen het advectionsschema. Voor het analyseren van het effect van het advectionsschema is echter zowel een constante ruwheid toegepast, zijn de overlaten weggelaten, en is een kleine viscositeit toegepast. Deze effecten zijn daarom ook nog los bekeken in bijlage C.3, C.4 en C.5, respectievelijk. Het effect van het gebruik van een constante ruwheid ten opzichte van een niet-uniforme ruwheid in het volledige model is relatief klein (zie bijlage C.3). De overlaten hebben een groter effect, vooral in het benedenstroomse deel voor de extreme afvoeren (zie bijlage C.4).

In de volledige vergelijking voor de software (zie Figuur 5.1) is in zowel WAQUA als D-HYDRO een constante viscositeit van 1.0 toegepast en in de vergelijking in deze paragraaf een veel lagere waarde (van 0.2). Omdat in WAQUA en D-HYDRO verschillende concepten voor de horizontale viscositeit toegepast worden kunnen D-HYDRO waterstanden iets lager zijn ten opzichte van WAQUA bij gebruik van dezelfde constante waarde, vooral voor zomerbedvullende afvoeren. Voor de Grensmaas zou dit dan kunnen leiden tot iets lagere verschillen van +15 cm, terwijl voor de Zandmaas de verschillen zouden kunnen toenemen tot ongeveer -15 cm, zie ook bijlage C.5,

Doordat de waterstanden met het D-HYDRO advectieschema in het kalibratiebereik (tot 2700 m³/s) vooral lager zijn dan met het WAQUA-schema (vooral in het benedenstroomse deel), zal dit in de kalibratie geresulteerd hebben in een hogere kalibratiefactor bij de kalibratie op hoogwater 1995 (De Jong, 2021). Het effect hiervan op de modelresultaten bij extreme afvoeren of in actuele modellen, is echter niet te beredeneren omdat de combinatie van advectie en kalibratiefactor hierin doorwerkt, samen met alle andere veranderingen in de software, het rooster en de schematisatie.

5.3 Rekeningtijd

Het effect van de rekeningtijden wordt alleen op basis van de dynamische som met een afvoer van 4118 m³/s vergeleken, zowel met een seriële als een parallelle berekening.

Tabel 5-5 presenteert de rekeningtijden met de dynamische som voor zowel een seriële als parallelle berekening voor *waq_j19*, *fm_waq_j19* en *fm_j19*. De parallelle berekening is uitgevoerd met 4 automatisch gegenereerde partities. De preprocessing tijd omvat initialisatie van het model en bij parallelle simulaties ook het partitioneren. De postprocessing tijd staat gelijk aan het samenvoegen van de partities en is dus voor de seriële som niet van toepassing.

Over het algemeen is het naar D-HYDRO-geconverteerde model (*fm_waq_j19*) trager dan het WAQUA model (*waq_j19*), zowel serieel (+130%) als parallel (+330%). Daarbij moet wel worden aangetekend dat de gebruikte tijdstap in het WAQUA model eigenlijk 5 keer te groot is, zie ook paragraaf 2.2.1. In deze simulatie hebben er nog geen specifieke optimalisaties (bijvoorbeeld reductie van tijdstap limiterende cellen) aan het rekenrooster plaatsgevonden voor specifiek D-HYDRO.

Dat is in de simulatie *fm_j19* case wel gebeurd. Daarbij is direct duidelijk te zien dat dit de rekeningtijden verbetert in zowel de seriële som als in parallel som (ongeveer 30% t.o.v. het rechtstreeks geconverteerde model *fm_waq_j19*).

De preprocessing tijd van *fm_j19* is aanmerkelijk hoger dan WAQUA, maar verwaarloosbaar op de gehele rekeningtijd. De preprocessingtijd van WAQUA is veel korter doordat alle features in het model niet eerst gediscetiseerd hoeven te worden naar het rekenrooster. In D-HYDRO is nu echter geen gebruik gemaakt van de zogeheten 'caching' functionaliteit. Deze functionaliteit zal ervoor zorgen dat de preprocessingtijd vergelijkbaar zal worden met de preprocessingtijd in WAQUA.

De verhoudingen tussen de rekeningtijden van *waq_j19*, *fm_waq_j19* en *fm_j19* komen bij benadering overeen met de verhoudingen die zijn bepaald in De Goede et al. (2015).

Tabel 5-5 Rekentijden in seconden met een dynamische som van 4118 m³/s voor zowel een seriële als een parallelle berekening voor waq_j19, fm_waq_j19 en fm_j19. De parallelle berekening is uitgevoerd op de op de normal-e3-c7 machines met 4 automatisch gedefinieerde partities. De communicatie en daadwerkelijke rekestijd zijn voor fm_waq_j19 en fm_j19 samengevoegd, omdat deze tijden in D-HYDRO niet afzonderlijk worden weggeschreven. De rekestijdstap in WAQUA staat vast op 7.5 seconden. D-HYDRO bepaalt zelf de rekestijdstap afhankelijk van het stabiliteitscriterium.

	Serieel			Parallel		
	waq_j19	fm_waq_j19	fm_j19	waq_j19	fm_waq_j19	fm_j19
Tijdstap (gemiddeld)	7,5	2,1	3,3	7,5	2,1	3,3
Preprocessing	34	54	909	32	47	327
Communicatie (alleen parallel)				2340		
Daadwerkelijke rekestijd	51533	119088	81492	11164	57574	39911
Postprocessing	-	-	-	5	35	12
Totaal	51567	119143	82401	13541	57656	40250

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 hiermee in beeld gebracht. Voor het curvilineaire rooster wordt gebruik gemaakt van het bestaande WAQUA-rooster.

Uitgangspunten

Voor de referentie (fm_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 het bestaande D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-maas-j19_6-v2a) gebruikt.

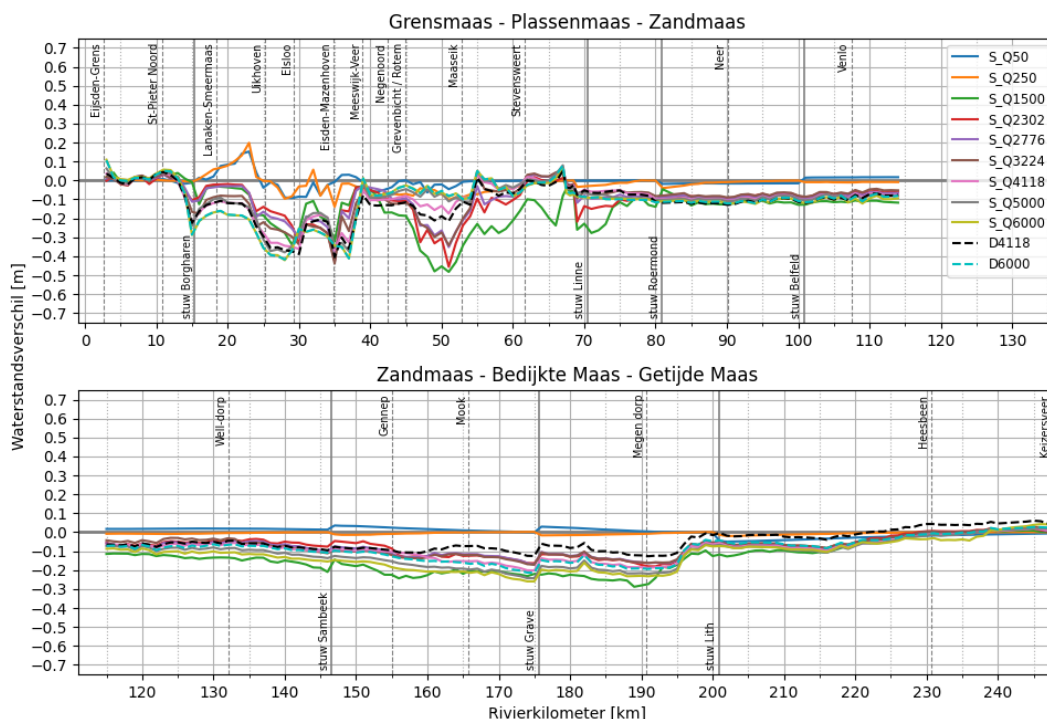
Tabel 6-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

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

	variant	referentie
	fm_j19	fm_waq_grid
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_6 (G6)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 6-1 presenteert het effect van het rekenrooster ([fm_j19] t.o.v. [fm_waq_grid]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en dynamische afvoergolven. Tabel 6-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 6-1.



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

Tabel 6-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van een nieuw rekenrooster (fm_j19 t.o.v. fm_waq_grid) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.001	0.029	-0.093	0.153
	stationair Q250	-0.011	0.031	-0.139	0.199
	stationair Q1500	-0.139	0.097	-0.482	0.045
	stationair Q2302	-0.086	0.076	-0.455	0.032
	stationair Q2776	-0.084	0.068	-0.427	0.047
	stationair Q3224	-0.085	0.077	-0.438	0.055
	stationair Q4118	-0.092	0.074	-0.368	0.071
	stationair Q5000	-0.103	0.082	-0.379	0.080
	stationair Q6000	-0.116	0.092	-0.421	0.110
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.077	0.082	-0.405	0.061
dynamisch Q6000 (max13)	-0.098	0.086	-0.417	0.106	

Opvallend is dat de verschillen ten gevolge van het nieuwe rekenrooster (en de resulterende discretisatie) overwegend negatief zijn over de gehele rivierlengte. Dit impliceert dat met het nieuwe ongestructureerde rekenrooster over het algemeen lagere waterstanden worden berekend. De absolute verschillen zijn in de Grensmaas beduidend hoger (tot -50 cm) dan in het benedenstroomse deel (tot -30 cm). De piek bij rkm 23 bij de twee laagste afvoerniveaus wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat in het WAQUA rekenrooster een grinddempel niet functioneert (het water stroomt er langs).

Ook valt op dat bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s de verschillen over de gehele rivierlengte het grootst zijn, met een minimum verschil van -48 cm nabij rkm 50. Bij deze afvoer stromen de uiterwaarden langs een groot deel van de Maas nét mee, maar vindt de grootste afvoer binnen het zomerbed plaats en is er dus het grootste effect zichtbaar van het uitlijnen van het rooster aan het zomerbed. De verschillen zijn bij lage afvoeren (minder dan 500 m³/s) beperkt (een bias van maximaal 1 cm).

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 rooster (en discretisatie) stond. Door kalibratie zal dit verschil deels gecorrigeerd zijn (een hogere ruwheid), maar zal de nieuwe modellering in D-HYDRO vermoedelijk een beter resultaat geven.

Er dient opgemerkt te worden dat de roosters relatief grof zijn, waardoor kleine verschillen in discretisaties toch relatief grote effecten kunnen hebben, vooral bij grote stroomsnelheden. Zo zijn de advectieschema's in D-HYDRO en WAQUA allebei van een voldoende orde van nauwkeurigheid. Echter, een betere uitlijning van het rooster blijkt ongeveer een verschil van een halve meter te geven bij de Grensmaas. Hierbij dient te worden opgemerkt dat het in de Grensmaas heel hard stroomt (tot boven de 4 m/s) voor de grootste rivierdebieten die in dit onderzoek toegepast zijn.

6.2 Rekenrooster zonder overlaten en kunstwerken

Het effect van overlaten 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 overlaten en kunstwerken buiten beschouwing te laten is daarom de vergelijking uit paragraaf 6.1 nogmaals uitgevoerd, maar dan zonder overlaten en kunstwerken.

Uitgangspunten

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

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

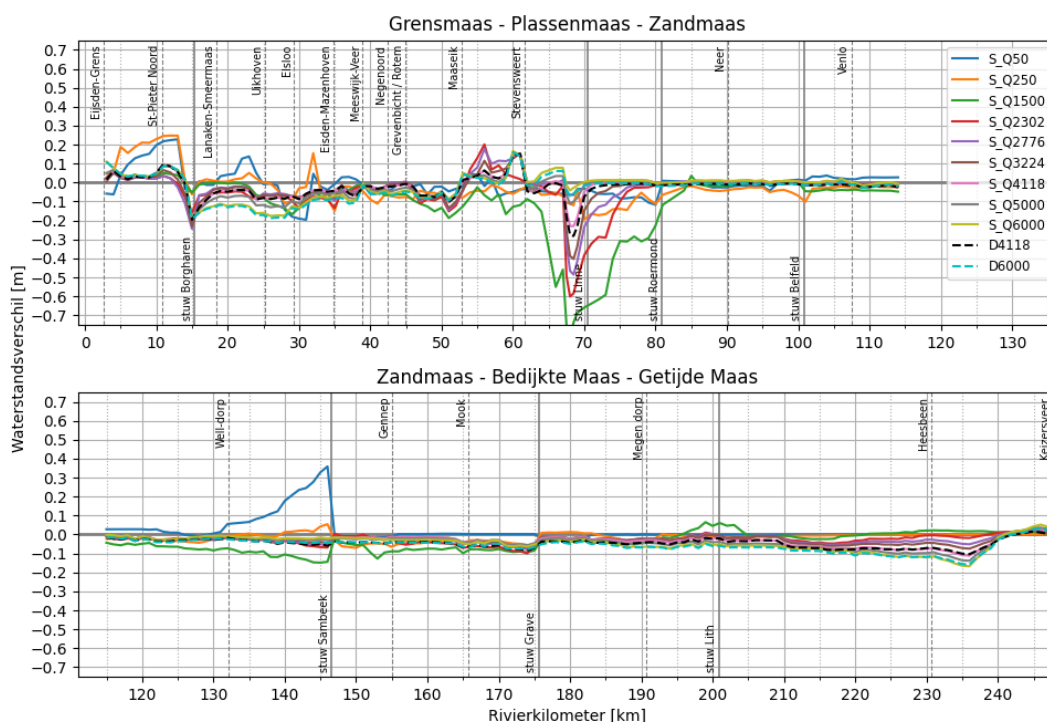
Tabel 6-3 Instellingen van variant (fm_j19_zk) en referentie (fm_waq_grid_zk) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een ander rekenrooster zonder overlaten en structures.

	variant	referentie
	fm_j19_zk	fm_waq_grid_zk
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	geen	geen
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_6 (G6)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	geen	geen
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 6-2 presenteert het effect van het rekenrooster zonder overlaten ([fm_j19_zk] t.o.v. [fm_waq_grid_zk]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven.

Tabel 6-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 6-2.



Figuur 6-2 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een nieuw rekenrooster zonder overlaten en kunstwerken (fm_j19_zk t.o.v. fm_waq_grid_zk) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 6-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van een nieuw rekenrooster zonder overlagen en kunstwerken (fm_j19_zk t.o.v. fm_waq_grid_zk) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

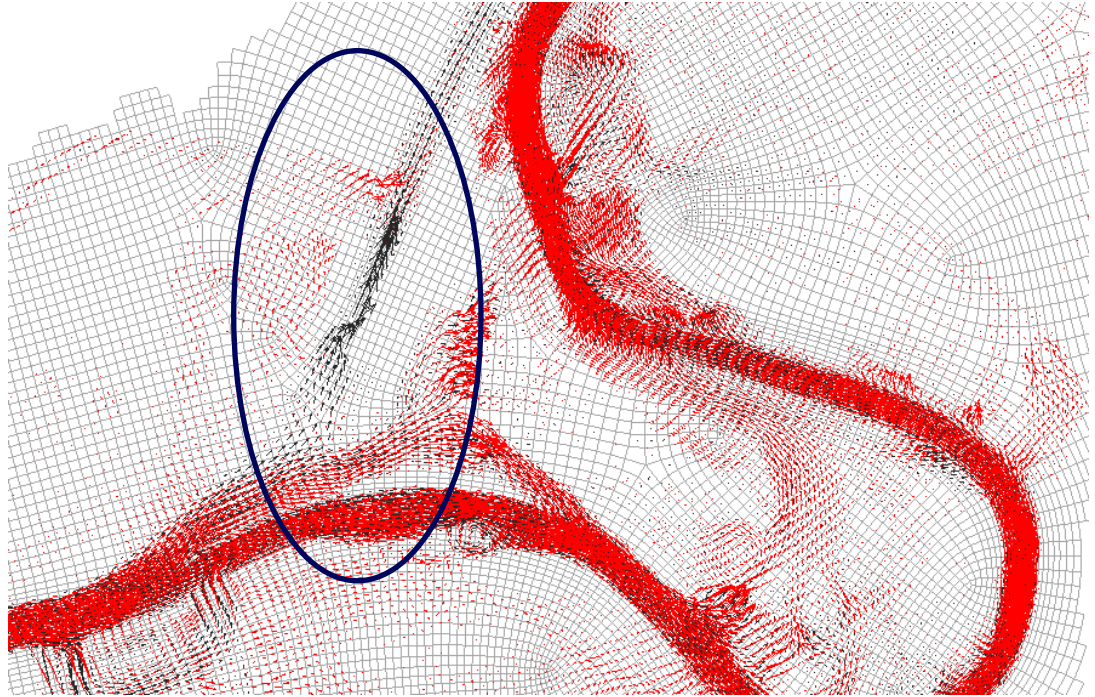
Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.007	0.069	-0.196	0.359
	stationair Q250	-0.020	0.062	-0.194	0.248
	stationair Q1500	-0.075	0.139	-0.815	0.065
	stationair Q2302	-0.039	0.086	-0.601	0.201
	stationair Q2776	-0.031	0.067	-0.485	0.178
	stationair Q3224	-0.029	0.056	-0.403	0.153
	stationair Q4118	-0.027	0.046	-0.230	0.153
	stationair Q5000	-0.030	0.047	-0.184	0.152
	stationair Q6000	-0.034	0.057	-0.188	0.166
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.037	0.047	-0.282	0.151
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.045	0.055	-0.191	0.160

De verschillen als gevolg van het nieuwe rekenrooster zijn (zoals verwacht) over het algemeen kleiner als overlagen en kunstwerken buiten beschouwing worden gelaten en ook deze keer zijn de verschillen vooral negatief. Er zijn echter wel een paar grotere uitschieters zichtbaar met name bij de twee laagste afvoeren (+35 cm bij stuw Sambeek). Dit kan worden verklaard doordat het rooster nu beter is uitgelijnd op de geometrie en dat is met name zichtbaar bij de stuwen, vooral bij lage afvoeren, wanneer de stroming alleen door het zomerbed gaat. Normaalgesproken is in deze situatie de rivier helemaal gestuwd, zodat de waterstanden worden 'vastgelegd', maar als de stuwen worden verwijderd, wordt het effect van een andere uitlijning op het rooster duidelijk zichtbaar.

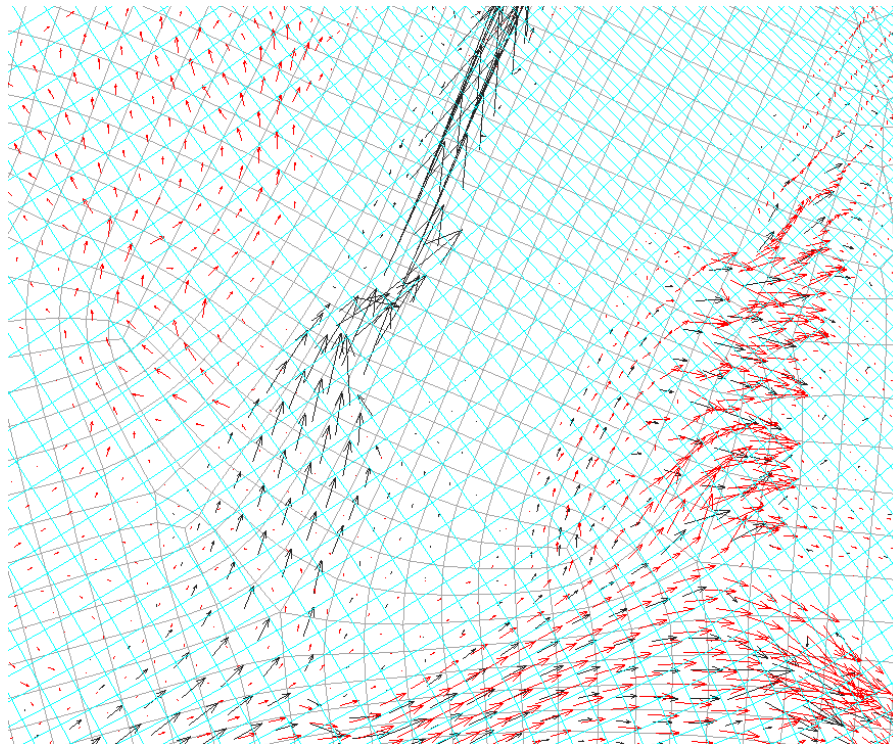
Nadere interpretatie

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.

Bij alle afvoeren zijn grotere verschillen zichtbaar rond rkm 68 vlak voor stuw Linne. Dit wordt veroorzaakt doordat in het nieuwe (ongestructureerde) rooster het Lateraalkanaal goed is uitgelijnd met het rooster en, nu er geen barrières in de vorm kunstwerken of overlagen meer aanwezig zijn, de stroming hier netjes doorheen gaat, zie Figuur 6-3 en Figuur 6-4. In het oude (gestructureerde) rooster was dit niet het geval en gaat de stroming dus grotendeels door het zomerbed en via kortsluitingen verderop. Hoe lager de afvoer, hoe minder kortsluitingen aanwezig, daarom is het verschil voor de lagere afvoeren (S50 en S250) kleiner. Bij een afvoer van 1500 m³/s is het verschil het grootst, omdat dan de meeste kortsluitingen actief zijn. Het verschil wordt in dat geval pas weer kleiner als het Lateraalkanaal weer aansluit rond rkm 84. Bij nog hogere afvoeren stroomt een groter deel van de uiterwaard mee (in plaats van de kleine individuele kortsluitingen bij 1.500 m³/s) en wordt de invloed van de stroming door het Lateraalkanaal weer kleiner, waardoor het verschil in waterstanden weer afneemt.



Figuur 6-3 Snelheidsvectoren rond rkm 68, bij de aansluiting van het Lateraalkanaal, voor een stationaire afvoer van $2302 \text{ m}^3/\text{s}$ weergegeven op het nieuwe ongestructureerde rooster (lichtgrijze lijnen): rood = snelheid berekend op het oude rooster, zwart = snelheid berekend op het nieuwe rooster.



Figuur 6-4 Uitsnede van de snelheidsvectoren rond rkm 68, bij de aansluiting van het Lateraalkanaal, voor een stationaire afvoer van $2302 \text{ m}^3/\text{s}$ weergegeven op het nieuwe ongestructureerde rooster (lichtgrijze lijnen) en het oude gestructureerde rooster (lichtblauw): rood = snelheid berekend op het oude rooster, zwart = snelheid berekend op het nieuwe rooster.

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 te duiden van de belangrijkste veranderingen in parameters en modelconcepten op de modelresultaten. We gaan hierbij specifiek in op het effect door een andere keuze voor het meenemen van de horizontale viscositeit en een andere keuze voor de overlaatformulering.

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 hiermee in beeld gebracht.

Uitgangspunten

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

- Uniforme horizontale eddy viscositeit = 1 m²/s (instelling in fm_j19: 0.1 m²/s)
- Smagorinsky-factor in horizontale turbulentie = 0 (instelling in fm_j19: 0.2)

Voor de variant wordt het bestaande D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-maas-j19_6-v2a) gebruikt.

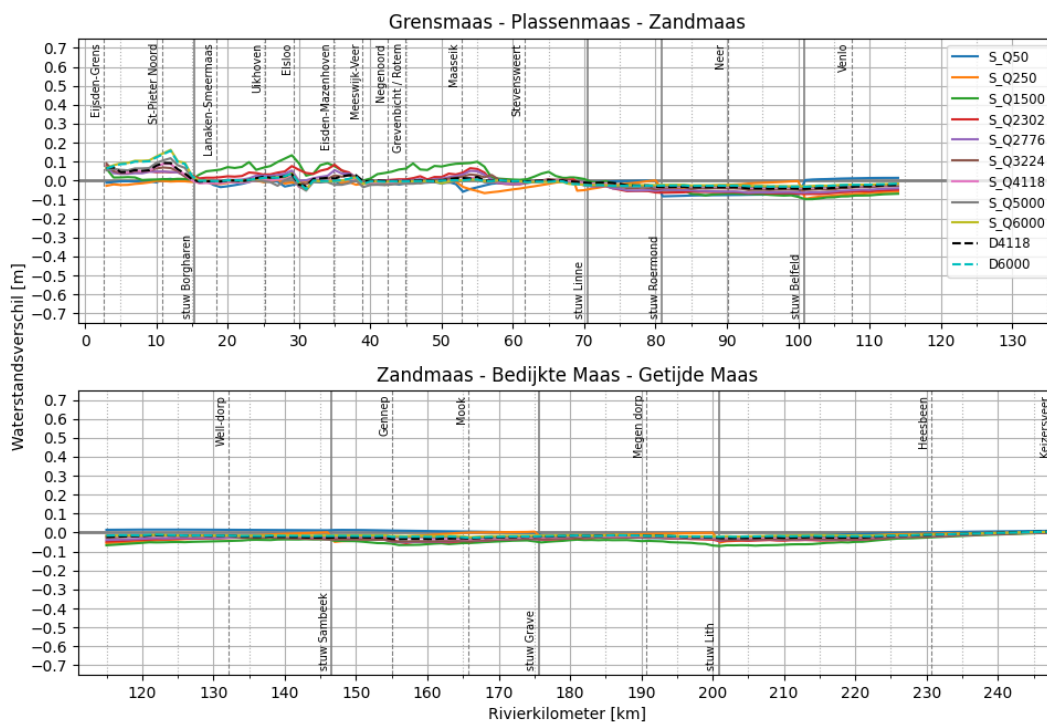
Tabel 7-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

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 (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_6 (G6)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

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 (enkel) de dynamische afvoergolf. Tabel 7-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 7-1.



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 twee dynamische afvoergolven.

Tabel 7-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van andere instelling voor horizontale viscositeit (fm_j19 t.o.v. fm_j19_waq_visc) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

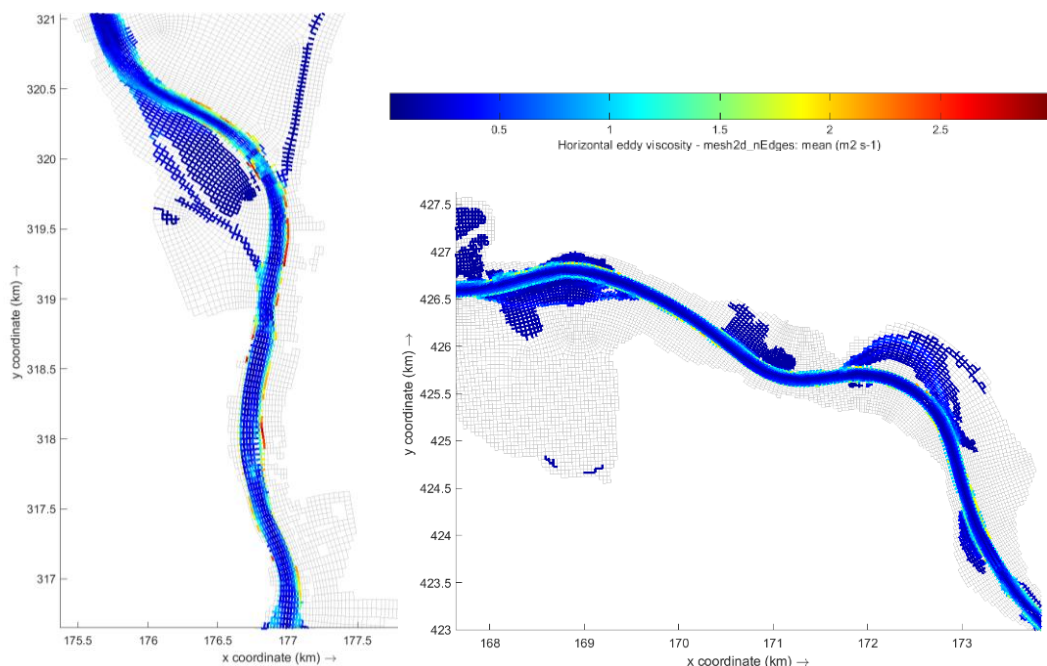
Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.009	0.024	-0.083	0.016
	stationair Q250	-0.020	0.021	-0.096	0.011
	stationair Q1500	-0.022	0.049	-0.098	0.134
	stationair Q2302	-0.020	0.034	-0.071	0.083
	stationair Q2776	-0.021	0.028	-0.064	0.073
	stationair Q3224	-0.018	0.025	-0.050	0.090
	stationair Q4118	-0.015	0.021	-0.042	0.088
	stationair Q5000	-0.013	0.023	-0.053	0.118
	stationair Q6000	-0.007	0.028	-0.047	0.162
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.013	0.023	-0.043	0.093
dynamisch Q6000 (max13)	-0.009	0.028	-0.046	0.158	

Uit Figuur 7-1 en Tabel 7-2 blijkt dat een aanpassing in de viscositeitsberekening van een uniforme coëfficiënt naar Smagorinsky, de modelresultaten zichtbaar beïnvloedt. Dit effect kan oplopen tot een absoluut waterstandsverschil van 16 cm bij een stationaire afvoer van 6000 m³/s (op het eerste deel van de Grensmaas). Opvallend is dat deze verschillen voor lagere afvoeren het grootst zijn op de (traag stromende) Zandmaas, terwijl doorgaans de Grensmaas gevoeliger is voor modelaanpassingen. Daarnaast zijn de verschillen relatief groot bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s, waarbij het zomerbed geheel gevuld is, maar het winterbed nog niet goed meestroomt.

Nadere interpretatie

Een toename in de waterstanden op de Grensmaas geeft aan dat er meer energieverlies plaatsvindt. Dit wordt veroorzaakt doordat, ten gevolge van een hogere viscositeit, meer momentum wordt overgedragen aan de stroming door het winterbed.

De toename in waterstanden bij St. Pieter (rond rkm 11) kan verklaard worden doordat de Smagorinsky-methode op dit traject een hoge waarde voor de viscositeit geeft door een sterke gradiënt in de stroomsnelheden (Yossef, 2017), zie Figuur 7-2 (links). Uit Annex 1 van Yossef (2017) blijkt dat de viscositeit op de overgang van zomerbed naar winterbed groter kan worden dan 1 m²/s en dat is hier ook het geval (plaatselijk oplopend tot boven de 3 m²/s).



Figuur 7-2 Horizontale eddyviscositeit rond rkm 11 (links) en rkm 200 (rechts) voor een stationaire afvoer van 1300 m³/s.

Op het benedenstroomse deel van de Maas is de waarde van de viscositeit berekend met Smagorinsky een stuk lager (ook in het zomerbed zelf), zie Figuur 7-2 (rechts).

De ordegrrootte van de verschillen is vergelijkbaar met de analyse van viscositeit tijdens de pilot-applicatie Rijntakken (paragraaf 4.6 van De Jong & Yossef, 2016).

We merken op dat de test die in deze paragraaf beschreven staat niet van invloed is op de verschillen tussen de modellen in Figuren 5.1 en 5.2. In die testen is een constante waarde voor de horizontale viscositeit toegevoegd, wat niets van doen heeft met de verschillen tussen Smagorinsky en de constante waarde, die in deze paragraaf onderzocht is.

7.2 Overlaatformulering

In de zesde-generatie modellen wordt gebruik gemaakt van de Villemonte formulering voor overlaten in plaats van de Tabellenboek aanpak die in de vijfde-generatie modellen wordt gebruikt. Het effect van deze overstap wordt hiermee 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). Deze aanpassing is zowel gedaan in de invoerfile (mdu-bestand), als in het overlatenbestand zelf, omdat door Baseline per overlaat is aangegeven of dit T (tabellenboek) of V (Villemonte) moet zijn.

Voor de variant wordt het bestaande D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-maas-j19_6-v2a) gebruikt.

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 (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_6 (G6)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

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 (enkel) de dynamische afvoergolf. Tabel 7-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 7-3.

In een andere vergelijking (De Jong & Yossef, 2016) werden verschillen in de orde grootte van 1 decimeter gevonden tussen Tabellenboek en Villemonte voor een vergelijking op de Waal voor het hoogwater van 1995 (dus met hogere afvoeren dan het hoogwater van 2010/2011) met een D-HYDRO model. Ook in de verschilanalyse van de Rijn zijn de verschillen in het gebruik van een andere overlaatformulering groter. De kleinere verschillen op de Maas kunnen worden verklaard doordat er minder kribben aanwezig zijn en er ook over het algemeen minder overlaten in het model zijn opgenomen die dwars op de stroming staan, zie Chavarrías (2023).

Als dezelfde analyse tussen het gebruik van Villemonte of Tabellenboek gedaan wordt op basis van het vijfde-generatie model in WAQUA kunnen vergelijkbare conclusies worden getrokken (zie bijlage C.2).

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 verschillen door een verbetering van de basisreferentie van 1995, de actualisatie naar 2019, de overstap van de vijfde naar de zesde generatie met een vergelijkbare schematisatie en de verschillen tussen de actuele en de beleidssituatie (met tussenstappen voor het bepalen van het effect van de vegetatielegger, vergunningen en planmaatregelen).

8.1 Verbetering Basisreferentie 1995

Het effect van het verbeteren van de basisschematisatie (j95) wordt hiermee in beeld gebracht. Nieuwe features in Baseline (zoals bruggen) worden daarbij niet meegenomen in de oude basisschematisatie. De bijbehorende randvoorwaarden worden overgenomen uit het zesde-generatie model. De resultaten van dit D-HYDRO-model worden vergeleken met de dflowfm2d-j95_6. De overige instellingen blijven gelijk.

Uitgangspunten

Voor de referentie (fm_j95_5) is de Baseline 5-schematisatie (baseline-maas-j95_5-v1) met een converter script (onderdeel van Baseline 6) omgezet naar een Baseline 6-schematisatie. Na deze conversie zijn nog enkele Baseline maatregelen ingemixt om een correct D-HYDRO-model te kunnen produceren. Dit zijn maatregelen *ma_kalibf_a7*, *ma_seckeiz_a1* en *ma_zomerb_a3*. Het D-HYDRO-model (dflowfm2d-maas-j95_5-v1) is vervolgens geproduceerd met behulp van de BAS2FM-methode als onderdeel van Baseline 6. Tot slot is in het referentiemodel het gebruik van bruggen uitgeschakeld. Deze referentie maakt gebruik van de kunstwerk definities van het j95_6 model. Zie ook bijlage A.2.

Voor de variant wordt het bestaand D-HYDRO model (fm_j95_6 = dflowfm2d-maas-j95_6-v1) gebruikt (inclusief bruggen). Dit model is ook gebruikt voor de kalibratie (en validatie) op de hoogwatergolf van 1995.

Tabel 8-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

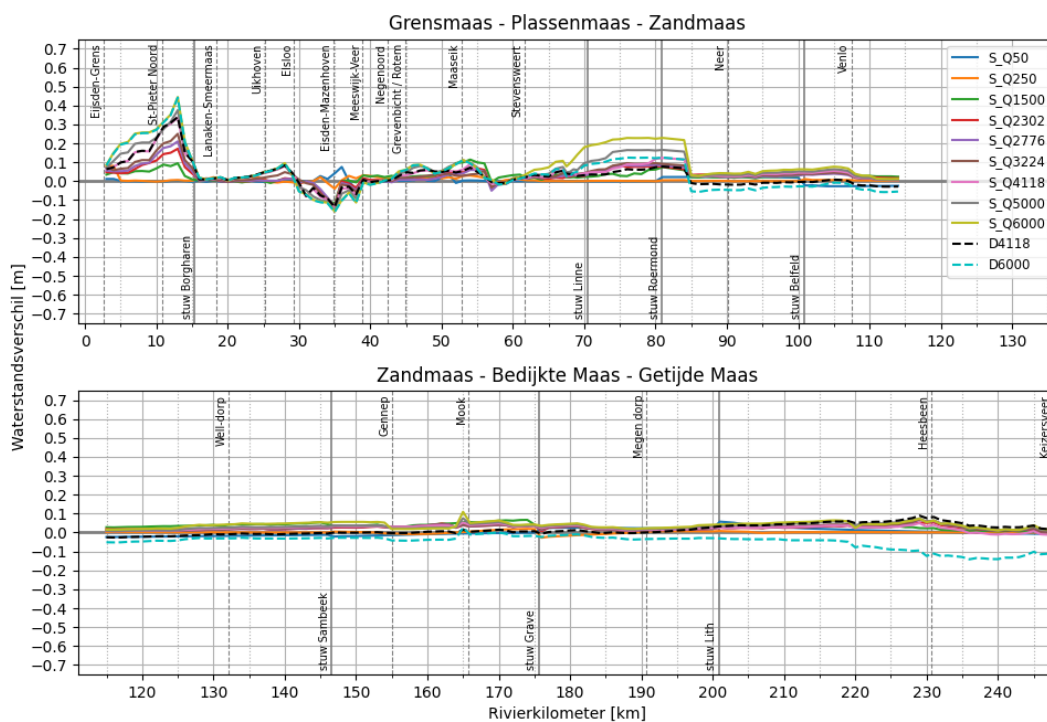
Tabel 8-1 Instellingen van variant (fm_j95_6) en referentie (fm_j95_5) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een andere Baseline basisreferentie.

	Variant	referentie
	fm_j95_6	fm_j95_5
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j95_6 (G6)	j95_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 1998	ecotopen 1998
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6

	Variant	
	fm_j95_6	fm_j95_5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-1 presenteert het effect van de verbetering van de basisreferentie ([fm_j95_6] t.o.v. [fm_j95_5]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven. Tabel 8-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-1.



Figuur 8-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een nieuwe basisreferentie (fm_j95_6 t.o.v. fm_j95_5) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van een nieuwe basisreferentie (fm_j95_6 t.o.v. fm_j95_5) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.003	0.018	-0.044	0.076
	stationair Q250	0.004	0.011	-0.039	0.081
	stationair Q1500	0.030	0.024	-0.120	0.114
	stationair Q2302	0.027	0.028	-0.132	0.172
	stationair Q2776	0.027	0.032	-0.135	0.211
	stationair Q3224	0.031	0.036	-0.135	0.250
	stationair Q4118	0.033	0.048	-0.143	0.337
	stationair Q5000	0.045	0.057	-0.155	0.376
	stationair Q6000	0.057	0.072	-0.159	0.445
	dynamisch Q4118 (max13)	0.023	0.052	-0.137	0.339
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.009	0.084	-0.162	0.442

Over de gehele rivierlengte zijn de verschillen grotendeels beperkt in vergelijking tot de andere analyses. Naarmate de afvoer toeneemt, nemen ook de minima en maxima toe zoals te zien in Tabel 8-2. De verschillen zijn het grootst direct bovenstrooms van Borgharen (rivierkilometer 13) tot orde 45 cm bij de hoogste afvoeren. Dit kan waarschijnlijk deels worden verklaard omdat in de Grensmaas de schematisatie van oeverlijnen is verbeterd (zoals in de hele schematisatie). Verder zijn in de nieuwe j95 schematisatie de bodemhoogtebodemoogtes van een aantal plassen en zijtakken (zoals de voorhaven van sluis Ternaaien) verbeterd en zijn nu 1 – 1,5 meter hoger dan in de oude schematisatie. Daarnaast zijn in het zesde-generatie model de brugpijlers meegenomen in de vorm van nieuwe beschikbare functionaliteit (in plaats van via de ruwheden zoals in de vijfde generatie het geval is). Het (opstuwend) effect van brugpijlers is daarbij een stuk hoger (en realistischer). Dit zie je vooral terug bij de St. Servaasbrug in Maastricht (rkm 13,2). Opvallend zijn ook de grotere negatieve verschillen (tot -16 cm) in het benedenstroomse deel (vanaf rkm 85) bij een dynamische afvoer van 6000 m³/s, terwijl dit voor de andere afvoeren overwegend positief is. Dit kan worden verklaard omdat in de zesde generatie een stuk van het Neerbeek-dal is toegevoegd, wat bij deze extreem hoge afvoergolf zorgt voor extra topvervlakking. De verdere daling vanaf km 220 wordt veroorzaakt doordat de Afgedamde Maas met de j95_5 schematisatie al eerder volloopt en daardoor voor minder topvervlakking zorgt tijdens de piek.

Bij lage afvoeren (250 m³/s en kleiner) zijn de verschillen minimaal (een bias kleiner dan 1 cm).

Nadere interpretatie

Doordat de waterstanden op basis van de zesde-generatie geometrie van 1995 (fm_j95) hoger zijn dan op basis van de vijfde-generatie geometrie voor afvoeren in het kalibratiebereik, zal dit in de kalibratie geresulteerd hebben in een lagere kalibratiefactor bij de kalibratie op hoogwater 1995 (De Jong, 2021). Het effect hiervan op de modelresultaten bij hogere afvoeren of in actuele modellen is echter niet te beredeneren omdat de combinatie van geometrie en kalibratiefactor hierin doorwerkt.

8.2 Actualisatie van 1995 naar 2019

Het effect van de actualisatie van de basisschematisatie (j95) naar de actuele situatie (j19) wordt hiermee in beeld gebracht.

Uitgangspunten

Voor de referentie wordt het bestaande D-HYDRO model (fm_j95_6 = dflowm2d-maas-j95_6-v1) gebruikt. Dit model is ook gebruikt voor de kalibratie (en validatie) op de hoogwatergolf van 1995. Voor de variant wordt het bestaande actuele D-HYDRO model (fm_j19 = dflowm2d-maas-j19_6-v2a) gebruikt.

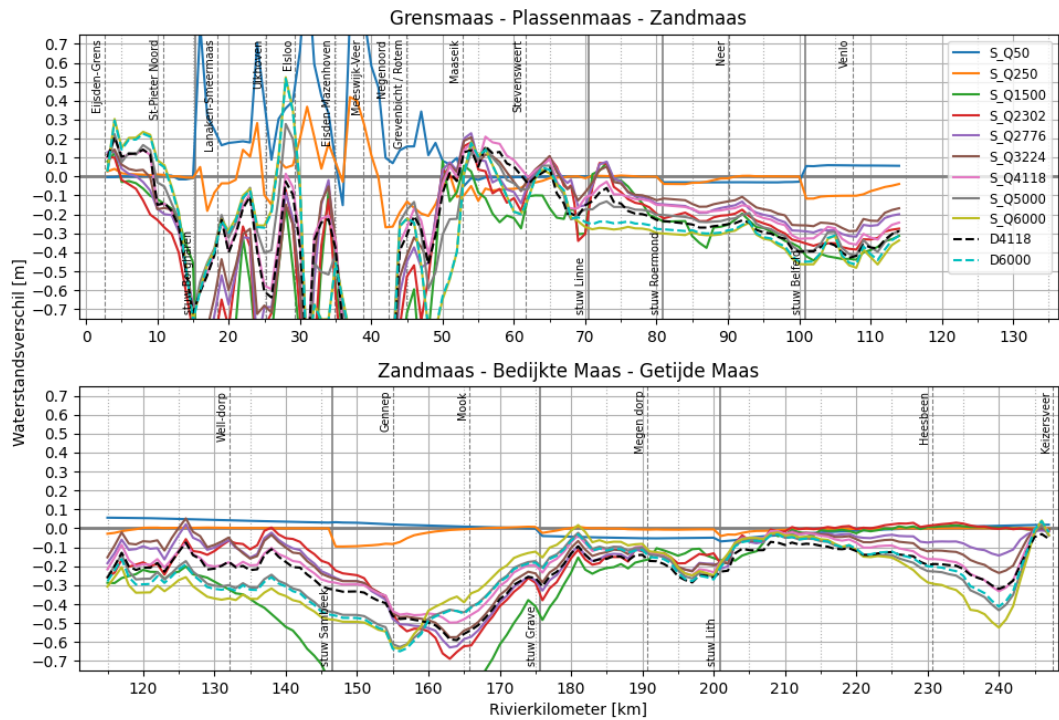
Tabel 8-5 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-3 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (fm_j95_6) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de actualisatie van de basisreferentie (1995) naar de actuele situatie (2019).

	Variant	referentie
	fm_j19	fm_j95_6
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j95_6 (G6)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 1998
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-2 presenteert het effect van de actualisatie vanaf de basisreferentie ([fm_j19] t.o.v. [fm_j95_6]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven. Tabel 8-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-2.



Figuur 8-2 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een de actualisatie vanaf de nieuwe basisreferentie (fm_j19 t.o.v. fm_j95_6) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van de actualisatie vanaf de nieuwe basisreferentie (fm_j19 t.o.v. fm_j95_6) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.054	0.175	-0.151	1.140
	stationair Q250	-0.011	0.078	-0.268	0.419
	stationair Q1500	-0.362	0.366	-1.514	0.125
	stationair Q2302	-0.259	0.337	-1.907	0.180
	stationair Q2776	-0.233	0.303	-1.907	0.228
	stationair Q3224	-0.218	0.289	-1.883	0.207
	stationair Q4118	-0.215	0.244	-1.710	0.210
	stationair Q5000	-0.252	0.232	-1.559	0.277
	stationair Q6000	-0.276	0.251	-1.438	0.524
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.256	0.247	-1.748	0.207
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.269	0.246	-1.446	0.516

De waterstandsverschillen door de actualisatie van 1995 naar 2019 zijn over de hele rivierlengte en het hele bereik groot en overwegend negatief (tot -1,9 meter). Dit wordt vooral veroorzaakt doordat in de tussenliggende periode talloze (rivierverruimende) maatregelen zijn uitgevoerd (o.a. de Maaswerken). Dit is vooral goed zichtbaar op de Grensmaas. De verschillen in het gestuwde bereik (50 en 250 m³/s) worden veroorzaakt doordat de stuwsturing in de tussenliggende jaren enigszins is aangepast. Op de Grensmaas (die niet wordt gestuwd) komen de verschillen in dit afvoerbereik door een andere zomerbedligging en de aanleg van grinddrempels.

Nadere interpretatie

De kalibratie voor het hoogste afvoerniveau is gedaan op het hoogwater van 1995 (De Jong, 2021b). Intussen hebben er flinke veranderingen in het systeem plaatsgevonden (veelal waterstandsverlagende maatregelen) en is de schematisatie ook verder verbeterd. Dit levert grote verschillen in waterstanden (en afvoerverdeling) op, zoals in deze paragraaf is getoond. De vraag is dan ook in hoeverre de gevonden kalibratiewaarden voor het hoogwater van 1995 nog helemaal geldig zijn voor de huidige situatie. Het hoogwater van 1995 is echter de meest recente hoge afvoergolf waarvan metingen beschikbaar zijn (ten tijde van de opzet en kalibratie van het model). Daarnaast zorgt het voor een conservatieve inschatting van de waterstanden onder extreme condities (=hoger dan bij gebruik van de kalibratiewaarden van een lager afvoerniveau), maar over het algemeen wel vergelijkbaar met die in de vijfde generatie (zie paragraaf 8.3). Er is daarom gekozen om de kalibratiewaarden voor 1995 wel mee te nemen. Zie voor een nadere uitleg en discussie De Jong (2021a).

8.3 Effect overgang G5 naar G6 voor actueel model 2019

Om het totale effect van de overstap naar de nieuwe generatie in beeld te brengen, wordt er een vergelijking gemaakt tussen het nieuwe actuele D-HYDRO model (dflowfm2d-maas-j19_6) en het vigerende actuele WAQUA-model (waqua-maas-j19_5).

Uitgangspunten

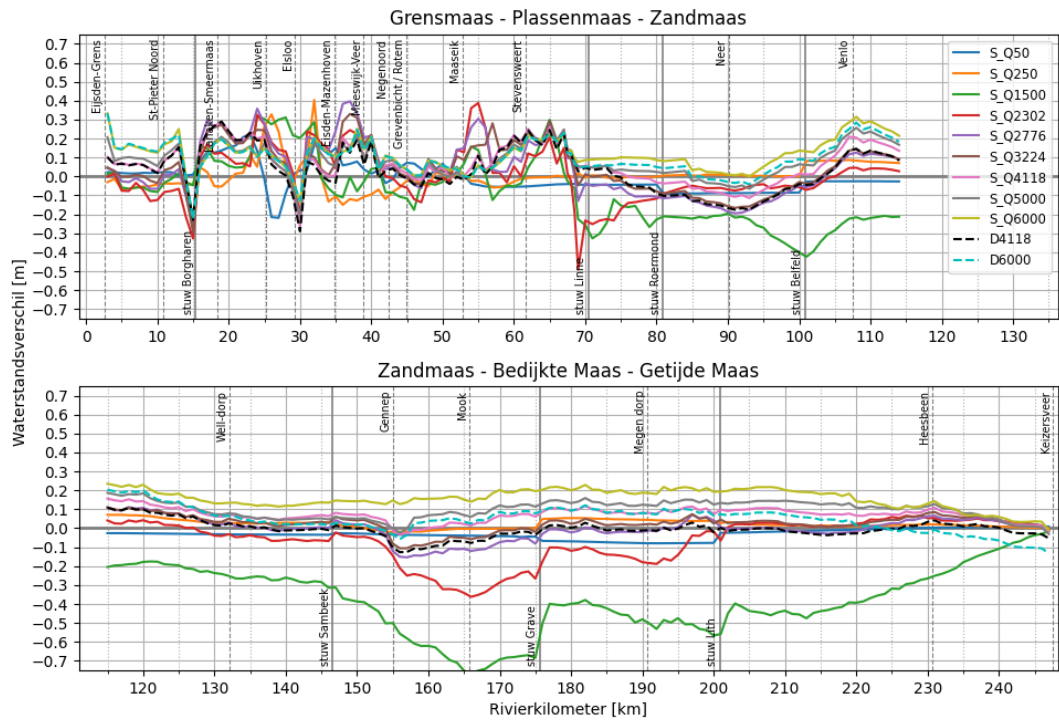
Voor de analyse wordt het vigerende actuele WAQUA-model (waq_j19 = waqua-maas-j19_5) als referentie gebruikt en het nieuwe actuele D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-maas-j19_6) als variant. Tabel 8-5 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-5 Instellingen van variant (fm_j19) en referentie (waq_j19) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de overstap van de vijfde naar de zesde generatie.

	Variant	referentie
	fm_j19	waq_j19
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	flexibel (G6)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinski	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G5 kalibratie
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-3 presenteert het totaal effect van de nieuwe generatie ([fm_j19] t.o.v. [waq_j19]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven. Tabel 8-6 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-3.



Figuur 8-3 Waterstandsverschillen in meters: totaal effect (fm_{j19} t.o.v. waq_{j19}) ten gevolge van combinatie van veranderingen tussen de vijfde en de zesde generatie voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-6 Statistieken waterstandsverschillen (in meters): totaal effect (fm_{j19} t.o.v. waq_{j19}) ten gevolge van combinatie van veranderingen tussen de vijfde en de zesde generatie voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.021	0.057	-0.218	0.225
	stationair Q250	0.015	0.057	-0.150	0.403
	stationair Q1500	-0.240	0.233	-0.769	0.318
	stationair Q2302	-0.033	0.133	-0.491	0.388
	stationair Q2776	0.020	0.112	-0.251	0.397
	stationair Q3224	0.037	0.094	-0.295	0.330
	stationair Q4118	0.070	0.078	-0.263	0.288
	stationair Q5000	0.091	0.071	-0.230	0.257
	stationair Q6000	0.138	0.073	-0.225	0.333
	dynamisch Q4118 (max13)	0.015	0.090	-0.289	0.290
	dynamisch Q6000 (max13)	0.071	0.082	-0.225	0.333

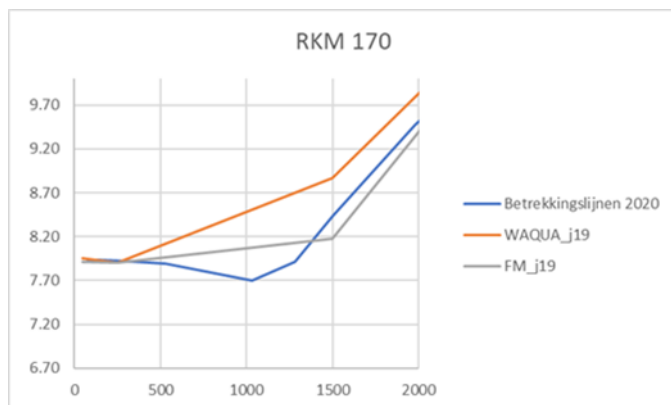
De verschillen in Figuur 8-3 zijn in feite een combinatie van de verschillen door de software (Figuur 5-1), verschillen door het rekenrooster (Figuur 6-1) en de verbetering van de basisreferentie (Figuur 8-1), andere maatregelen en een andere kalibratiemethodiek (o.a. met recentere perioden voor de lage afvoeren). Vergelijken we die figuren met elkaar, dan lijken de verschillen in rekenresultaten vooral door de software en het rekenrooster te worden bepaald. In de Grensmaas fluctueren de waterstandsverschillen het meest, wat ook in de andere figuren is te zien.

Bij de extreem hoge afvoeren ($6000 \text{ m}^3/\text{s}$) is er een waterstandstoename in het zesde-generatie model (fm_j19) oplopend tot 30 centimeter op de Zandmaas (bij Venlo) en een enkele uitschieter tot 30 cm op de Grensmaas. Ook valt op dat de verschillen helemaal bovenstrooms ook oplopen met toenemende afvoer tot +30 cm voor $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit wordt waarschijnlijk deels veroorzaakt door een verbetering van de basisreferentie (met name bij de St. Servaasbrug, zie ook paragraaf 8.1). Omdat in eerder onderzoek (Van der Deijl & De Jong, 2021a) de randvoorwaarden niet geheel identiek waren, is dit de eerste zuiverdere vergelijking van de overgang naar de zesde generatie.

Nadere interpretatie

Met name het waterstandsverschil bij een stationaire afvoer van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ springt er uit, waarbij het totale verschil zelfs oploopt tot -77 cm rond stuw Grave tussen rkm 160 en 170. De knikpunten in deze lijn komen overeen met de kalibratietrajecten in het zesde-generatie model, waardoor aannemelijk is dat de verschillen afkomstig zijn van de kalibratiemethodiek. Zo is in de vijfde generatie bij Mook (rkm 166) en Neer (circa rivierkilometer 89) een grote verandering in ruwheid (Figuur 4.1 uit De Jong, 2016) doorgevoerd voor het kalibratieniveau van $1450 \text{ m}^3/\text{s}$ en is in de zesde generatie bij Venlo (rkm 108) ook een grote verandering in ruwheid (Figuur 5.6 uit De Jong, 2021b) doorgevoerd (met name voor de kalibratieniveaus t/m $1700 \text{ m}^3/\text{s}$). Hoewel de kalibratieruwheden zelf niet eenvoudig met elkaar vergeleken kunnen worden¹¹, blijkt uit de vergelijking van de trends in ruwheden (Figuur 4.1 uit De Jong (2016) en Figuur 5.6 uit De Jong (2021b)) dat de ruwheid bij deze afvoer in het zesde-generatie model veel lager is, resulterend in veel lagere waterstanden.

Als echter een vergelijking wordt gemaakt met de Betrekkingslijnen 2020, die voor lage (veelvoorkomende) afvoeren vooral op metingen zijn gebaseerd, dan geeft het vijfde generatie model bij rkm 170 veel te hoge waterstanden (ca. 45 cm) en het zesde generatie model juist iets te lage waterstanden (ca. 25), zie Figuur 8-4. Figuur 8-4 Qh-relatie bij rkm 170 vanuit de Betrekkingslijnen 2020 samen met die gebaseerd op resultaten van het vijfde generatie model (WAQUA_j19) en het zesde generatie model (FM_j19). Samen zorgt dit voor het gevonden verschil van ca. 70 cm. De te lage waterstanden in het zesde generatie model blijkt ook uit de validatie op HW2011 (De Jong, 2021b): op de Zandmaas zijn de berekende waterstanden ongeveer 10 cm te laag.



Figuur 8-4 Qh-relatie bij rkm 170 vanuit de Betrekkingslijnen 2020 samen met die gebaseerd op resultaten van het vijfde generatie model (WAQUA_j19) en het zesde generatie model (FM_j19).

¹¹ De vijfde-generatie modellen gebruikte Van Rijn-coëfficiënten en de zesde-generatie modellen gebruiken een kalibratiefactor

In een eerdere versie van deze vershilanalyse werd als meest extreme afvoer die van 4118 m³/s gebruikt (hoogwaterreferentie). Op basis daarvan werd geconcludeerd dat het effect van de overstap van de vijfde naar de zesde generatie voornamelijk tot lagere waterstanden leidt. Voor de meest extreme afvoeren, zoals gebruikt binnen BOI, geldt dit echter niet en zijn de waterstanden hoger.

8.4 Vegetatielegger

In de beleidsmodellen wordt niet de actuele vegetatie gebruikt, maar de vegetatielegger. Het is daarom wenselijk om het effect van de vegetatielegger 2020 in beeld te brengen. Daarom wordt een vergelijking gemaakt tussen het actuele D-HYDRO model (dflowfm2d-maas-j19_6), waarin de ecotopenkartering van 2017 is opgenomen, en het model waarin de vegetatielegger 2020 is meegenomen (dflowfm2d-maas-j19leg_6).

In het model dat in WBI2017¹² is gebruikt (gebaseerd op beno14_5) werd de vegetatielegger nog niet meegenomen (wel is het effect van project Stroomlijn meegenomen door de vegetatie van 1996/1997 op te nemen).

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het nieuwe actuele D-HYDRO model (fm_j19 = dflowfm2d-maas-j19_6) als referentie gebruikt. De basis voor de variant is fm_j19 waarin de enige verandering is dat voor de ruwheid in het winterbed de vegetatielegger 2020 is opgenomen.

Tabel 8-7 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

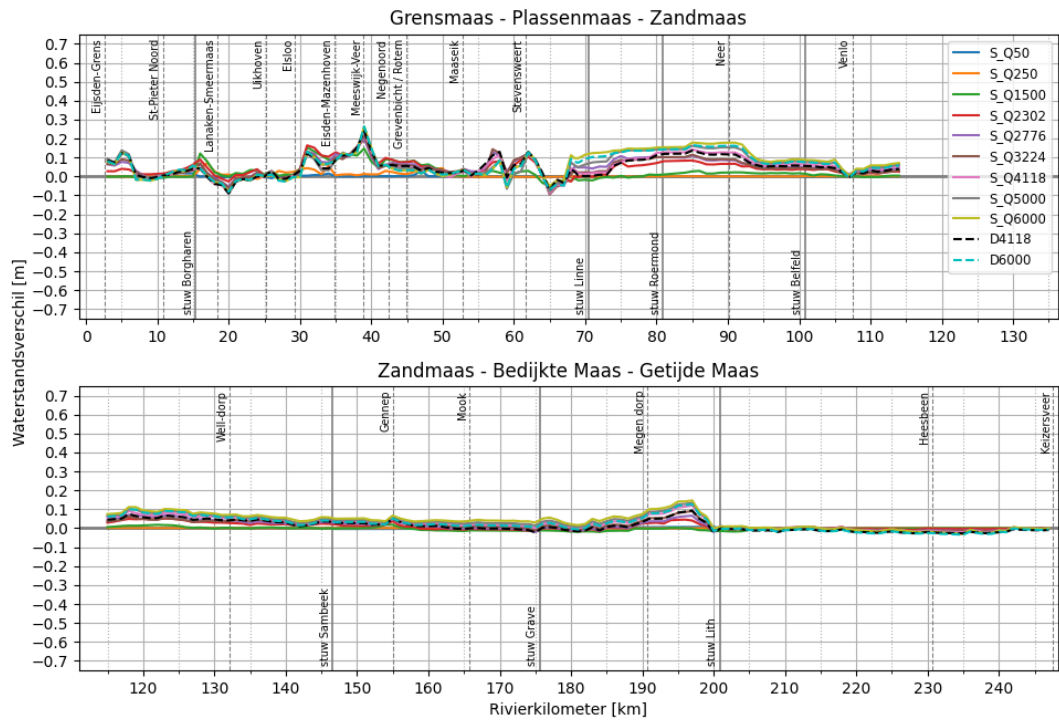
Tabel 8-7 Instellingen van variant (fm_j19_leg) en referentie (fm_j19) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het gebruik van een de vegetatielegger.

	Variant	referentie
	fm_j19_leg	fm_j19
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6 (G6)	j19_6 (G6)
Ecotopen	Vegetatielegger 2020	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-5 presenteert het effect van de vegetatielegger ([fm_j19_leg] t.o.v. [fm_j19]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven. Tabel 8-8 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-5.

¹² WBI2017 = Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



Figuur 8-5 Waterstandsverschillen ten gevolge van de vegetatielegger (fm_j19_leg t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

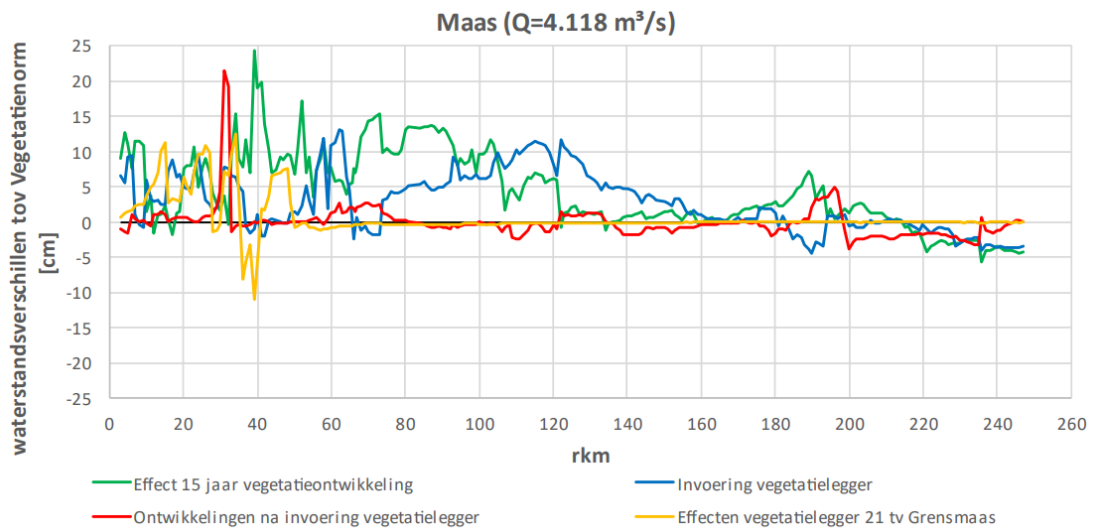
Tabel 8-8 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van de vegetatielegger (fm_j19_leg t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.000	0.004	-0.009	0.029
	stationair Q250	0.003	0.011	-0.012	0.072
	stationair Q1500	0.009	0.030	-0.051	0.154
	stationair Q2302	0.025	0.037	-0.082	0.200
	stationair Q2776	0.030	0.040	-0.088	0.204
	stationair Q3224	0.031	0.040	-0.096	0.218
	stationair Q4118	0.036	0.045	-0.090	0.238
	stationair Q5000	0.043	0.051	-0.092	0.259
	stationair Q6000	0.050	0.055	-0.082	0.263
	dynamisch Q4118 (max13)	0.028	0.045	-0.088	0.239
dynamisch Q6000 (max13)	0.039	0.054	-0.081	0.263	

De verschillen treden vooral bij hogere afvoeren (vanaf 2302 m³/s) wat voornamelijk leidt tot positieve verschillen met een maximum verschil van 26 cm. De verschillen treden vooral op bij deze hoge afvoeren, omdat de vegetatielegger voornamelijk in het winterbed tot aanpassingen leidt en deze pas bij deze afvoeren gaat meestromen. Bij deze afvoeren is er overigens ook een consistente toename van het waterstandsverschil over de gehele lengte van de rivier te zien. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de vegetatielegger een hogere ruwheid heeft dan de ecotopenkartering. Bij toenemende afvoer stroomt meer winterbed mee, waardoor de verschillen steeds groter worden.

Nadere interpretatie

In de Toets Grote Rivieren (Huthoff et al. 2022) is een nadere analyse gedaan van het effect van de vegetatielegger ook ten opzicht van de vegetatie van 1996 (zoals deze in WBI2017 is toegepast) bij een dynamische afvoer van 4118 m³/s, zie Figuur 8-6. De resultaten zijn gebaseerd op berekeningen met (een aangepaste versie van) waqua-maas-j21_5-v1, dus o.b.v. de vijfde generatie. Daaruit blijkt dat het effect van 15 jaar vegetatieontwikkeling (vegetatie 1996 vs vegetatie 2012) op de Maas bovenstrooms van rivierkm 120 zorgt voor een verhoging van ca. 10 cm en benedenstrooms van rivierkm 120 alleen voor zeer lokale effecten van enkele cm. De invoering van de vegetatielegger 2012 zorgt vervolgens tussen rivierkm 80 en 140 voor een verhoging van tussen 5 en 10 cm en de update naar de vegetatielegger 2020 zorgt nabij rivierkm 30 voor een lokale piek met een waterstandverhoging van ca. 20. Het totale effect voor de invloed van het verschil in vegetatie tussen BOI2023 (o.b.v. vegetatielegger 2020) en WBI2017 (o.b.v. vegetatie 1996) voor de Maas zal een combinatie van deze drie effecten zijn (dus orde 10-15 cm met lokale uitschieters van 20-25 cm, vooral in het bovenstroomse deel). Dit is dus groter dan het verschil tussen de actuele vegetatie 2017 en de vegetatielegger 2020. Conform de analyse in de rest van deze paragraaf wordt verwacht dat de verschillen nog verder zullen toenemen voor meer extreme afvoeren.



Figuur 8-6 Waterstandsverschillen ten gevolge van 15 jaar vegetatieontwikkeling (vegetatie 1996 vs vegetatie 2012), invoering van de vegetatielegger (vegetatie 2012 vs vegetatielegger 2012) en update van de vegetatielegger (2012 naar 2020) voor een dynamische afvoergolf van 4.118 m³/s. Bron: Huthoff et al. (2022).

8.5 Vergunningen

In het beno-model (dat ook voor BOI wordt toegepast) worden alle verleende vergunningen en planmaatregelen meegenomen. Bedoeling is om het effect van enkel de verleende vergunningen te beoordelen: er wordt een vergelijking gemaakt met het model zonder (dflowfm2d-maas-j19leg_6) en met verleende vergunningen (dflowfm2d-maas-j19vgn_6) om het effect van deze vergunningsmaatregelen in beeld te brengen. Hierin zijn dus de planmaatregelen nog niet meegenomen, omdat die in de volgende stap worden geanalyseerd.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het nieuwe actuele D-HYDRO model inclusief vegetatielegger (fm_j19_leg) als referentie gebruikt. De basis voor de variant is fm_j19_vgn waarin de enige verandering is dat ook alle vergunningsmaatregelen (die tijdens de bouw van het beno19-model beschikbaar waren) zijn opgenomen.

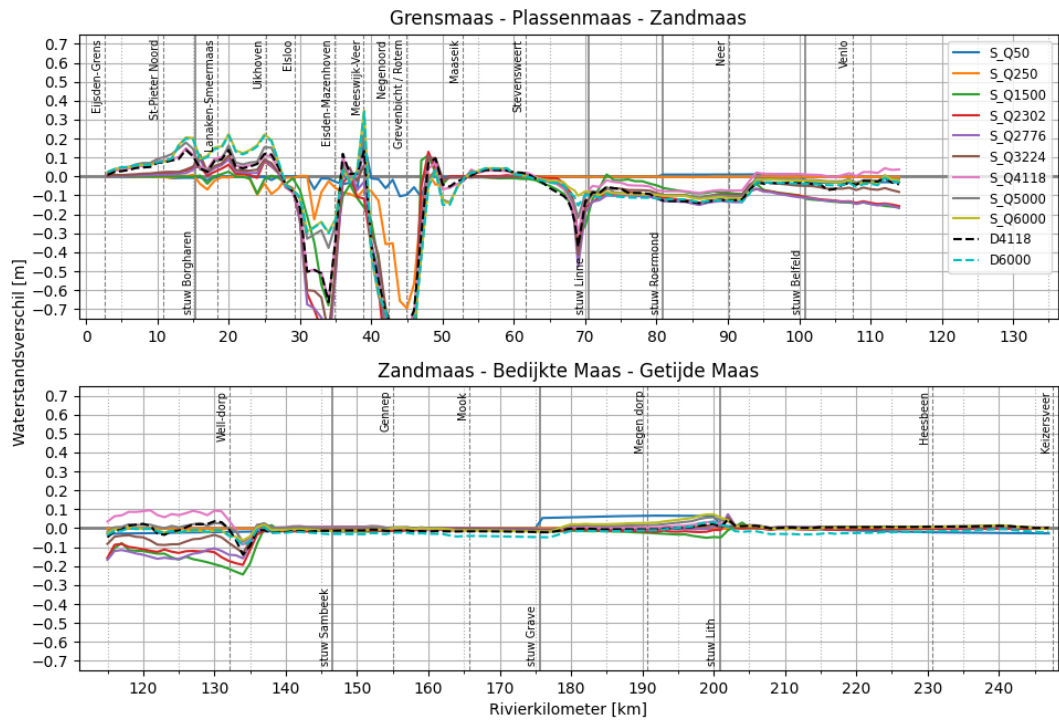
Tabel 8-9 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 8-9 Instellingen van variant (fm_j19_vgn) en referentie (fm_j19_leg) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het meenemen van vergunningen.

	Variant	referentie
	fm_j19_vgn	fm_j19_leg
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	j19_6+vergunningen	j19_6 (G6)
Ecotopen	vegetatielegger	vegetatielegger
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-7 presenteert het verschil van de verleende vergunningen ([fm_j19_vgn] t.o.v. [fm_j19_leg]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven. Tabel 8-10 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-7.



Figuur 8-7 Waterstandsverschillen (meters) ten gevolge van vergunningen (fm_j19_vgn t.o.v. fm_j19_leg) voor de verschillende stationaire afvoeren en de twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-10 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van vergunningen (fm_j19_vgn t.o.v. fm_j19_leg) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.003	0.031	-0.109	0.180
	stationair Q250	-0.018	0.081	-0.696	0.015
	stationair Q1500	-0.076	0.180	-1.367	0.112
	stationair Q2302	-0.075	0.174	-0.986	0.130
	stationair Q2776	-0.071	0.169	-0.912	0.106
	stationair Q3224	-0.050	0.152	-0.846	0.115
	stationair Q4118	-0.025	0.149	-0.835	0.148
	stationair Q5000	-0.030	0.148	-0.901	0.236
	stationair Q6000	-0.027	0.148	-0.894	0.349
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.043	0.146	-0.824	0.140
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.044	0.147	-0.898	0.341

Figuur 8-7 laat op een aantal locaties forse verschillen zien. Duidelijk zichtbaar zijn de rivierverruiming bij Maasband (rkm 35) en bij Koeweide/Elerweerd (rkm 45). Over het algemeen zorgen deze vergunningen voor een daling in de waterstand bij een hoge afvoer, voornamelijk te zien in de Grensmaas. Deze vergunningen komen namelijk deels uit rivierverruimende maatregelen in programma's zoals Maaswerken waarin waterstands daling bij hoge afvoer één van de beoogde doelen is. De locatie van deze maatregelen worden uitgebreid beschreven in Van der Deijl et al. (2021). De waterstands daling kan oplopen tot -137 cm bij 1500 m³/s. Rond Well (rkm 132) zorgen de vergunningen voor een afname in

waterstand bij alle afvoeren, behalve bij een afvoer van 4118 m³/s waar een toename te zien is. Bij extreem hoge afvoeren wordt het effect van de maatregelen over het algemeen juist weer minder (doordat de hele uiterwaard al is ondergestroomd) en zie je, vooral op de Grensmaas, extra opstuwing ontstaan tussen de maatregelen.

8.6 Planmaatregelen

In het beno-model (dat ook voor BOI wordt toegepast) worden, naast alle verleende vergunningen, ook alle planmaatregelen meegenomen die een officiële status hebben en waarvan het dus (vrij) zeker is dat ze worden uitgevoerd¹³. Er wordt een vergelijking gemaakt met het model zonder deze planmaatregelen maar met verleende vergunningen (dflowfm2d-maas-j19vgn_6) en met deze planmaatregelen (dflowfm2d-maas-beno19_6) om het effect van deze planmaatregelen in beeld te brengen.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het nieuwe actuele D-HYDRO model inclusief vegetatielegger en vergunningen (fm_j19_vgn) als referentie gebruikt. De basis voor de variant is fm_j19_vgn waarin de enige verandering is dat ook alle planmaatregelen zijn opgenomen (fm_beno19 = dflowfm2d-maas-beno19_6).

Tabel 8-11 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

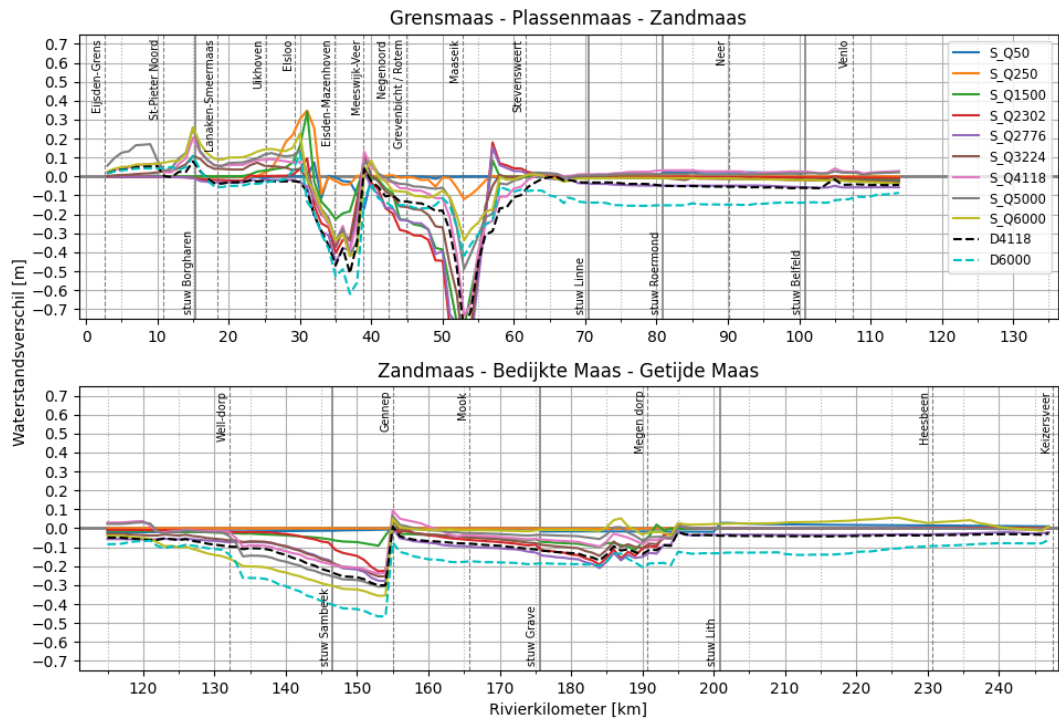
Tabel 8-11 Instellingen van variant (fm_beno19) en referentie (fm_j19_vgn) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door het meenemen van planmaatregelen.

	Variant	referentie
	fm_beno19	fm_j19_vgn
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	beno19 (=hr2023)	j19_6+vergunningen
Ecotopen	vegetatielegger	vegetatielegger
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 8-8 presenteert het effect van de planmaatregelen ([beno19] t.o.v. [fm_j19_vgn]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de dynamische afvoergolf. Tabel 8-12 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-8.

¹³ De status 'officieel' betekent dat er een bestuurlijk akkoord is en dat financiën beschikbaar zijn voor de realisatie. Daar bovenop kan DGWB nog speciale verzoeken hebben om bepaalde maatregelen mee te nemen, maar dan moet RWS eventuele bedenkingen en adviezen wel van te voren hebben ingebracht.



Figuur 8-8 Waterstandsverschillen ten gevolge van de planmaatregelen (fm_beno19 t.o.v. fm_j19_vgn) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-12 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van de planmaatregelen (fm_beno19 t.o.v. fm_j19_vgn) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.003	0.020	-0.170	0.073
	stationair Q250	0.003	0.041	-0.119	0.348
	stationair Q1500	-0.039	0.110	-0.800	0.341
	stationair Q2302	-0.057	0.138	-0.962	0.180
	stationair Q2776	-0.090	0.131	-0.986	0.155
	stationair Q3224	-0.052	0.118	-0.951	0.109
	stationair Q4118	-0.030	0.107	-0.736	0.205
	stationair Q5000	-0.025	0.103	-0.488	0.259
	stationair Q6000	-0.033	0.112	-0.421	0.260
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.086	0.110	-0.825	0.080
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.146	0.110	-0.619	0.123

Figuur 8-8 toont net als Figuur 8-7 grote waterstandsdingen op verschillende locaties en deze zijn wederom het sterkst in de Grensmaas voorbij Elsloo. De locaties waar de grootste verschillen optreden worden ook toegelicht in Van der Deijl et al. (2021). Daarnaast is tijdens de bouw van het beno22 model geconstateerd dat er in het beno19-model nog kunstwerken ontbreken in de in- en uitlaatkanalen bij de maatregelen Elerweerd (rkm 47-49), Heerenlaak (rkm 53) en Contelmo (rkm 55), zie Fujisaki, Agtersloot & Becker (2023). Het wel meenemen

van deze kunstwerken zorgt voor een maximale waterstandstoename van 63 cm (rkm 53 bij een stationaire som van 3200 m³/s)¹⁴.

De planmaatregelen zorgen dus ook voor voornamelijk waterstandsdeling bij vooral hoge afvoeren oplopend tot bijna -99cm bij een stationaire afvoer van 2776 m³/s. Voor extreem hoge afvoeren neemt de waterstand in het benedenstroomse deel voor de stationaire sommen juist weer iets toe. In de dynamische sommen is daarentegen een nog sterkere daling te zien. Blijkbaar leiden de planmaatregelen op de Grensmaas voor de allerhoogste afvoer tot een aanzienlijke topvervlakking van de afvoergolf.

8.7 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-maas-beno19_6) en het actuele model (dflowfm2d-maas-j19_6).

Uitgangspunten

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

Tabel 8-13 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

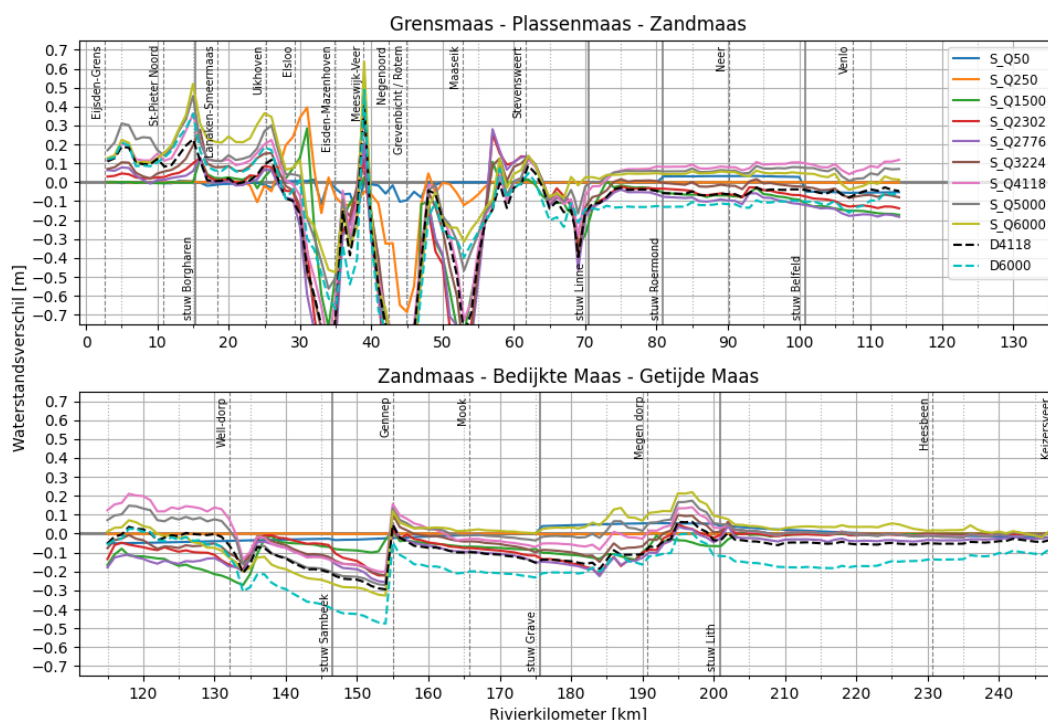
Tabel 8-13 Instellingen van variant (fm_beno19) en referentie (fm_j19) voor het bepalen van het verschil tussen de actuele en beleidssituatie.

	Variant	
	fm_beno19	referentie fm_j19
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	beno19 (=hr2023)	j19_6 (G6)
Ecotopen	Vegetatielegger 2020	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

¹⁴ Verder is geconstateerd dat de doorstroming bij Contelmo, Oude Maas en de Haven Wanssum nog niet optimaal is en dat de hoogtepunten van de kade Boschmolenplas ontbreken.

Resultaten

Figuur 8-9 presenteert het verschil tussen de beleidssituatie [beno19] en de actuele situatie [fm_j19]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren en de dynamische afvoergolf. Tabel 8-14 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 8-9. Deze vergelijking is gelijk aan wat gerapporteerd wordt in Van der Deijl et al. (2021), maar met andere randvoorwaarden.



Figuur 8-9 Waterstandsverschillen beleidssituatie en actueel (fm_beno19 t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel 8-14 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) beleidssituatie en actueel (fm_beno19 t.o.v. fm_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.006	0.034	-0.165	0.055
	stationair Q250	-0.011	0.088	-0.686	0.395
	stationair Q1500	-0.107	0.211	-1.519	0.285
	stationair Q2302	-0.107	0.225	-1.201	0.257
	stationair Q2776	-0.131	0.218	-1.137	0.281
	stationair Q3224	-0.071	0.199	-0.994	0.388
	stationair Q4118	-0.018	0.194	-0.869	0.498
	stationair Q5000	-0.012	0.188	-0.896	0.566
	stationair Q6000	-0.010	0.197	-0.943	0.636
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.101	0.188	-0.983	0.414
dynamisch Q6000 (max13)	-0.151	0.194	-1.017	0.489	

Figuur 8-9 presenteert in feite het gecombineerde verschilbeeld veroorzaakt door de vegetatielegger (Figuur 8-5), de vergunningen (Figuur 8-7) en de planmaatregelen (Figuur 8-8). De combinatie van vegetatielegger, verleende vergunningen en planmaatregelen leiden voornamelijk tot waterstands dalingen bij hoge afvoeren, met zeer sterke dalingen in de Grensmaas met een minimum van -152 cm. De waterstandsdaling tussen rkm 47 en 55 kan grotendeels worden toegeschreven door het ontbreken van in- en uitlaatwerken bij de maatregelen van Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo (zie ook paragraaf 8.6). Er treedt echter ook een waterstandstoename op bovenstrooms van de Zandmaas bij hogere afvoeren (4118 m³/s), waarbij het verschil kan oplopen tot rond 20 cm (rond rivierkilometer 120). Dit geldt echter alleen voor de stationaire simulatie en niet voor de dynamische afvoergolf. Voor nog extremere afvoeren (5000 en 6000 m³/s) neemt het verschil hier juist weer af, terwijl het verder benedenstrooms toeneemt.

De grootste uitschieter naar boven (64 cm) is ook nu weer te vinden op de Grensmaas (rond rkm 38) voor de meest extreme stationaire afvoer (6000 m³/s). Dit is vergelijkbaar met de optelsom van de pieken op dezelfde locatie door de vegetatielegger (26 cm), vergunningen (35 cm) en planmaatregelen (8 cm). Voor een dynamische afvoer van 6000 m³/s is dezelfde piek echter bijna 15 cm lager (49 cm). Ook nu zien we, net als bij de planmaatregelen (zie Figuur 8-8), dat benedenstrooms er een sterke daling is te zien bij een extreme dynamische afvoer van 6000 m³/s.

9 Verschilanalyse: randvoorwaarden

Dit hoofdstuk analyseert het effect van het gebruik van verschillende randvoorwaarden 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 en een andere qh-relatie benedenstrooms. Er wordt daarbij expliciet gekeken naar de randvoorwaarden die voor WBI2017 en BOI2023 worden toegepast.

9.1 Randvoorwaarden BOI

Het effect van het gebruik van andere randvoorwaarden tussen de toepassing binnen WBI2017 en BOI2023 wordt hiermee in beeld gebracht. Binnen WBI2017 en BOI2023 worden echter verschillende afvoerniveaus gebruikt, zie Tabel 9-1. Een vergelijking kan alleen worden gedaan met randvoorwaarden van hetzelfde afvoerniveau. Dit zijn dus de afvoergolven met een piekafvoer van: 1300, 5000 en 6000 m³/s. De gebruikte afvoergolven binnen BOI2023 hebben ook een kortere simulatieperiode dan die uit WBI2017, maar aangezien we alleen kijken naar de piekwaterstanden (max13), heeft dit geen effect op de uiteindelijke analyse.

Tabel 9-1 Gebruikte afvoerniveaus binnen WBI2017 en BOI2023. De dikgedrukte afvoerniveaus zijn gelijk binnen beide toepassingen.

WBI 2017	BOI 2023
1300	1300
	1700
2260	2100
	2500
3275	2800
3394	3600
3800	
3950	
4000	4100
4600	4500
5000	5000
5500	
6000	6000
6500	

Uitgangspunten

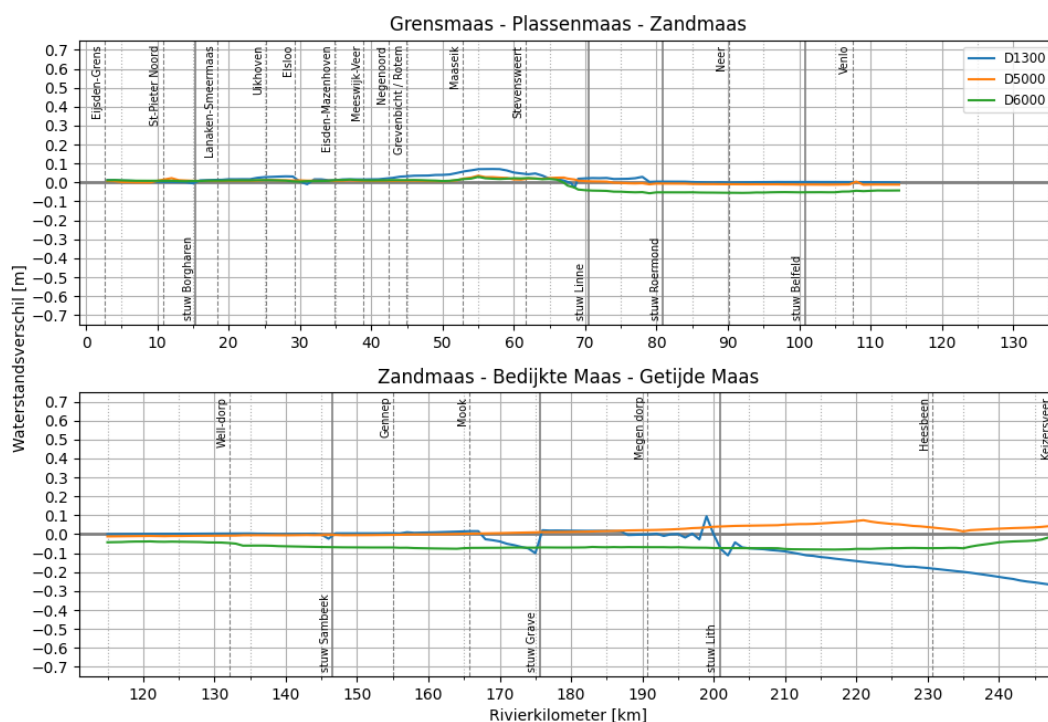
Om alleen het effect van het gebruik van andere randvoorwaarden te analyseren wordt als referentie het actuele beleidsmodel gebruikt (gelijk aan het model dat binnen BOI2023 wordt gebruikt), waarbij de randvoorwaarden van WBI2017 worden toegepast (fm_beno19_rvw_oud). Voor de variant wordt hetzelfde model gebruikt, maar dan met toepassing van de randvoorwaarden uit BOI2023 (fm_beno19_rvw_nieuw). Tabel 9-2 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 9-2 Instellingen van variant (fm_beno19_rvw_nieuw) en referentie (fm_beno19_rvw_oud) voor het bepalen van het totale verschil veroorzaakt door de nieuwe randvoorwaarden.

	Variant	referentie
	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud
Software	D-HYDRO	D-HYDRO
Rooster	flexibel (G6)	flexibel (G6)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Villemonte
Viscositeit	Smagorinski	Smagorinski
Schematisatie		
Geometrie	beno19 (=hr2023)	beno19 (=hr2023)
Ecotopen	vegetatielegger	vegetatielegger
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G6 kalibratie
Structures	G6	G6
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Lixhe
Lateralen	G6	G5
Qh-relatie	BOI2023	WBI2017

Resultaten

Figuur 9-1 presenteert het effect van de nieuwe randvoorwaarden ([fm_beno19_rvw_nieuw] t.o.v. [fm_beno19_rvw_oud]) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de drie dynamische afvoergolven. Tabel 9-3 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 9-1.



Figuur 9-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van de nieuwe randvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. fm_beno19_rvw_oud) voor drie dynamische afvoergolven.

Tabel 9-3 Statistieken waterstandsverschillen (in meters) ten gevolge van de nieuwe randvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. fm_beno19_rvw_oud) voor drie dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	dynamisch Q1300 (max13)	-0.022	0.074	-0.265	0.095
	dynamisch Q5000 (max13)	0.012	0.020	-0.012	0.074
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.041	0.035	-0.081	0.030

In Figuur 9-1 is te zien dat het effect van de nieuwe randvoorwaarden over het algemeen minder dan 10 cm bedraagt. Alleen voor de dynamische 1300 m³/s afvoer loopt het verschil benedenstrooms op naar -27 cm, wat kan worden verklaard door het verschil in de gebruikte Qh-relatie (zie ook bijlage B.2 verwacht verschil ca. 30 cm). Wat verder opvalt is dat voor de dynamische 6000 m³/s afvoer benedenstrooms van Linne het verschil alleen nog maar negatief is en dat dit oploopt naar -8 cm rond stuw Lith. Verschillen zijn echter in dezelfde orde grootte als gevonden in Van der Veen (2018) en zijn plausibel op basis van de verschillen in de waarden (en locaties) van de latere lozingen.

Verder vallen de verschillen bij 1300 m³/s rond de stuwen Lith, Grave en Sambeek op. Hiervoor gelden 2 opmerkingen (zie figuur 9 en 10 uit Fujisaki, Agtersloot & Becker (2023)):

- 1 De sturing bij deze drie stuwen wordt bij dynamische afvoer van 1300 m³/s instabiel vanwege de overgang van het ene naar het andere streefpeil (die op verschillende locaties gedefinieerd zijn).

De max13-waarden zijn bij een dynamische afvoer van 1300 m³/s benedenstrooms van rkm 140 niet representatief voor het moment van passage van de hoogwaterpiek. De max13 kan daar een vrij willekeurig moment in je tijdseries zijn, en dat betekent dat dit in het ene model anders kan zijn dan in het andere. De maximale afvoerpiek veroorzaakt daar namelijk niet de maximale waterstand. De maximale waterstand wordt namelijk bereikt tijdens actieve sturing in de aanloop en afloop van de afvoergolf, en wordt sterk bepaald door eventuele instabiliteiten of inspeleffecten.

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 randvoorwaarden 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 randvoorwaarden) en vervolgens een analyse waarbij ook de bijbehorende randvoorwaarden worden toegepast.

10.1 BOI2023 vs WBI2017 met dezelfde randvoorwaarden

Voor BOI is het wenselijk om te zien wat het totale verschil in resultaten is t.o.v. de vorige ronde (WBI2017), waarbij alleen maar gekeken wordt naar het effect van de overstap naar de nieuwe modelschematisatie (dus met dezelfde randvoorwaarden= WBI2017). Er wordt daarom een verschilanalyse gedaan tussen het nieuwe zesde-generatie hr2023-model (dflowfm2d-maas-hr2023_6 = dflowfm2d-maas-beno19_6) en het vigerende model uit WBI2017 (waqua-maas-hr2017_5), waarbij dezelfde randvoorwaarden worden gehanteerd als in hoofdstuk 5 t/m 8. . We analyseren alleen het effect voor het 'standaard' Maas-model waarin de maaskades overstroombaar zijn.

Uitgangspunten

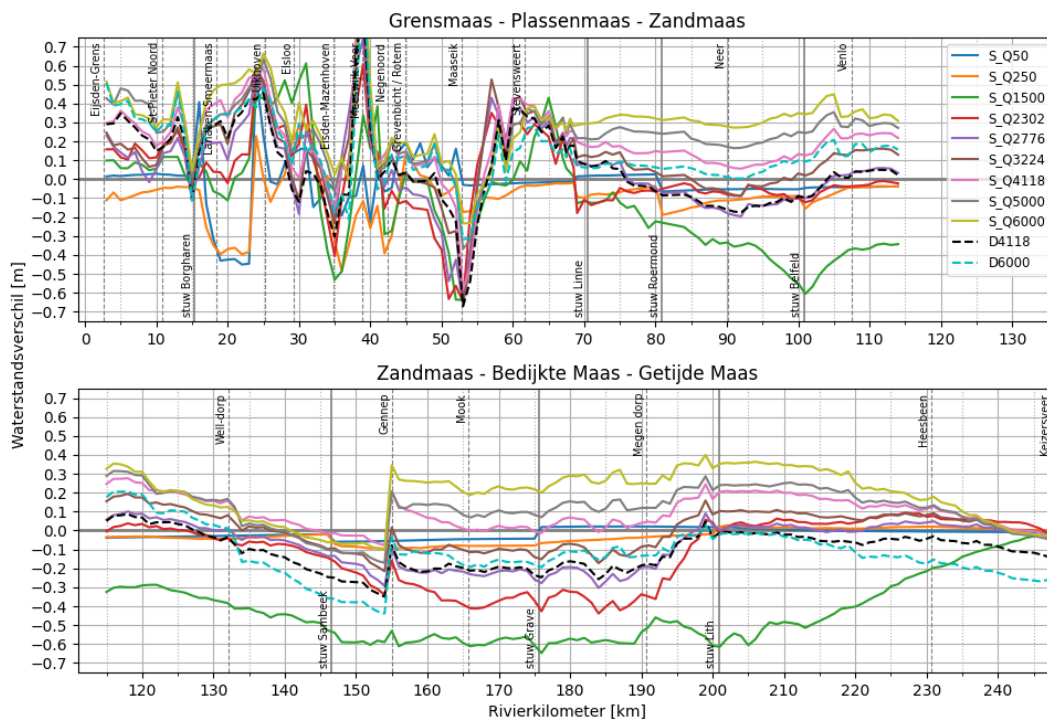
Voor de analyse wordt het vigerende WAQUA WBI2017-model (waq_hr2017 = waqua-maas-hr2017_5) als referentie gebruikt en het nieuwe D-HYDRO BOI-model (fm_hr2023 = dflowfm2d-maas-hr2023_6 = dflowfm2d-maas-beno19_6 = fm_beno19) als variant. Tabel 10-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie 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 (G6)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinski	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	hr2023 (=beno19)	hr2017
Ecotopen	vegetatielegger	ecotopen 1998
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G5 kalibratie
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Resultaten

Figuur 10-1 presenteert het verschil tussen het beoogde model voor BOI2023 (= het beno19_6 model welke voor BOI wordt opgeleverd als hr2023-modelschematisatie) 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 de twee dynamische afvoergolven. Tabel 10-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 10-1.



Figuur 10-1 Waterstandsverschillen 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 twee dynamische afvoergolven.

Tabel 10-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) tussen nieuw beoogde BOI2023 model en hr2017-model uit vorige toetsronde (WBI2017) (fm_hr2023 t.o.v. waq_hr2017) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.017	0.093	-0.451	0.553
	stationair Q250	-0.057	0.095	-0.484	0.287
	stationair Q1500	-0.284	0.280	-0.648	0.612
	stationair Q2302	-0.051	0.203	-0.648	0.608
	stationair Q2776	-0.013	0.180	-0.655	0.745
	stationair Q3224	0.057	0.165	-0.655	0.838
	stationair Q4118	0.141	0.155	-0.582	1.042
	stationair Q5000	0.178	0.157	-0.368	1.117
	stationair Q6000	0.243	0.164	-0.234	1.226
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.028	0.185	-0.671	0.930
	dynamisch Q6000 (max13)	0.003	0.204	-0.439	1.076

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

De verschillen in Figuur 10-1 komen qua patroon redelijk overeen met de verschillen die in paragraaf 8.3 zijn gepresenteerd, 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 (WAQUA t.o.v. D-HYDRO) en het nieuwe rekenrooster (gestructureerd t.o.v. ongestructureerd). Op sommige plekken zijn de verschillen groter doordat er ook verschillen zijn in de toegepaste maatregelen in beide modellen. De waterstandsverschillen variëren tussen minimaal -67 cm en maximaal +123 cm.

De grootste uitschieter naar boven is ook nu weer te vinden op de Grensmaas (rond rkm 38) voor de meest extreme afvoer (6000 m³/s). Dit is overeenkomstig met de locatie van de piek die waarneembaar is in het verschil tussen het beleidsmodel en het actuele model (Figuur 8-9) en is dus waarschijnlijk grotendeels toe te schrijven aan een andere schematisatie van vergunningen en planmaatregelen.

Wederom valt het negatieve waterstandsverschil voor afvoer 1500 m³/s weer op, zoals ook in Figuur 8-3 is te zien. Zoals in paragraaf 8.3 al vermeldt, lijkt dit te komen door een verschil in gekalibreerde ruwheid tussen de vijfde- en zesde-generatie modelschematisatie, waarbij in het vijfde-generatie model de kalibratieruwheid gemiddeld hoger ligt dan in het zesde-generatie model. Dit in combinatie met een betere uitlijning van het rekenrooster en een andere afhandeling van de viscositeit, die beide het meeste effect hebben voor deze zomerbedvullende afvoer.

Bij de extreem hoge stationaire afvoeren (6000 m³/s) nemen de waterstanden over grote delen van het beno19_6 model toe: op de Zandmaas tussen 0 en +45 cm, en op de Grensmaas een sterk wisselend effect met uitschieters tot -67 en +123 cm. Dit komt deels door ontbrekende kunstwerken (in beno19) bij Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo. Deze verschillen zijn een stuk lager voor de dynamische afvoer van 6000 m³/s (tussen de -45 en +20 cm op de Zandmaas en een maximum van 108 cm op de Grensmaas). Hierbij valt ook op dat helemaal bovenstrooms het verschil oploopt tot 50 cm voor een afvoer van 6000 m³/s (helemaal bovenstrooms maakt het nog niet uit of het dynamisch of stationair is, omdat er nog geen topvervlakking op heeft kunnen treden). Dit is nog groter dan het gevonden verschil van ca. 30 cm door de overstap van de vijfde naar de zesde generatie (zie Figuur 8-3) door o.a. een andere schematisatie van de St. Servaasbrug. Ook het meenemen van de vegetatielegger en andere planmaatregelen zullen hierbij een rol spelen.

10.2 BOI2023 vs WBI2017 met bijbehorende randvoorwaarden

Voor BOI is het tevens wenselijk om te zien wat het totale verschil in resultaten is t.o.v. de vorige ronde (WBI2017) inclusief het gebruik van de bijbehorende randvoorwaarden. Er wordt daarom ook een verschilanalyse gedaan tussen het nieuwe zesde-generatie beno-model (dflowfm2d-maas-beno19_6) en het vigerende model uit WBI2017 (waqua-maas-hr2017_5), waarbij de randvoorwaarden die voor de betreffende HR-berekeningen zijn/worden toegepast zijn gebruikt.

Uitgangspunten

Voor de analyse wordt het vigerende WAQUA WBI2017-model (waq_hr2017 = waqua-maas-hr2017_5) met toepassing van de WBI2017 randvoorwaarden als referentie gebruikt en het nieuwe D-HYDRO beleidsmodel (fm_beno19 = dflowfm2d-maas-beno19_6 = dflowfm2d-maas-hr2023_6) met de nieuwe BOI2023 randvoorwaarden als variant.

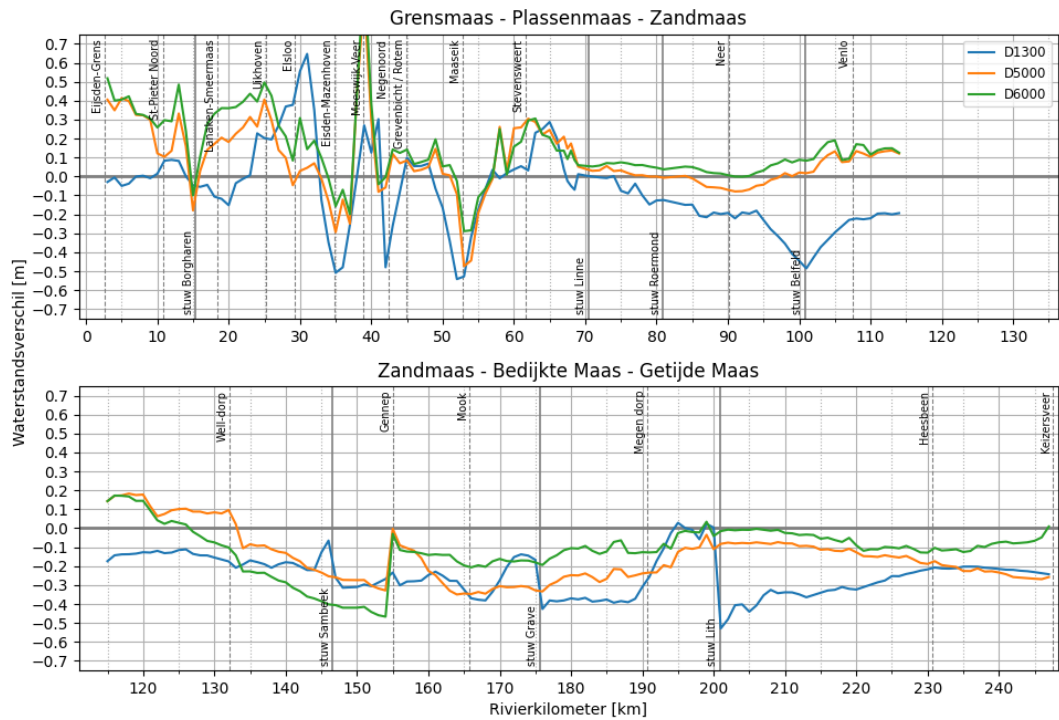
Tabel 10-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel 10-3 Instellingen van variant (fm_beno19_rvw_nieuw) en referentie (waq_hr2017_rvw_oud) voor het bepalen van het verschil tussen de schematisatie van BOI2017 en BOI2023, inclusief het effect van nieuwe randvoorwaarden.

	Variant	referentie
	fm_beno19_rvw_nieuw	waq_hr2017_rvw_oud
Software	D-HYDRO	WAQUA
Rooster	flexibel (G6)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	Smagorinski	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	beno19 (=hr2023)	hr2017
Ecotopen	vegetatielegger	ecotopen 1998
Ruwheid zomerbed	G6 kalibratie	G5 kalibratie
Structures	G6	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Lixhe	Eijsden
Lateralen	G6	G5
Qh-relatie	BOI2023	WBI2017

Resultaten

Figuur 10-2 presenteert het verschil tussen het beoogde model voor BOI2023 (= het beno19_6 model welke voor BOI wordt opgeleverd als hr2023-modelschematisatie: fm_beno19_rvw_nieuw) en het hr2017-model (WAQUA:waq_hr2017_rvw_oud) uit de vorige toetsingsronde (WBI2017), waarbij de (beoogde) randvoorwaarden die gebruikt worden in de berekeningen zijn toegepast, in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende dynamische afvoergolven. Tabel 10-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur 10-2.



Figuur 10-2 Waterstandsverschillen tussen nieuw beoogde BOI2023 model (D-HYDRO) met BOI2023 randvoorwaarden en hr2017-model uit vorige toetsronde (WAQUA) met WBI2017 randvoorwaarden (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. waq_hr2017_rvw_oud) voor drie dynamische afvoergolven.

Tabel 10-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) tussen nieuw beoogde BOI2023 model en hr2017-model uit vorige toetsronde (WBI2017) (fm_beno19_rvw_nieuw t.o.v. waq_hr2017_rvw_oud) voor drie dynamische afvoergolven. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	dynamisch Q1300 (max13)	-0.169	0.189	-0.542	0.647
	dynamisch Q5000 (max13)	-0.042	0.199	-0.473	0.947
	dynamisch Q6000 (max13)	0.006	0.203	-0.467	1.095

Figuur 10-2 presenteert in feite het gecombineerde verschilbeeld veroorzaakt door de toepassing van andere randvoorwaarden (zie Figuur 9-1) en het verschil in schematisatie tussen BOI2023 en WBI2017 (zie Figuur 10-1).

De verschillen in Figuur 10-2 komen qua patroon goed overeen met de verschillen die in paragraaf 10.1 zijn gepresenteerd. Daarmee zijn de verschillen, net als in paragraaf 10.1, vooral te verklaren door de overstap naar de zesde generatie, inclusief een verandering in geometrie en vegetatie.

De verschillen bij een dynamische afvoer van 1300 m³/s (inclusief nieuwe randvoorwaarden) zijn iets minder groot dan bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s (zonder lateralen) en ook het effect van de stuwsturing is hierin zichtbaar. Hierbij geldt echter weer de kanttekening dat de max13-waterstand niet representatief is voor deze afvoer, vooral niet als twee sommen met elkaar worden vergeleken (zie ook paragraaf 9.1).

Benedenstrooms van Well (rkm 132) geeft het beoogde BOI2023 model (inclusief nieuwe randvoorwaarden) voor alle drie de afvoerniveaus lagere (of vergelijkbare) waterstanden dan het WBI2017 model. Op de Grensmaas zijn de verschillen het grootst, tussen de -54 en +110 cm.

Helemaal benedenstrooms is voor de afvoer van 1300 m³/s vooral het effect van een verandering in de Qh-relatie zichtbaar.

11 Conclusies en aanbevelingen

Tussen de vijfde-generatie en zesde-generatie modellen zitten grote verschillen, zoals de overgang naar nieuwe rekensoftware (van WAQUA naar D-HYDRO), een nieuw rekenrooster (van gestructureerd naar ongestructureerd), gebruik van andere parameters en modelconcepten (o.a. Villemonde 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 onderliggende verschilanalyse uitgevoerd voor de Maas. 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 naar aanleiding van de uitgevoerde verschilanalyses. Aan het eind worden ook nog enkele aanbevelingen gegeven.

11.1 Algemene opmerkingen voor alle resultaten

In alle op D-HYDRO gebaseerde modellen (dus alle modelvarianten behalve waq_j19 en waq_hr2017) zit een lichte schommeling ten gevolge van de RTC-sturing bij de laagste stationaire afvoer van 50 m³/s. Hierdoor ontstaan er lichte schommelingen in de waterstanden rondom het streefpeil van de stuwpanden. Dit zorgt voor een klein verschil tussen de modelvarianten terwijl als het streefpeil strak wordt aangehouden er geen verschil te verwachten is.

Daarnaast zijn er grote verschillen tussen stationaire en dynamische sommen (effect neemt toe in benedenstroomse richting), doordat topvervlakking in de Maas een grote rol speelt.

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 geeft voor het lage tot hoge afvoerbereik een gemiddelde verlaging (verschillen variëren tussen -8 en -2 cm) en in het extreme afvoerbereik (vanaf 4118 m³/s) een verhoging in de gemiddelde waterstanden (verschillen variëren tussen 1,5 en +9 cm). Lokaal zijn er uitschieters naar -31 en +57 cm, beide voor een stationaire (zomerbedvullende) afvoer van 1500 m³/s. De verschillen bij een afvoerniveau van 4118 m³/s zijn vergelijkbaar met de acceptatietesten van de D-HYDRO-Suite software in 2015.

Als specifiek wordt gekeken naar het effect van het gebruik van een ander advectionsschema (noodzakelijk vanwege de overstap naar een ongestructureerd rooster), dan zijn de grootste verschillen zichtbaar voor het lagere afvoerbereik (maximaal +30 cm bij 1300 m³/s). Over het algemeen is te zien dat het advectionsschema van D-HYDRO zorgt voor hogere waterstanden op de Grensmaas en lagere waterstanden meer benedenstrooms. Hierbij moet echter wel worden aangetekend dat de verschillen niet rechtstreeks te vertalen zijn naar effecten op het totale model, omdat overlaten niet zijn meegenomen en een kleine waarde voor de horizontale viscositeit is gebruikt. Bij een stroming diagonaal op het rooster door een smalle geul (wat in de vijfde generatie regelmatig voorkomt, maar in de zesde generatie veel minder vanwege betere uitlijning) is het D-HYDRO advectionsschema in theorie beter, omdat hier gebruik wordt gemaakt van de lokale oplossing van de advection, terwijl in WAQUA ook gridcellen uit het winterbed een invloed kunnen hebben.

De impact van een andere bodemruwheid (constante bodemruwheid versus een ruimtelijk variabele ruwheid middels de trachytopen methodiek) op het verschil is echter klein of verklaarbaar. Dit blijkt ook als gekeken wordt naar de ruimtelijke ruwheidsvelden. Naast verschillen door een ander advectionsschema, blijkt ook het verschil in discretisatie van de horizontale viscositeit een grote impact te kunnen hebben. Dit is vooral relevant als het winterbed (net) gaat meestromen, dan treden er verschillen op in de orde van zo'n 20 cm. Ook als overlaten worden weggelaten in het model worden de verschillen tussen de twee softwarepakketten kleiner, vooral in het benedenstroomse deel voor de extreme afvoeren. Dit betekent dat de grote verschillen door de overstap naar de nieuwe software voor een deel worden veroorzaakt door een andere implementatie van de overlaten in het algemeen (dus afgezien van het verschil tussen de implementatie van de Tabellenboek of Villemonte formulering.).

De verschillen door de overstap van WAQUA naar D-HYDRO kunnen dus grotendeels worden verklaard door het gebruik van een ander advectionsschema, een andere discretisatie van de horizontale viscositeit en een andere implementatie van de overlaten.

Over het algemeen is het direct naar D-HYDRO-geconverteerde model (fm_waq_j19) trager dan het WAQUA model (waq_j19), zowel serieel (+130%) als parallel (+330%). Er zijn echter ook nog specifieke optimalisaties doorgevoerd aan het rekenrooster (bijvoorbeeld reductie van tijdstap limiterende cellen), daarmee verbeteren de reketijden zowel in de seriële som als in de parallel som (ongeveer 30%). Hierbij moet wel worden aangetekend dat de gebruikte reketijdstap in WAQUA eigenlijk te groot is.

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 verschillen in waterstanden tussen het gestructureerde en het nieuwe ongestructureerde rekenrooster blijken groot te zijn bij hogere afvoeren (meer dan 500 m³/s) door een reductie van de numerieke weerstand, als gevolg van een beter uitlijning van het rooster met stroombepalende elementen zoals de oever. Dit geeft vooral negatieve uitschieters in de Grensmaas. De verschillen zijn het grootst bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s (-48 cm).

Bij deze afvoer stromen de uiterwaarden langs een groot deel van de Maas nét mee, maar vind de grootste afvoer binnen het zomerbed plaats. Bij lage afvoeren (minder dan 500 m³/s) is het gemiddelde verschil echter maximaal +1 cm.

Als het effect van een andere projectie van overlaten en kunstwerken buiten beschouwing wordt gelaten, is het effect van een ander rekenrooster over het algemeen kleiner. De grootste verschillen worden veroorzaakt doordat het nieuwe rooster beter is uitgelijnd met bepaalde stroombanen (die in dit geval niet meer worden geblokkeerd door kunstwerken). Het rekenrooster kan eigenlijk niet los worden gezien van de projectie van andere elementen (zoals overlaten en kunstwerken) op dit rooster. Het rekenrooster is in de zesde generatie beter uitgelijnd met belangrijke stromingselementen, waaronder ook deze overlaten en kunstwerken. Daardoor worden deze ook 'realistischer' afgebeeld op het rooster en dit heeft een groot effect op de resultaten.

Er dient opgemerkt te worden dat de roosters relatief grof zijn, waardoor kleine verschillen in discretisaties toch relatief grote effecten kunnen hebben, vooral bij grote stroomsnelheden. Zo zijn de advectieschema's in D-HYDRO en WAQUA allebei van een voldoende orde van nauwkeurigheid. Een betere uitlijning van het rooster blijkt ongeveer een verschil van een 25 cm te geven bij de Grensmaas (als het effect van overlaten en kunstwerken buiten beschouwing wordt gelaten). Hierbij dient te worden opgemerkt dat het in de Grensmaas heel hard stroomt (tot boven de 4 m/s) voor de grootste rivierdebiëten die in dit onderzoek toegepast zijn.

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 (variërend in ruimte en tijd) wordt meegenomen. De aanpassing van een uniforme horizontale eddy viscositeit van 1 m²/s naar 0.1 m²/s plus het toepassen van een Smagorinsky factor van 0.2 zorgt voor een kleine toename in de waterstanden met name op de Zandmaas (gemiddeld 2 cm, maximaal 16 cm).

Voor het meenemen van de lijnelementen wordt in de zesde generatie de overstap gemaakt voor de (emperische(empirische) overlaatformulering 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.

De aanpassing van de overlaatformulering van Tabellenboek naar Villemonte zorgt voor een kleine en lokale toename in de waterstanden (gemiddeld 0 cm, maximaal 4 cm). Als dezelfde analyse tussen het gebruik van Villemonte of Tabellenboek gedaan wordt op basis van het vijfde-generatie model in WAQUA kunnen vergelijkbare conclusies worden getrokken. De kleine verschillen op de Maas (ten opzichte van de Rijn) kunnen worden verklaard doordat er duidelijk minder kribben aanwezig zijn en de kribben die aanwezig zijn hebben een geringe lengte. Daarnaast zijn er ook over het algemeen minder overlaten in het model aanwezig die dwars op de stroming staan.

11.5 Effect schematisatie

De basisschematisatie van de Maas is voor zowel de vijfde als de zesde generatie die van het jaar 1995. Bij de overstap naar de zesde-generatie modellen zijn verbeteringen doorgevoerd in deze basisschematisatie. Het verschil tussen de oude en nieuwe baseline-referentie van 1995 geeft gemiddeld gezien weinig verschillen, wel met een paar lokale uitschieters, vooral op de Grensmaas (met name door toepassing van een beter concept om bruggen mee te nemen en het verbeteren van de bodemhoogte in een aantal plassen en zijtakken), waarbij over het algemeen de nieuwe Baseline schematisatie voor een paar centimeter hogere waterstand zorgt.

Vervolgens is met behulp van maatregelen de schematisatie steeds geactualiseerd naar recentere jaren. De grote verschillen (oplopend tot -1.9 m) tussen de actuele situatie van 2019 en de referentie van 1995 worden vooral veroorzaakt doordat in de tussenliggende periode talloze (rivierverruimende) maatregelen zijn uitgevoerd (o.a. de Maaswerken). Daarnaast zorgen een andere zomerbedligging en stuwsturing voor verschillen voor de lagere afvoeren.

Het grootste verschil tussen het vijfde- en zesde-generatie model wordt bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s gevonden, met de grootste verschillen rondom de stuw bij Grave in de Zandmaas (tot -77 cm). Dit verschil lijkt vooral te komen door beduidend hogere kalibratieruwheden in het vijfde-generatie model t.o.v. het zesde-generatie model, een beter uitgelijnd rooster en een andere viscositeitsafhandeling (zowel numeriek als modelconcept). Uit een vergelijking met de betrekkinglijnen (gebaseerd op metingen) blijkt dat het vijfde generatie model hier structureel te hoge waterstanden berekent (en het zesde generatie model iets te laag). Samen zorgt dit voor het gevonden verschil van ca. 70 cm.

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 effect van de vegetatielegger 2020 t.o.v. de actuele ecotopen zorgt voor een waterstandstoename (gemiddeld +4 cm, maximaal +26 cm) bij hoge afvoeren waarbij het winterbed meestroomt. Zowel de verleende vergunningen, als de planmaatregelen veroorzaken lokaal waterstandsafnames die overeenkomen met de locaties van verleende vergunningen en planmaatregelen. De waterstandsval van de verleende vergunningen is bij hoge afvoeren gemiddeld -4 cm (maximaal -137 cm) en voor de planmaatregelen -5 cm (maximaal -99 cm). Hierbij zijn de waterstandsvalingen het grootst op de Grensmaas. Het totale effect tussen de actuele en beleidssituatie is de optelsom van de effecten van de vegetatielegger, verleende vergunningen en planmaatregelen (gemiddeld -7 cm, maximaal -152 cm). Er moet hierbij echter worden aangetekend dat de in- en uitlaatkunstwerken bij de maatregelen van Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo ontbreken.

11.6 Effect randvoorwaarden

Voor BOI2023 worden andere randvoorwaarden toegepast dan binnen WBI2017. Voor de bovenstroomse afvoer wordt dezelfde golfvorm gebruikt (alleen met een ander aantal dagen rond de top). Op de benedenstroomse rand werd in WBI2017 een alternatieve Qh-relatie gebruikt (aansluitend op het probabilistisch resultaat). De Qh-relatie is voor BOI2023 gebaseerd op resultaten uit het Rijn-Maasmonding model, waarin de verwachte zeespiegelstijging is meegenomen. In de zesde generatie zijn daarnaast het aantal laterale lozingen en onttrekkingen uitgebreid en de gebruikte regressierelaties verbeterd. Het effect van het gebruik van nieuwe randvoorwaarden (BOI2023 vs WBI2017) is relatief beperkt en zorgt over het algemeen voor een verschil tussen de -8 en +10 cm. Deze verschillen kunnen worden verklaard door verschillen in de waarden (en locaties) van de laterale lozingen. Benedenstrooms loopt het verschil bij een dynamische afvoer van 1300 m³/s op tot -27 cm door het gebruik van een andere Qh-relatie. Hierbij geldt echter wel de kanttekening dat de max13-waterstand niet representatief is voor deze afvoer, maar het verschil zal hooguit enkele centimeters zijn.

11.7 Effect BOI

De verschillen tussen de toetsingsmodellen van de vijfde- en zesde-generatie (beno19 t.o.v. hr2017 met dezelfde randvoorwaarden) komen sterk overeen met het beeld van de analyse van de nieuwe generatie op basis van het actuele model. In de verschilanalyse zijn de waterstandsveranderingen ten gevolge van de nieuwe generatie daardoor dominant, maar dit wordt lokaal versterkt of verzwakt door de actualisatie van de vegetatie(legger), verleende vergunningen en planmaatregelen. De verschillen zijn voor de twee dynamische extreme afvoeren (4118 en 6000 m³/s) gemiddeld genomen rond de -3 en 0 cm, maar kunnen lokaal oplopen tot -67 en +100 cm.

Het gebruik van de bijbehorende randvoorwaarden in de toetsmodellen van de vijfde en zesde generatie levert niet een heel ander beeld op. Dit was ook wel te verwachten omdat het (separate) effect van het gebruik van andere randvoorwaarden relatief klein is.

11.8 Kalibratie

Voor de RWS-modellen is besloten, in zowel de vijfde als de zesde generatie (evenals eerdere generaties), om alleen de ruwheid als kalibratieparameter te gebruiken, omdat dit de grootste onbekende is. Daarbij wordt alleen het zomerbed meegenomen, om eventuele rechtsongelijkheid bij het beoordelen van vergunningsvraagstukken te voorkomen. In de vijfde generatie werd deze kalibratie rechtstreeks uitgevoerd op het zomerbedde zomerbedruwheid en in de zesde generatie verloopt dit via een kalibratiefactor.

Voor zowel de vijfde als de zesde generatie wordt gekalibreerd voor verschillende afvoerniveaus, waarbij in het zesde generatie model recentere data wordt gebruikt. Het hoogste niveau (2700 m³/s) is echter in allebei de generaties gebaseerd op het hoogwater van 1995. Voor extrapolatie naar extremere afvoeren worden de waarden op basis van het hoogste afvoerniveau gebruikt.

De kalibratie compenseert ook voor andere onnauwkeurigheden in de modelopzet, o.a. door de projectie op een (relatief grof) rekenrooster, de toepassing van (geparameteriseerde) modelconcepten (zoals viscositeit en overlagen), in schematisaties en randvoorwaarden en door de numerieke afhandeling binnen de software. Daarmee zijn de kalibratie en de keuzes in de modelopzet moeilijk los van elkaar te bekijken. Aangezien een aantal keuzes voor de modelopzet in de zesde generatie zijn gewijzigd (verbeterd), zal dit ook van invloed zijn op de gevonden kalibratiewaarden en daardoor ook op de extrapolatie naar extreme afvoeren. Als je de invloed van specifieke keuzes goed zou willen kwantificeren, dan betekent dit dat je voor elk aspect dat je wilt bekijken een complete kalibratie (+validatie) van het model moet uitvoeren (wat een flinke exercitie is). Dit zou echter ook een beter beeld geven van de modelonzekerheden.

De afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed is zowel in de vijfde als de zesde generatie geen onderdeel geweest van de kalibratie en validatie omdat hier onvoldoende informatie over bekend is. Alle mogelijke fouten in geometrie, discretisatie, numerieke benadering zijn verdisconteerd in de kalibratiefactor (zesde generatie) of de ruwheid (vijfde generatie) van het zomerbed. De afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed kan hiermee zijn beïnvloed.

Omdat er zoveel veranderingen in het systeem hebben plaatsgevonden tussen 1995 en 2019 is het de vraag in hoeverre de gevonden kalibratiewaarden voor het hoogwater van 1995 nog helemaal geldig zijn voor de huidige situatie. Het hoogwater van 1995 is echter de meest recente hoge afvoergolf waarvan metingen beschikbaar zijn en zorgt het voor een conservatieve inschatting van de waterstanden onder extreme condities (=hoger dan bij gebruik van de kalibratiewaarden van een lager afvoerniveau), maar over het algemeen wel vergelijkbaar met die in de vijfde generatie. Er is daarom gekozen om de kalibratiewaarden voor 1995 wel mee te nemen. Doordat de waterstanden op basis van de zesde-generatie geometrie van 1995 hoger zijn dan op basis van de vijfde-generatie geometrie voor afvoeren in het kalibratiebereik, zal dit in de kalibratie geresulteerd hebben in een lagere kalibratiefactor bij de kalibratie op hoogwater 1995. Het effect hiervan op de modelresultaten bij hogere afvoeren of in actuele modellen is echter niet te beredeneren omdat de combinatie van geometrie en kalibratiefactor hierin doorwerkt.

In de vergelijking tussen de vijfde en zesde generatie springt met name het waterstandsverschil bij een stationaire afvoer van 1500 m³/s er uit. De knikpunten in de lijn komen overeen met de kalibratietrajecten in het zesde-generatie model, waardoor aannemelijk is dat de verschillen afkomstig zijn van de kalibratie. Hoewel de kalibratieruwheden zelf niet eenvoudig met elkaar vergeleken kunnen worden, blijkt uit de vergelijking van de trends in ruwheden dat de ruwheid bij deze afvoer in het zesde-generatie model veel lager is, resulterend in veel lagere waterstanden. Uit een vergelijking met de betrekkinglijnen (gebaseerd op metingen) blijkt dat het vijfde generatie model hier structureel te hoge waterstanden berekent (en het zesde generatie model iets te laag).

11.9 Resumé

Het zesde-generatie Maasmodel, en ook de eerdere generaties, maakt gebruik van een relatief grove roosterresolutie, met roosterafstanden van zo'n 20 bij 40 meter. Bovendien zijn er in de verschilanalyse scenario's onderzocht van lage naar hoge rivierdebieten, waarbij hoge snelheden optreden bij de hoogste debieten. De combinatie van een relatief grof rooster en de hoge snelheden maakte vooraf al duidelijk dat er grote verschillen zouden kunnen optreden tussen de WAQUA en D-HYDRO modelschematisaties voor de Maas. Dit is ook uitgekomen in de analyse. Aspecten m.b.t. de software, het rekenrooster, de modelschematisatie, de gekozen parameters en modelconcepten en de randvoorwaarden 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 discretisatie van de horizontale viscositeit en de implementatie van de overlaten van grote invloed.

Bovendien zijn er zeven stuwen op de Maas die lokaal tot grote verschillen kunnen leiden (bij afvoeren tot 1700 m³/s). Al met al is er een behoorlijk volledige verklaring gegeven voor de verschillen tussen de vijfde en zesde generatie modellen voor de Maas.

Als alle vorige bevindingen samen worden genomen, dan blijken de waterstandsverschillen tussen het vijfde- en zesde-generatie Maas-model 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. 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 (4118 tot 6000 m³/s), omdat daar de kalibratiewaarden uit de hoogste afvoer tijdens de kalibratie worden gebruikt. Uit de modelresultaten blijkt dat hierdoor de waterstanden in dit extreme bereik (lokaal) tot 30-40 cm hoger (en tot 20 cm lager) is voor dynamische sommen. Gelet op de vele aspecten die een rol spelen (rekenrooster, extreme scenario's, tienduizenden 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 er bovendien een verandering in schematisatie (update van vegetatie en geometrie) en randvoorwaarden ten opzichte van WBI2017. Als deze veranderingen worden meegenomen, dan lopen de verschillen in het extreme bereik verder op. 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.

11.10 Aanbevelingen

Kalibratie

De keuzes die gemaakt zijn bij de kalibratie zijn belangrijk in het extreme bereik: het effect van die keuzes op het extreme bereik is niet uitgebreid onderzocht en kan grote consequenties hebben. We raden aan dit nader te bekijken:

- Afvoerverdeling zomer- en winterbed
Ondanks dat er onvoldoende informatie beschikbaar is over de werkelijke afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed, adviseren we om deze afvoerverdeling tussen vijfde en zesde generatie met elkaar te vergelijken. Dit kan verder inzicht bieden in mogelijke verschillen tussen de twee generaties.

- Ruwheid in het hoogste afvoerbereik
De verschillen in waterstanden nemen voor de meest extreme afvoeren weer toe tussen de vijfde en zesde generatie. Het is wenselijk om uit te zoeken waar dit door wordt veroorzaakt en of het toch mogelijk is om een betere vergelijking te maken tussen de kalibratiewaarden van de vijfde en zesde generatie.

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.

12 Referenties

- Agtersloot, R., H. Bouwmeester (2014): 5e generatie Baseline-schematisaties en WAQUA-modellen Maas 2014. Beschrijving bouw Baseline-schematisaties, simulaties met WAQUA-modellen en analyse resultaten. AHA-RURA-GeoSpace-DeJooede- rapport, P0040.14, versie 2.3, 8-9-2014.
- Berends, K.D. (2020): Human intervention in rivers. Quantifying the uncertainty of hydraulic model predictions.
- Berends, K., Diermanse, F. & de Jong, J. (2021): Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat, Deltares rapport 11206813-018.
- Chavarrías, V. (2023): Role of fixed weirs in the sixth generation models of RWS. Deltares memo: I1000641-010-OA-0001_v0.2.11 (pre-concept).
- Deijl, E. van der, Jong, J.S. de (2021a): Deelonderzoek Extrapolatie Model-resultaten. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0008 v2.0 d.d. 19 mei 2021
- Deijl, E. van der, Jong, J.S. de (2021): Ontwikkeling zesde-generatie Maas-beno_model. Deltares rapport 11205258-002-ZWS-0013, v1 16 december 2021
- Deijl, E. van der, J.S. de Jong, T. Visser (2022): Actualisatie zesde-generatie Maas-modellen. Schematisaties j19_6, beno19_6, beno_mknov19_6. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0021 v2.0
- Deltares (2017): Horizontal eddy viscosity settings for the 6th generation models, Deltares memo 11200569-003-ZWS-0013
- Deltares (2023): D-Flow Flexible Mesh; Technical Reference manual. Version: 2023 Revision: 78564. 25 August 2023
- Domhof, B. & J.S. de Jong (2022): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas - Effect nieuwe generatie, modelinstellingen en beno-actualisaties. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0023
- Spruyt, A., B.C.A. Domhof. & J.S. de Jong (2023): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijntakken. Effect nieuwe generatie, modelinstellingen en beno-actualisaties. Deltares rapport (in ontwikkeling)
- Fujisaki, A., R. Agtersloot, A. Becker. (2023): B&O-modellen en deelmodellen Maas. Deltares-rapport 11208053-002-ZWS-0005, versie 1.0, 10 juli 2023.
- Goede, E. D. de (2011): Validatie van Villemonte overlaatformulering in WAQUA met praktijkmetingen, Tech. Rep. 1204153-001-ZWS-0001, Deltares, Delft, 23 pp
- Goede, E. de, Spruyt, A.S. en Zijl, F. (2015): Acceptatietesten D-Flow Flexibel Mesh. Deltares rapport 1205718-000-DSC-0144 d.d. 15 september 2015.
- Huthoff, F., K. van den Berg, J. Viera da Silva, A. Paarlberg (2022): Toets Grote Rivieren2023 – Technische rapportage. HKV rapport PR4677.10.
- Jong, J.S. de (2016): Herkalibratie 5^{de} generatie WAQUA Maas. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0008

- Jong, J.S. de & M. Yossef (2016): Riviermodellen in D-HYDRO – Pilotapplicatie Rijntakken - Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de zesdegeneratie modellen van RWS. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0012, v1.0 okt 2021
- Jong, J.S. de (2019): Bepaling locatie van de benedenrand Keizersveer in MaasG6-model. Deltares memo 11203714-003-ZWS-0004, d.d. 13 maart 2019
- Jong, J.S. de (2021a): Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren - Zesde-generatie modellering Maas. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0012, v1.0 okt 2021
- Jong, J.S. de (2021b): Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014, v1.1 okt 2021
- Jong, J.S. de, A. Spruyt, E. van der Deijl, A. Kusters (2021): Synthetische randvoorwaarden zesde generatie. Deltares memo 11205258-002-ZWS-0009 d.d. 30 november 2021 v 0.13
- Jong, J.S. de (2022): Randvoorwaarden dynamische afvoergolven Maas-model voor toepassing in BOI. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0019 v0.6 d.d. 10 december 2021
- 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.
- 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
- Smale, A.J. (2014). Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aanvulling op uitgangspunten vastgesteld in 2013. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0005.
- Spruyt, A.S. (2020): Werkplan Verschilanalyse Rivieren zesde generatie modellen. Deltares memo 11205258-004-ZWS-0006 d.d. 1 september 2020
- Tanis, H. (2020). Randvoorwaarden Generator Water Modellen (RGWM) 2.2.1. Gebruikershandleiding RGWM.
- 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
- Veen, R. van der (2018): Actualisatie beschrijving laterale toestroming Maas. Kenmerk P180510R
- Viera da Silva, J. en L. Lokin (2019): Jaarlijkse actualisatie modellen. Maas 2019. HKV rapport PR3817.20

- Vossen, B. van, & Uittenbogaard, R. E. (2004): Subgrid-scale model for quasi-2D turbulence in shallow water. *Shallow Flows* (pp. 575-582): Taylor & Francis
- Wijk, R. van der (2016): Qh-relaties j15 en beno15 voor Keizersveer, Werkendam en Krimpen a/d Lek. Deltares memo d.d. 8 april 2016, kenmerk 1230071-004-ZWS-0010
- Wijk, R. van der (2022): Afleiden QH-relatie Rijn-Maasmonding voor Rijntakken en Maas. Deltares memo 11206813-006-ZWS-0008 v4.0 d.d. 1 maart 2022
- Yossef, M. (2017): Horizontal eddy viscosity settings for the 6th generation models. Deltares memo 11200569-003-ZWS-0013, d.d. 2 juni 2017

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_j19	fm_waq_j19	fm_adv	waq_adv	fm_j19	fm_waq_grid	fm_j19_zk	fm_waq_grid_zk	fm_j95_5	fm_j95_6	fm_j19_waq_visc	fm_j19_tab	fm_j19_leg	fm_j19_vgn	fm_beno19 = fm_hr2023	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud	waq_hr2017	waq_hr2017_rvw_oud
software	WAQUA	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
	flexibel (G6)					x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		
overlaten	Tabellenboek	x	x																x	x
	Villemonste					x	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
	Smagorinski					x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		
	klein (0.2)			x	x															
geometrie	j95_5 (G5)									x										
	j95_6 (G6)										x									
	j19_5 (G5)	x	x	x	x															
	j19_6 (G6)					x	x	x	x			x	x	x						
	j19_6+vergunningen														x					
	beno19 (=hr2023)															x	x	x		
	hr2017																		x	x
ecotopen	ecotopen 1998									x	x								x	x
	ecotopen 2017	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x							
	vegetatielegger 2020													x	x	x	x	x		
ruwheid	G5 kalibratie	x	x																x	x
zomerbed	G6 kalibratie					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	constant (WhiteColebrook 0.2)			x	x															
structures	G5	x	x																x	x
	G6					x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	geen			x	x			x	x											
thin dams	G5	x	x	x	x														x	x
	G6					x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	geen							x	x											
bovenrand	Eijsden	x	x	x	x		x		x	x									x	x
	Lixhe					x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		
lateralen	geen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	
	G5																	x		x

onderdeel	code	waq_j19	fm_waq_j19	fm_adv	waq_adv	fm_j19	fm_waq_grid	fm_j19_zk	fm_waq_grid_zk	fm_j95_5	fm_j95_6	fm_j19_waq_visc	fm_j19_tab	fm_j19_leg	fm_j19_vgn	fm_beno19 = fm_hr2023	fm_beno19_rvw_nieuw	fm_beno19_rvw_oud	waq_hr2017	waq_hr2017_rvw_oud	
	G6																				
Qh	G5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		
	G6																				
	WBI2017																		x		x
	BOI2023																	x			
Som	stat (50, 250, 1500, 2302, 2776, 3224, 4118, 5000, 6000)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	
	dyn. 1300																x	x	x	x	x
	dyn. 4118	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	
	dyn. 5000																x	x	x	x	x
	dyn. 6.000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

A.2 Modelopbouw per component

Deze bijlage beschrijft de herkomst van alle modelcomponenten in een aantal modelschematisaties die specifiek voor deze vershilanalyse zijn opgezet..

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.

Modelcomponenten	Extensie	fm_waq_j19	fm_j95_5	fm_waq_grid
	Analyse	Generatie	Basisreferentie	Rekenrooster
Bedlevel	_net.nc	Matlabconversie	Baseline6	Baseline6
Enclosure	_enc.pli	-	Baseline6 ⁽¹⁾	(default)
Fixed weirs	_fxw.pliz	Matlabconversie	Baseline6	(default)
Thin dams	_thd.pli	Matlabconversie	Baseline6	(default)
Dry area	_dry_areas.pol	Keizersveer ⁽²⁾ + (default)	Baseline6	(default)
Roughness area	_trachytopes.arl	Matlabconversie	Baseline6 ⁽¹⁾	Baseline6
Trachytope definitions	*.ttd	Uitgebreid zomerbed	(default)	(default)
Calibration sections	_calibration_sections.cll	-	Baseline6 ⁽¹⁾	Baseline6
Calibration factors	*.cld	-	(default)	(default)
Bridges	_bridges.pliz	-	-	(default)
Structures	structures_*.ini	(default)	(default)	(default)
Identiek in alle simulaties				
Boundary conditions	.bc		(default)	

Modelcomponenten	Extensie	fm_waq_j19	fm_j95_5	fm_waq_grid
	Analyse	Generatie	Basisreferentie	Rekenrooster
Initial conditions	Q*.ini			
ObservationPoints	_obs.xyz			
CrossSections	crs.pli			
Realtimecontrole				

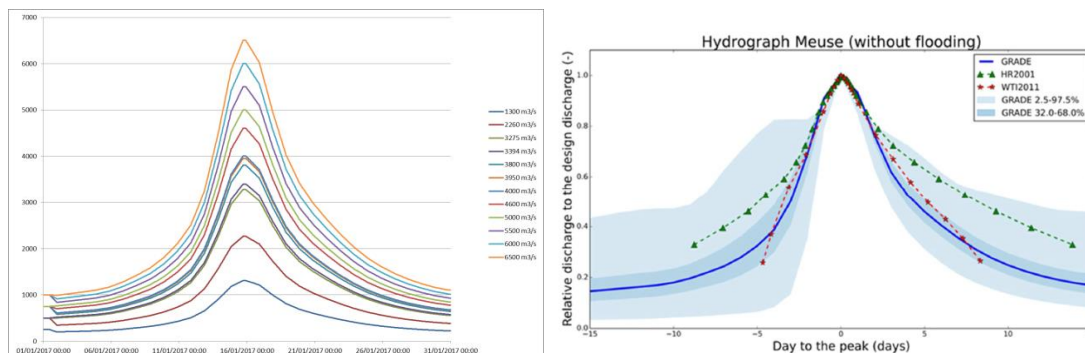
⁽¹⁾ Na conversie naar Baseline6 zijn de maatregelen *ma_kalibf_a7*, *ma_seckeiz_a1* en *ma_zomerb_a3* voor Maas ingemixt om te corrigeren voor de enclosure, en zomerbedruwheid en het toevoegen van de kalibratiefactoren.

⁽²⁾ Een handmatig-getekende polygoon in Maas model bij Keizersveer zodat de randvoorwaarde bij LMW.Keizersveer goed aan sluit op het actieve deel van het rooster.

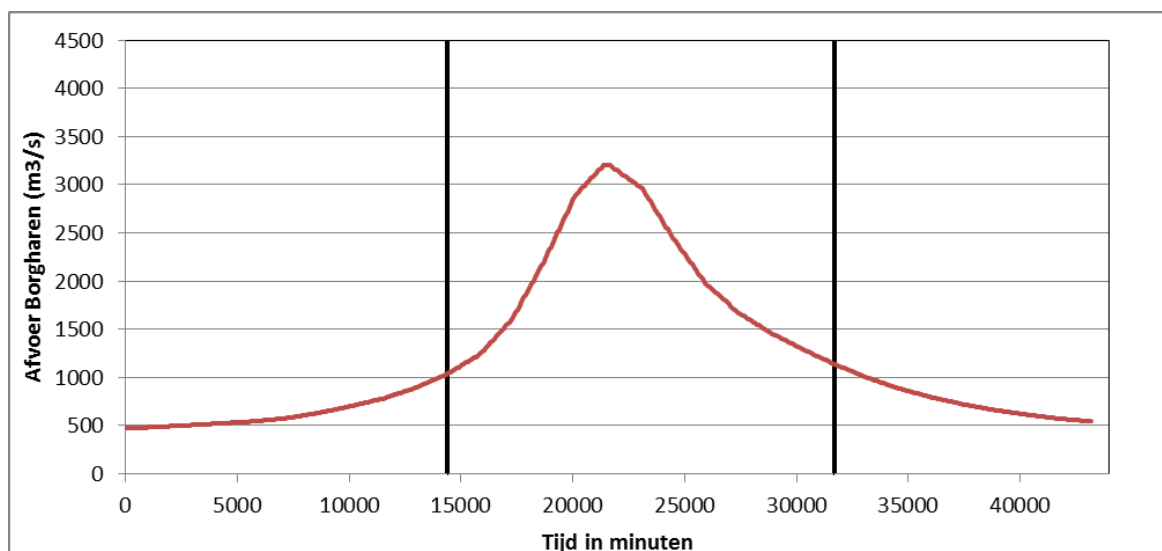
B Randvoorwaarden

Deze sectie geeft figuren van de verschillen in toegepaste randvoorwaarden.

B.1 Bovenstroomse randvoorwaarden

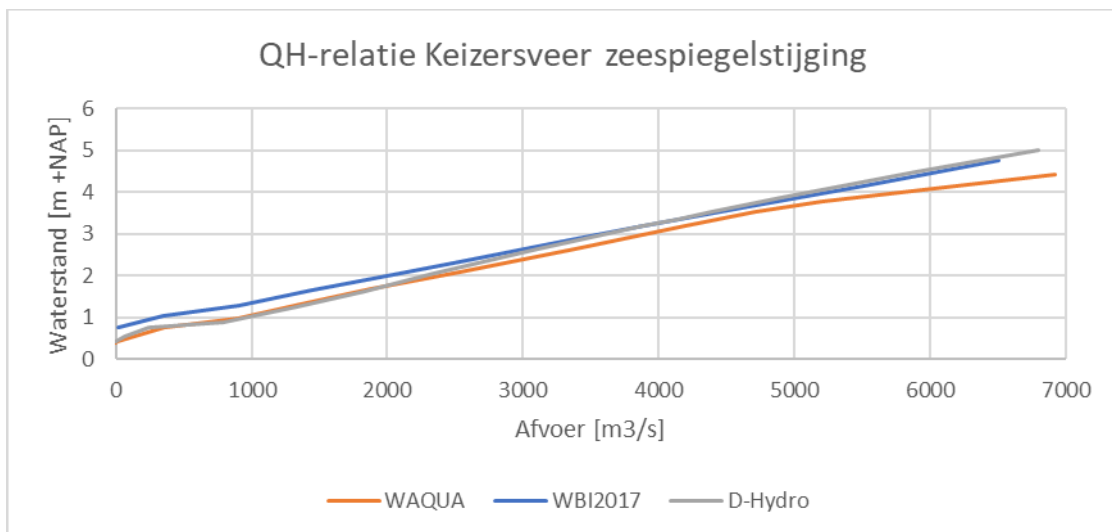


Figuur B-1 Afvoerrandvoorwaarde bij Eijsden in WBI 2017 (Agtersloot & Paarlberg, 2016); Rechts: Afvoergolfvorm Maas bij Borgharen (Deltares, 2014). Bron: De Jong (2018).



Figuur B-2 Selectie tijdsperiode van dag 10 tot 22 (14400 tot 31680 minuten), voor de afvoerrandvoorwaarden in de zesde generatie. Bron: De Jong (2018).

B.2 Qh-relatie benedenstreams



Figuur B-3 QH-relatie Keizersveer met zeespiegelstijging (D-Hydro) met de voorgaande QH-relatie (WAQUA) en de door WBI 2017 gebruikte QH-relatie (WBI2017). Bron: Van Der Wijk (2022).

C Extra analyses

In deze bijlage worden de resultaten van een aantal extra vershilanalyses weergegeven die een beperkte invloed hebben of om bepaalde tussenstappen te onderbouwen. Hierin zijn alleen de stationaire sommen doorgerekend.

C.1 Effect rekentijdstap WAQUA

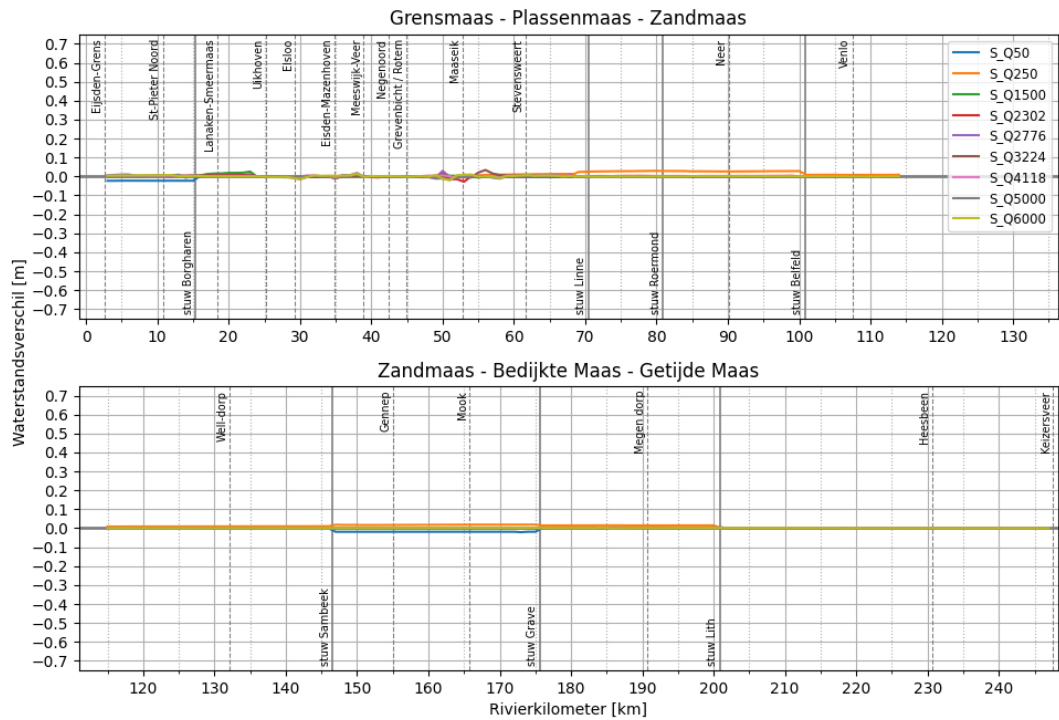
Het vijfde-generatie Maas-model in WAQUA rekt met een vaste tijdstap van 7,5 seconden. Bij deze tijdstap kunnen echter (lokale) oscillaties voorkomen op de Grensmaas. Vanaf een tijdstap van 1,5 seconden (= een factor 5 lager) lijkt het model zonder slingeren in waterstanden te rekenen. Vanwege rekentijd is echter altijd een tijdstap van 7,5 seconden gehanteerd.

Tabel C-1 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie (tijdstap van 7,5 seconden) en variant (tijdstap van 1,5 seconden) voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel C-1 Instellingen van variant (waq_j19_dt1_5s) en referentie (waq_j19) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door een andere tijdstapgrootte in WAQUA.

	variant	referentie
	waq_j19_dt1_5s	waq_j19
Software	WAQUA	WAQUA
Tijdstap	1,5 s	7,5 s
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1.0)	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie	G5 kalibratie
Structures	G5	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Figuur C-1 presenteert het effect van een vijf keer kleinere tijdstap ($t = 0,025$ t.o.v. $t=0,125$ minuut) in het actuele WAQUA model (waqua-maas-j19_5) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren. Tabel C-2 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur C-1.



Figuur C-1 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van het effect van een kleinere tijdstap (waq_j19_dt1_5s t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren.

Tabel C-2 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van het effect van een kleinere tijdstap (waq_j19_dt1_5s t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.004	0.007	-0.023	0.002
	stationair Q250	0.010	0.009	-0.006	0.030
	stationair Q1500	0.001	0.003	-0.006	0.026
	stationair Q2302	0.001	0.003	-0.028	0.011
	stationair Q2776	0.001	0.003	-0.009	0.030
	stationair Q3224	0.001	0.003	-0.010	0.034
	stationair Q4118	0.001	0.002	-0.006	0.011
	stationair Q5000	0.001	0.002	-0.018	0.012
	stationair Q6000	0.001	0.003	-0.020	0.015

De verschillen zijn relatief klein¹⁵, tussen de -3 en +3,5 cm, met een bias van maximaal 1 cm (voor de meeste afvoeren zelfs maar een millimeter). In het gestuwde regime (50 en 250 m³/s) worden de verschillen veroorzaakt, doordat net een andere stuwstand wordt aangehouden (vanwege het gebruik van een 'fixed state' conditie). Dit betekent dat het gebruik van een 'te grote' tijdstap in het WAQUA model nauwelijks een effect heeft op de resultaten. Wel is bekend dat de locaties van 'instabiliteiten' tussen verschillende modelconfiguraties (schematisaties, randvoorwaarden) kunnen verschillen. Dat betekent dat

¹⁵ Vooral als je het vergelijkt met andere verschillen in deze rapportage. Voor vergunningsverleningsvraagstukken zijn dit wel grote verschillen, dus daar moet in ieder geval altijd met dezelfde tijdstap worden gerekend in de referentie en de variant.

er in effectstudies verschillen tussen bijvoorbeeld een referentie en een maatregelberekening kunnen optreden op locaties waar dat niet te verwachten is. Deze worden door de te grote tijdstap veroorzaakt.

Omdat er nu gerekend is met (quasi) stationaire afvoeren, worden hier de laatste waarden van een afvoerstap weergegeven. Becker (2012) laat zien dat de afwijking (in een dynamische som) tussen berekeningen met verschillende tijdstappen echter vaak maar een paar tijdstappen lang aanhoudt. De oscillatieoscillaties op de Grensmaas zijn dus echt een instabiliteit.

C.2 Effect overlaatformulering in WAQUA

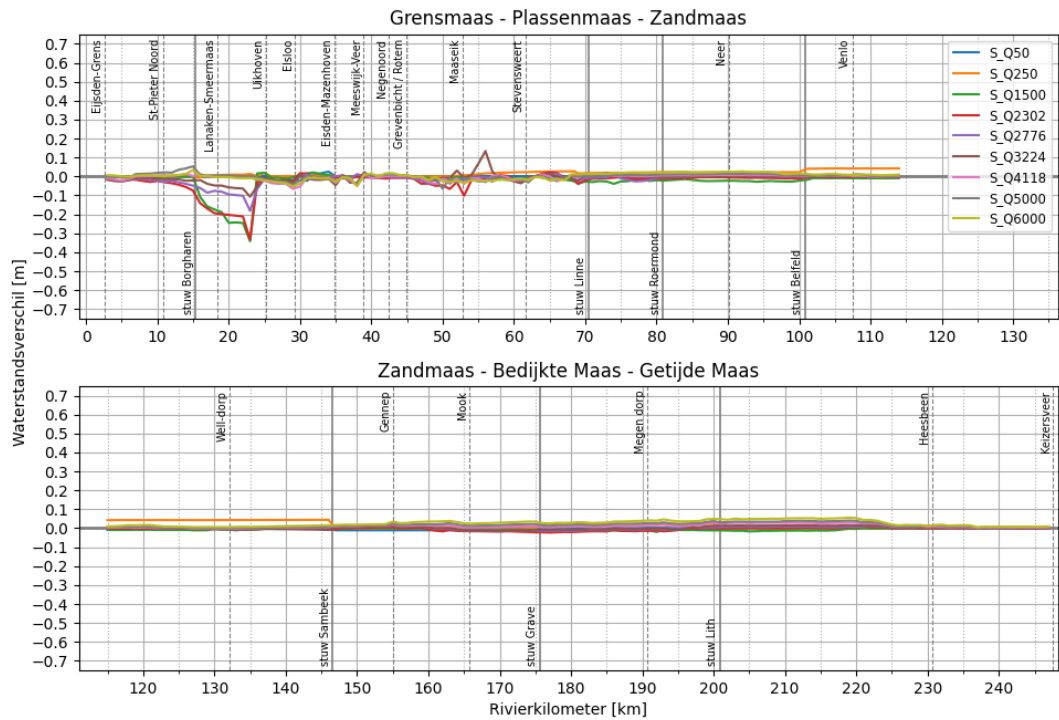
In paragraaf 7.2 is het effect van de overstap naar een nieuwe overlaatformulering (Villemonte i.p.v. Tabellenboek) in beeld gebracht met het zesde-generatie D-HYDRO model. In WAQUA is het echter ook mogelijk om gebruik te maken van de Villemonte formulering in plaats van Tabellenboek. Het effect van de overstap wordt dus nogmaals in beeld gebracht, maar dan op basis van het WAQUA-model.

Tabel C-3 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie (Tabellenboek) en variant (Villemonte) voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel C-3 Instellingen van variant (waq_j19_villemonte) en referentie (waq_j19) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door overstap van Villemonte naar Tabellenboek binnen WAQUA.

	variant	referentie
	waq_j19_villemonte	waq_j19
Software	WAQUA	WAQUA
Tijdstap	7,5 s	7,5 s
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Villemonte	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1.0)	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie	G5 kalibratie
Ruwheid winterbed	trachytopen	trachytopen
Structures	G5	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Figuur C-2 presenteert het effect van een andere overlaatformulering in het actuele WAQUA model (waq_j19_villemonte t.o.v. waq_j19) in de vorm van waterstandsverschillen in een longitudinaal profiel voor de verschillende stationaire afvoeren. Tabel C-4 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur C-2.



Figuur C-2 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van een andere overlaatformulering binnen WAQUA (waq_j19_villemonte t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren.

Tabel C-4 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van een andere overlaatformulering binnen WAQUA (waq_j19_villemonte t.o.v. waq_j19) voor de verschillende stationaire afvoeren. De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.001	0.005	-0.022	0.025
	stationair Q250	0.015	0.016	-0.004	0.045
	stationair Q1500	-0.015	0.039	-0.342	0.021
	stationair Q2302	-0.015	0.039	-0.333	0.022
	stationair Q2776	-0.007	0.021	-0.181	0.015
	stationair Q3224	-0.002	0.018	-0.107	0.134
	stationair Q4118	0.004	0.014	-0.065	0.030
	stationair Q5000	0.010	0.016	-0.064	0.054
	stationair Q6000	0.015	0.021	-0.053	0.055

De verschillen zijn (net als in het D-HYDRO model) over het algemeen relatief klein, met een bias van maximaal 1,5 cm, maar lokaal (vooral rond rkm 23) groter dan voor dezelfde vergelijking in het D-HYDRO model (zie paragraaf 7.2). Deze 'dip' is ook zichtbaar in de totale vergelijking voor de software (zie Figuur 5-1) en treedt op in de Grensmaas, waar het zeer bochtig is en hard stroomt en een grinddrempel aanwezig is. Het is dus plausibel dat dit een zeer lokaal effect is.

Het Maasmodel heeft zo'n 85.000 rooster locaties (flow links) met overlaten. Villemonte en Tabellenboek geven per definitie iets andere energieverliezen. Het accumulatieve effect blijkt echter klein en is in de orde van een paar centimeter. Zoals verwacht, laten WAQUA en D-HYDRO hetzelfde effect zien. Voor beide softwaresystemen blijkt de impact van een andere overlaatformulering op de Maas minimaal.

C.3 Effect software met constante ruwheid

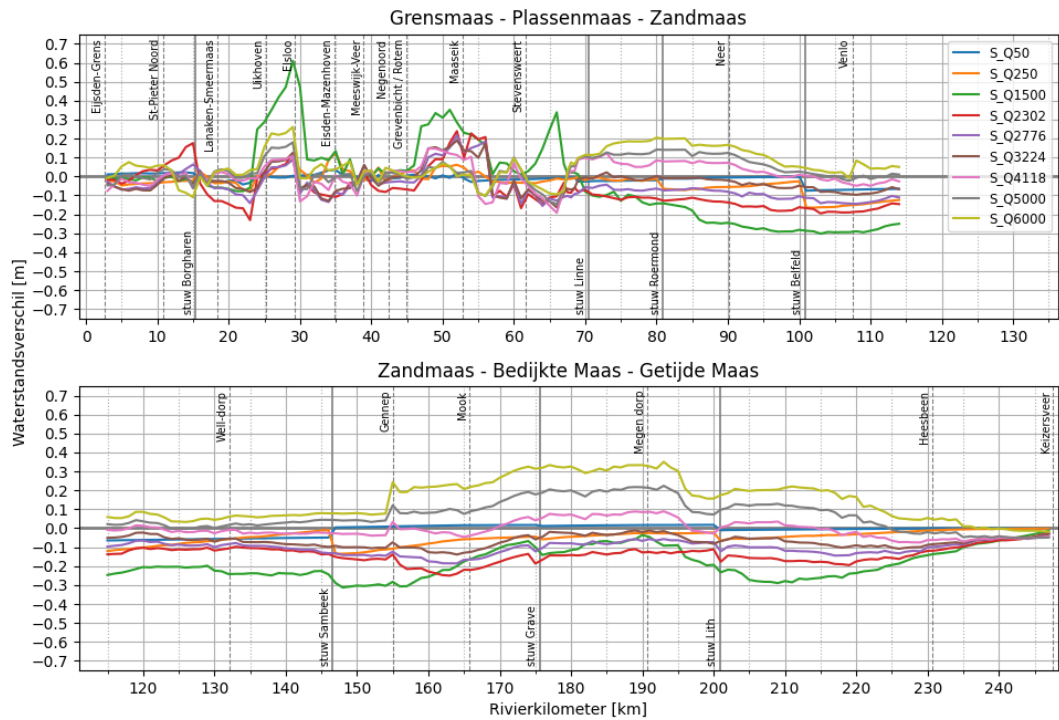
In zowel WAQUA als D-HYDRO wordt de ruwheid meegenomen via een zogeheten 'trachytopen' definitie om ruimtelijk afhankelijke (ecotopen) ruwheid mee te kunnen nemen. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, 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 C-5 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel C-5 Instellingen van variant (*fm_waq_j19_construw*) en referentie (*waq_j19_construw*) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software met een constante ruwheid.

	variant	referentie
	<i>fm_waq_j19_construw</i>	<i>waq_j19_construw</i>
Software	D-HYDRO	WAQUA
Tijdstap	variabel	7,5 s
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	WAQUA-waarde (1.0)	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie	G5 kalibratie
Ruwheid winterbed	constant (WhiteColebrook 0.2)	constant (WhiteColebrook 0.2)
Structures	G5	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Figuur C-3 resenteert 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. Tabel C-6 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur C-3.



Figuur C-3 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van het effect van de nieuwe software met een constante ruwheid (*fm_waq_j19_construw* t.o.v. *waq_j19_construw*) voor de verschillende stationaire afvoeren.

Tabel C-6 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van het effect van de nieuwe software met een constante ruwheid (*fm_waq_j19_construw* t.o.v. *waq_j19_construw*). De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.011	0.027	-0.075	0.035
	stationair Q250	-0.040	0.047	-0.164	0.124
	stationair Q1500	-0.111	0.170	-0.313	0.610
	stationair Q2302	-0.107	0.085	-0.250	0.239
	stationair Q2776	-0.079	0.064	-0.186	0.216
	stationair Q3224	-0.049	0.056	-0.164	0.190
	stationair Q4118	0.001	0.056	-0.192	0.148
	stationair Q5000	0.051	0.076	-0.146	0.224
	stationair Q6000	0.107	0.108	-0.109	0.350

De gevonden verschillen zijn heel sterk vergelijkbaar met die uit paragraaf 5.1. Dit betekent dat de grote verschillen door de overstap naar de nieuwe software niet worden veroorzaakt door een eventuele andere implementatie van de 'trachytopen' definitie.

Deze extra simulatie laat zien dat de ecotopen niet de oorzaak zijn van de verschillen. In Paragraaf 5.1 waren al andere redenen voor de verschillen gegeven, wat met deze extra simulatie wordt bevestigd.

C.4 Effect software zonder overlaten

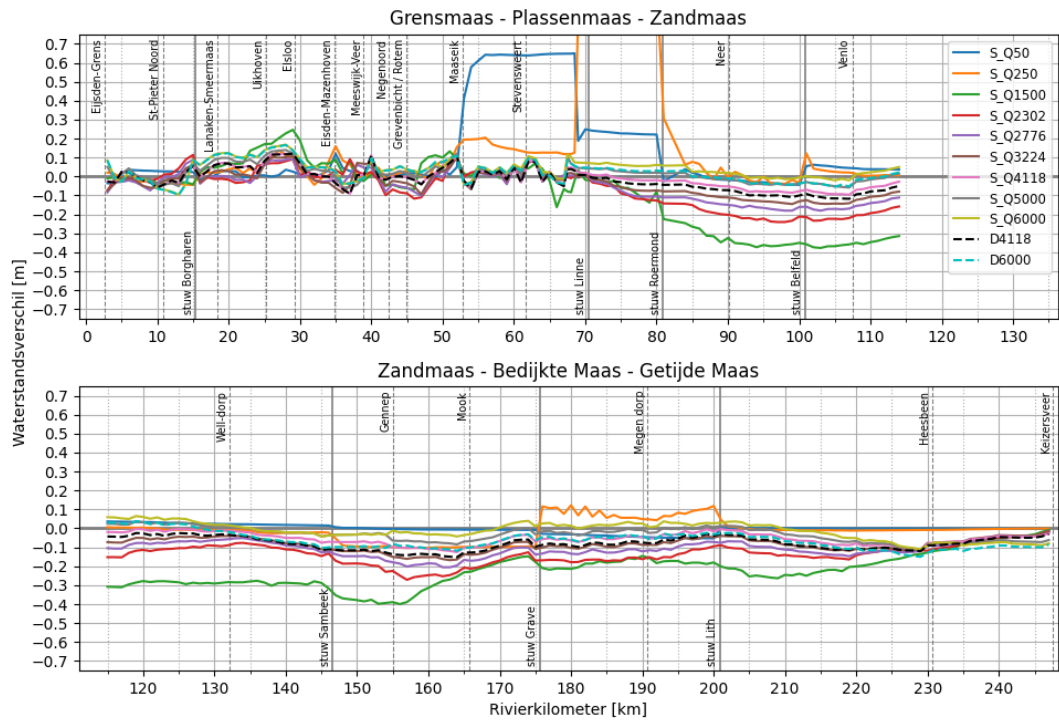
In WAQUA en D-HYDRO wordt de algemene afhandeling van overlaten net iets anders uitgevoerd. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software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

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

Tabel C-7 Instellingen van variant (fm_waq_j19_zo) en referentie (waq_j19_zo) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software zonder overlaten.

	variant	referentie
	fm_waq_j19_zo	waq_j19_zo
Software	D-HYDRO	WAQUA
Tijdstap	variabel	7,5 s
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	geen	geen
Viscositeit	WAQUA-waarde (1.0)	WAQUA-waarde (1.0)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie	G5 kalibratie
Ruwheid winterbed	constant (WhiteColebrook 0.2)	constant (WhiteColebrook 0.2)
Structures	G5	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Figuur C-4 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. Tabel C-8 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur C-4. Figuur C-4 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van het effect van de nieuwe software zonder overlaten (fm_waq_j19_zo t.o.v. waq_j19_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.



Figuur C-4 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van het effect van de nieuwe software zonder overlaten (fm_waq_j19_zo t.o.v. waq_j19_zo) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel C-8 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van het effect van de nieuwe software zonder overlaten (fm_waq_j19_zo t.o.v. waq_j19_zo). De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	0.060	0.170	-0.053	0.650
	stationair Q250	0.062	0.218	-0.103	1.030
	stationair Q1500	-0.157	0.154	-0.400	0.247
	stationair Q2302	-0.103	0.088	-0.272	0.114
	stationair Q2776	-0.081	0.067	-0.206	0.102
	stationair Q3224	-0.062	0.058	-0.168	0.108
	stationair Q4118	-0.033	0.049	-0.125	0.121
	stationair Q5000	-0.009	0.050	-0.113	0.140
	stationair Q6000	0.010	0.055	-0.109	0.169
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.050	0.057	-0.152	0.120
	dynamisch Q6000 (max13)	-0.024	0.067	-0.150	0.166

De resultaten voor 50 en 250 m³/s wijken plaatselijk bij stuwen sterk af, omdat er nu stroming rond de stuwen plaats kan vinden. Over het algemeen zijn de verschillen nu kleiner dan die uit paragraaf 5.1, vooral bovenstrooms van stuw Linne. Benedenstrooms zijn vooral de verschillen voor de extreme afvoeren sterk afgenomen, alleen voor een zomerbedvullende afvoer van 1500 m³/s zijn de verschillen zelfs nog iets groter. Dit betekent dat de grote verschillen door de overstap naar de nieuwe software voor een deel worden veroorzaakt door een andere implementatie van de overlaten in het algemeen (dus afgezien van het verschil tussen de implementatie van de Tabellenboek of Villemonte formulering).

C.5 Effect software met kleine viscositeit

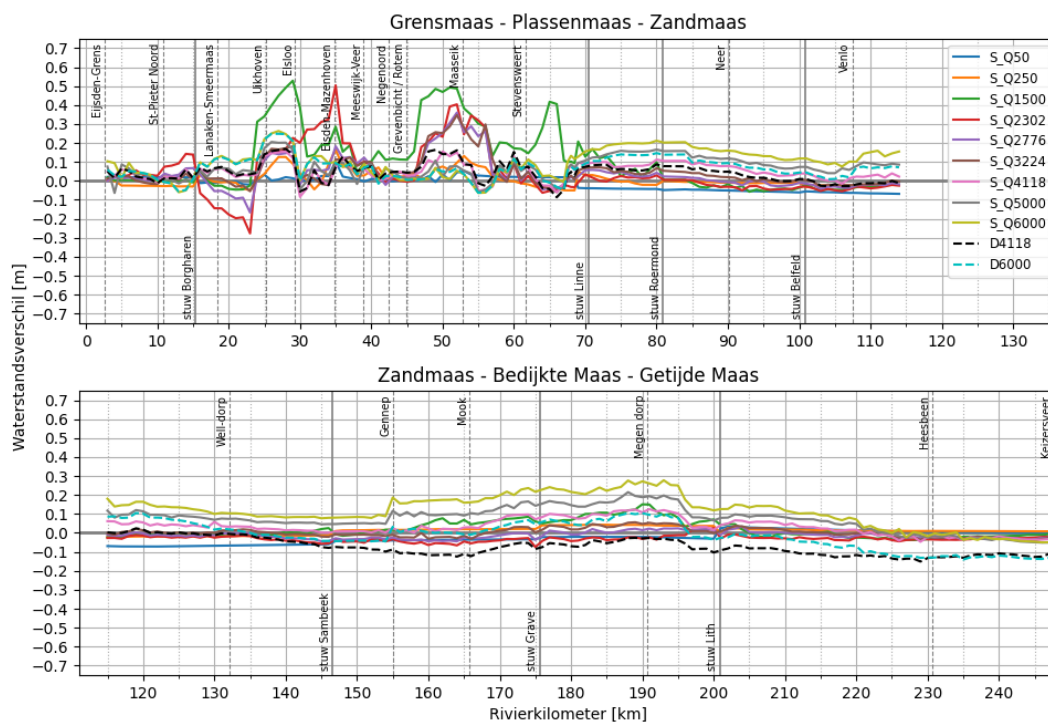
In WAQUA en D-HYDRO wordt de algemene afhandeling van viscositeit anders uitgevoerd. Om eventuele (indirecte) verschillen van de implementatie hiervan in de software in beeld te brengen is de vergelijking uit paragraaf 5.1, waarin naar het totale effect van de overstap naar de nieuwe software is gekeken,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

Tabel C-9 geeft een overzicht van de instellingen van de referentie en variant voor de verschillende modelonderdelen.

Tabel C-9 Instellingen van variant (*fm_waq_j19_zo*) en referentie (*waq_j19_zo*) voor het bepalen van het verschil veroorzaakt door nieuwe software met een kleine viscositeit.

	variant	referentie
	<i>fm_waq_j19_visc02</i>	<i>waq_j19_visc02</i>
Software	D-HYDRO	WAQUA
Tijdstap	variabel	7,5 s
Rooster	curvilineair (G5)	curvilineair (G5)
Parameters		
Overlaten	Tabellenboek	Tabellenboek
Viscositeit	klein (0.2)	klein (0.2)
Schematisatie		
Geometrie	j19_5 (G5)	j19_5 (G5)
Ecotopen	ecotopen 2017	ecotopen 2017
Ruwheid zomerbed	G5 kalibratie	G5 kalibratie
Ruwheid winterbed	constant (WhiteColebrook 0.2)	constant (WhiteColebrook 0.2)
Structures	G5	G5
Randvoorwaarden		
Locatie bovenrand	Eijsden	Eijsden
Lateralen	geen	geen
Qh-relatie	G5	G5

Figuur C-5 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. Tabel C-10 presenteert de statistieken voor de verschillende lijnen in Figuur C-5.



Figuur C-5 Waterstandsverschillen in meters ten gevolge van het effect van de nieuwe software met een kleine viscositeit ($fm_waq_j19_visc02$ t.o.v. waq_j19_visc02) voor de verschillende stationaire afvoeren en twee dynamische afvoergolven.

Tabel C-10 Statistieken waterstandsverschillen (in meter) ten gevolge van het effect van de nieuwe software met een kleine viscositeit ($fm_waq_j19_visc02$ t.o.v. waq_j19_visc02). De maximale afwijkingen worden dikgedrukt weergegeven.

Riviertak	Afvoertype	Bias	Stdev	Min	Max
Maas	stationair Q50	-0.018	0.034	-0.072	0.103
	stationair Q250	0.009	0.033	-0.050	0.166
	stationair Q1500	0.060	0.123	-0.057	0.529
	stationair Q2302	0.003	0.097	-0.277	0.504
	stationair Q2776	0.010	0.065	-0.166	0.360
	stationair Q3224	0.023	0.061	-0.059	0.347
	stationair Q4118	0.041	0.046	-0.084	0.156
	stationair Q5000	0.073	0.061	-0.064	0.215
	stationair Q6000	0.108	0.080	-0.064	0.277
	dynamisch Q4118 (max13)	-0.020	0.076	-0.151	0.169
	dynamisch Q6000 (max13)	0.024	0.078	-0.141	0.248

De effecten bovenstrooms van Linne zijn vergelijkbaar met die uit paragraaf 5.1, vooral bovenstrooms van stuw Linne. Benedenstrooms zijn vooral de verschillen voor een zomerbedvullende afvoer van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ sterk afgenomen. Dit komt omdat hier de grootste stroomsnelheidsverschillen plaatsvinden op de rand tussen zomer- en winterbed. Dit betekent dat de grote verschillen door de overstap naar de nieuwe software deels worden veroorzaakt door een andere afhandeling van viscositeitsterm (dus afgezien van de overstap naar de Smagorinsky formulering). Bij de debieten waar het winterbed gaat meestromen en de impact van de viscositeit het grootst zal zijn, met name bij $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, levert dit een verschil op van maximaal zo'n 30 cm.

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