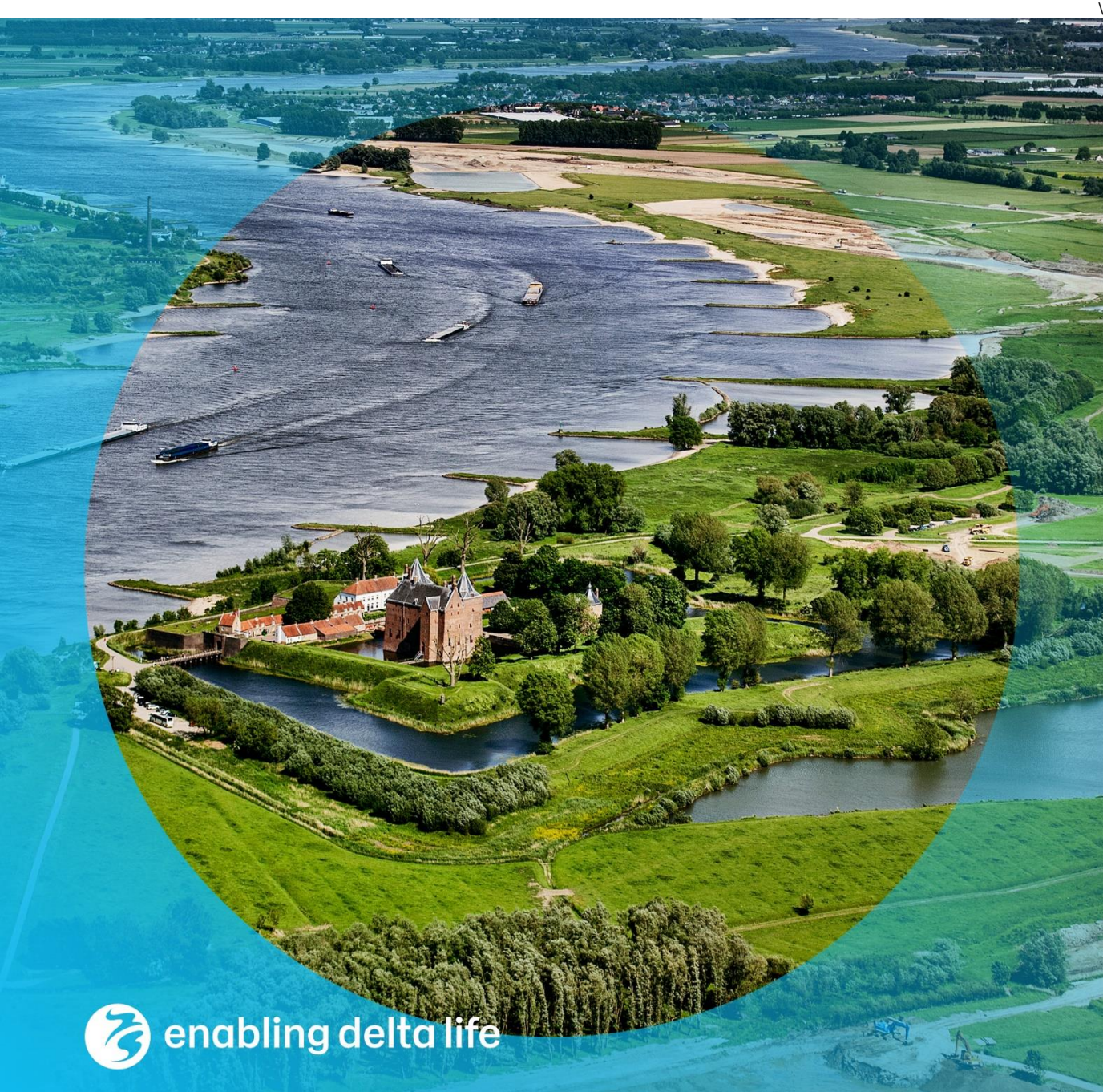


B&O-modellen en deelmodellen Maas



B&O-modellen en deelmodellen Maas

Auteur(s)

Asako Fujisaki
Ron Agtersloot
Anke Becker

B&O-modellen en deelmodellen Maas

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat-WVL
Contactpersoon	William de Lange
Referenties	KPP/SITO-PS modelschematisaties zoet
Trefwoorden	

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	24-04-2024
Projectnummer	11208053-002
Document ID	11208053-002-ZWS-0005
Pagina's	77
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Asako Fujisaki	
	Ron Agtersloot	
	Anke Becker	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een nieuw beno22-model van de zesde generatie en bijbehorende deelmodellen voor de Maas, die worden ingezet voor de vergunningverlening in het kader van de Waterwet. Het beno22-model is het eerste beno-model van de Maas dat vanuit Baseline-NL is opgebouwd. Ten opzichte van het beno19-model (Van der Deijl et al., 2022) zijn de kunstwerken bij de in- en uitlaatkanalen van maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo opgenomen in de D-HYDRO-schematisatie en is de doorstroming bij deze maatregelen en bij de haven van Wanssum verbeterd met modelmaatregelen. Voor de stationaire berekeningen zijn er initiële condities gemaakt die beter passen bij de gewenste eindtoestand, waardoor de benodigde rekentijd aanzienlijk verkort kon worden. En er zijn verbeteringen doorgevoerd in zowel Baseline als D-RTC om handmatige aanpassingen aan de schematisatie na projectie met Baseline overbodig te maken.

De roosterresolutie van de deelmodellen is vier keer zo fijn als die van het gehele Maasmodel. Om te lange rekentijden te voorkomen is het totaalmodel opgeknipt in drie deelmodellen van telkens 80-100 km lengte (gemeten langs de rivieras) en met een overlap van ongeveer 20 km. De modelschematisaties zijn afgeleid van de Baselineschematisatie `baseline-maas-beno22_6-v2`.

De aanpak voor het maken van de deelmodellen is ten opzichte van de vijfde-generatiemodellen herzien op basis van aanbevelingen en wensen van gebruikers van de modellen. De belangrijkste wijzigingen zijn het aantal deelmodellen (van 9 naar 3) en de manier waarop in de randvoorwaarden rekening gehouden wordt met topvervlakking.

Het rooster van het gehele Maasmodel is in twee stappen verfijnd om tot een zo hoog mogelijke kwaliteit van de deelroosters te komen. Ten eerste is het rooster automatisch met een factor vier (2x2) verfijnd. Vervolgens is het resulterende 20-m-rooster aangepast om de orthogonaliteit te verbeteren en het rooster te optimaliseren voor de tijdstap.

In de deelmodellen zijn de parameterinstellingen zoveel mogelijk hetzelfde gehouden als in het gehele Maasmodel. Alleen de achtergrondwaarde van de horizontale wervelviscositeit ("eddy viscosity") is verhoogd van 0,1 naar 0,4 m²/s, om het waterstandsverschil ten opzichte van het 40 m model van de gehele Maas te verminderen.

De berekende waterstanden liggen in het beno22-model van de gehele Maas over het algemeen lager dan in beno19. Benedenstreams van de Grensmaas gaat het om een verschil van enkele cm, dat veroorzaakt wordt door een structureel verschil in de hoogte van de zomerbedbodem en enkele lokale ingrepen in de uiterwaarden. Op de Grensmaas zijn de waterstandsverschillen groter, tot maximaal 70 cm. Op dit traject is, onder andere door het hoogwater van juli 2021, de bodemligging in het zomerbed sterk veranderd. Daarnaast zijn op enkele locaties nieuwe/gewijzigde ingrepen in het winterbed opgenomen. Het toevoegen van de nieuwe kunstwerken bij Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo veroorzaakt bij Roosteren aanzienlijk hogere waterstanden (tot 63 cm) dan in beno19.

De verschillen in berekende waterstanden zorgen, samen met enkele veranderingen in kadehoogtes, voor verschillen in inundatiegebieden op enkele locaties. De verschillen zijn het grootst voor de afvoerniveaus van 3.200 m³/s en 4.100 m³/s.

In de dynamische berekening D1300 is de hoogste berekende waterstand tussen net bovenstrooms van stuw Sambeek (rkm 145) tot Lith dorp (rkm 202) niet representatief voor de passage van de hoogwaterpiek, omdat de stuwen dan nog actief zijn. Door de sturing op wisselende streefpeilen ligt de waterstand in de aan- en afloop van het hoogwater hoger dan tijdens de piekafvoer.

De PID-controllers van alle stuwen behalve Linne en Roermond worden instabiel bij lage afvoeren. Dit komt door de instellingen voor de PID-parameters. In de dynamische berekeningen wordt de sturing van de benedenstroomse stuwen Grave en Lith instabiel bij de overgang van het ene naar het volgende streefpeil. Er wordt aanbevolen de sturing te verbeteren om instabiliteit in de toekomst te voorkomen. Inmiddels is dit ingepland voor de tweede helft van 2023.

Door een bug in de gebruikte versie van D-HYDRO (Versie 2022.01_patch01) ontstaat een fout in de afvoerbalans als partitiegrenzen gekruist worden door bruggen of kunstwerken. Inmiddels is versie 2023.01 beschikbaar, waarin deze fout is opgelost. Dit is echter nog niet in detail getest met het Maas-model.

Het waterstandsverschil in de simulaties met een afvoer van 3.200 m³/s tussen de deelmodellen B (rkm 67 – 165) en C (rkm 145 – 247) en het gehele Maasmodel bedraagt vrijwel overal minder dan 8 cm. Bij de spoor- en fietsbrug Mook (rkm 165) is een lokale uitschieter van 11 cm zichtbaar in deelmodel C. In deelmodel B valt het traject tussen rkm 100 en 125 (grofweg de gemeente Venlo) op. Hier liggen de waterstanden in het deelmodel structureel enkele cm lager dan in het gehele Maasmodel. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat op dit traject vrijwel geen winterbed aanwezig is, waardoor (kleine) verschillen in de weergave van het zomerbed en de oevers van de Maas als gevolg van de hogere resolutie in het deelmodel toch kunnen leiden tot relatief grote waterstandsverschillen. In de simulatie met 4.100 m³/s zijn de verschillen tussen deelmodel en C en het gehele Maasmodel kleiner dan in de simulatie met 3.200 m³/s.

Model A kent een beduidend groter verschil ten opzichte van het gehele Maasmodel, zowel bij 3.200 m³/s als bij 4.100 m³/s. Bovenstrooms van rkm 15 (Maastricht) en bij Roosteren (rkm 50-55) liggen de waterstanden in het deelmodel aanzienlijk lager (max. 35 cm). Eén van de verklaringen voor het verschil bij Maastricht is de weergave van het zomerbed, dat in het 20m-model gemiddeld genomen breder uitpakt dan in het 40 m model. Bij Roosteren is de belangrijkste oorzaak dat de afvoer door de maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo (Oude Maasje) aanzienlijk hoger is dan in het gehele Maasmodel.

Alle standaardberekeningen met zowel beno22 als de deelmodellen kunnen binnen één nacht worden gedraaid. De rekentijden liggen, afhankelijk van de situatie (afvoerniveau en stationair/dynamisch) tussen 5 en 17 uur voor beno22 en tussen 9 en 20 uur voor de deelmodellen. Van de deelmodellen rekent deelmodel A aanzienlijk langer dan deelmodellen B en C, omdat de stroomsnelheden in dat gebied significant hoger zijn en dus aanzienlijk kleinere tijdstappen nodig zijn.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doel	8
1.3	Software	9
1.4	Organisatie en bijdragen	9
1.5	Leeswijzer	10
2	Opbouw beno-model	11
2.1	Opbouw vanuit Baseline	11
2.1.1	Opbouw baseline-maas-beno22_6-v1	11
2.1.2	Conversie naar D-HYDRO-model	11
2.2	Randvoorwaarden	11
2.3	Initiële condities	12
2.4	Kunstwerken en sturing	13
3	Resultaten beno-model	14
3.1	Waterstandsverschillen	14
3.1.1	Stationaire berekeningen	14
3.1.2	Dynamische berekeningen	20
3.2	Inundatiepatronen	23
3.2.1	Stationaire berekeningen	24
3.2.2	Dynamische berekeningen	31
3.3	Rekentijd	34
3.4	Conclusies en aanbevelingen	35
4	Verfijning rooster	37
4.1	Methodiek	37
4.1.1	Automatische verfijning van het rooster	37
4.1.2	Handmatige aanpassingen 20-m-rooster	38
4.1.3	Toekomstige aanpassingen 40-m-rooster	39
4.2	Resultaat	39
4.2.1	Handmatige aanpassingen	39
4.2.2	Tijdstaptest	41
5	Aanpak deelmodellen	44
5.1	Aanpak en ervaringen deelmodellen Maas in de 5 ^e generatie	44
5.2	Aanpak Rijntakken in de 6 ^e generatie	45
5.3	Gebruik van de deelmodellen voor de Maas	45

5.4	Herziening aanpak voor de 6 ^e generatie deelmodellen voor de Maas	46
5.4.1	Meenemen topvervlakking	46
5.4.2	Aantal deelmodellen	47
5.4.3	Keuze afvoergolven	48
5.4.4	Keuze numerieke instellingen	48
5.4.5	Bepalen randvoorwaarden hoogwaterreferenties	49
5.4.6	Onttrekkingen voor de kunstmatige lateralen (hoogwaterreferenties)	49
5.4.7	Validatie resultaten deelmodellen	50
5.4.8	Aanvullende sets van standaard randvoorwaarden	50
6	Opbouw deelmodellen	52
6.1	Opbouw vanuit Baseline	52
6.2	Conversie naar D-HYDRO	52
6.3	Locaties randen deelmodellen	52
6.4	Randvoorwaarden	55
6.5	Initiële condities	56
6.6	Numerieke instellingen	56
6.7	Aanvullende aanpassingen aan de deelmodellen	56
7	Resultaten deelmodellen	59
7.1	Waterstandsverschillen	59
7.2	Afvoerverschillen	62
7.2.1	Afvoeren in de Maas	62
7.2.2	Nevengeulen en andere ingreeplocaties	63
7.2.3	Nieuwe kunstwerken	64
7.3	Discussie	65
7.3.1	Invloed resolutie op stroombeeld	65
7.3.2	Overeenkomsten in stroombeeld	67
7.4	Rekentijden	72
8	Conclusies en aanbevelingen	73
8.1	Conclusies	73
8.1.1	Beno-model	73
8.1.2	Deelmodellen	74
8.1.3	Extra aanvulling	74
8.2	Aanbevelingen	75
8.2.1	Beno-model	75
8.2.2	Deelmodellen	75
9	Literatuur	76

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het kader van het KPP-programma 2022 tussen RWS-WVL en Deltares wordt binnen het thema "Modellen en applicaties" gewerkt aan het Beheer en onderhoud (B&O) van de gebiedsschematisaties van Rijkswaterstaat.

Een van de kerntaken van Rijkswaterstaat is het werken aan "droge voeten". Rijkswaterstaat realiseert deze taak door bescherming te bieden tegen overstroming van zeeën, rivieren en meren. Om deze bescherming mogelijk te maken en te kunnen blijven garanderen, maakt RWS gebruik van een uitgebreid modelinstrumentarium en de daaraan gekoppelde modelschematisaties. Deze worden zowel ingezet voor operationele advisering vanuit de Hydro Meteo Centra (HMC) van het Watermanagementcentrum Nederland (WMCN) als voor het uitvoeren van berekeningen ten behoeve van Waterwetvergunningverlening en de berekeningen van de Hydraulische Randvoorwaarden (Wettelijk Toetsingsinstrumentarium). Bij de Waterwet (WtW-vergunningverlening) toetst RWS de invloed van ingrepen en activiteiten op de waterstaatswerken (vaarwegen, waterkeringen, dijken, bruggen, gemalen, sluizen en stuwen), terwijl bij de Hydraulische Randvoorwaarden de toetsing van de dijken (dijkhoogte en belasting) centraal staat.

1.2 Doel

In het deelproject "beno deelmodellen Maas" worden modelschematisaties opgezet die worden ingezet voor vergunningverlening in het kader van de Waterwet. Om voor vergunning in aanmerking te komen moeten de effecten van beoogde maatregelen zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald. De bestaande zesde generatie modelschematisaties voor de Maas (De Jong, 2021) hebben met cellen in het zomerbed van ca. 40 m in de stroomrichting een te grove resolutie voor dit doeleinde.

Daarom worden modelschematisaties ontwikkeld met een twee keer zo hoge resolutie (celgroottes in het zomerbed van ca. 20 m in de stroomrichting). Een model van de Maas met deze resolutie levert echter rekentijden op die te lang zijn voor de beoogde toepassing. Daarom wordt het hoge-resolutiemodel opgeknipt in verschillende deelmodellen. Afhankelijk van de beoogde ingreep worden één of meer van deze deelmodellen ingezet om de effecten door te rekenen.

Waar in dit rapport gesproken wordt over het "gehele Maasmodel" wordt het model van de gehele Maas met de 40 m resolutie bedoeld, de modellen met de 20 m resolutie worden aangeduid met "deelmodellen".

Deze rapportage beschrijft in verschillende stappen de opzet van 1) een nieuw beno-model voor de Maas en 2) de deelmodellen voor de Maas in de zesde generatie. Om de schematisaties van het nieuwe beno-model en de deelmodellen te valideren zijn een aantal stationaire en dynamische standaardberekeningen uitgevoerd en resultaten vergeleken. De vergelijkingen en analyses worden eveneens in dit rapport gepresenteerd.

V1.0 van dit rapport is op 24 mei 2023 opgeleverd. De rapportage is echter begin 2024 geüpdatet naar v2.0, vanwege de vraag voor het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) om één extra stationaire randvoorwaarde toe te voegen aan de standaardrandvoorwaarden voor de beno22_6 beheer-en-onderhoud-modellen. Het betreft de afvoer van 750 m³/s voor zowel het totaalmodel als de deelmodellen. Doordat het slechts een toevoeging van een extra

stationaire randvoorwaarde betreft, heeft dit geen gevolgen voor de resultaten van de simulaties van versie v1b van de modelschematisaties zoals beschreven in onderliggende rapportage.

Tevens is bij de update van de modelschematisaties een fout in randvoorwaarde Maas_SD4100_bnd.bc voor deelmodel dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a aangepast. De tijdstap 2880 is verwijderd en de waarde die hierbij stond is bij tijdstap nul gezet. Dit verkort alleen de inspeeltijd en heeft geen invloed op de uiteindelijke resultaten.

Vanwege de toevoeging van de extra randvoorwaarden aan de eerdere oplevering zijn de namen van de nieuw opgeleverde modelschematisaties gewijzigd naar:

- dflowfm2d-maas-beno22_6-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km002_085-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km067_165-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2b

1.3 Software

Voor de opzet van de deelmodellen en de standaardberekeningen is de volgende software gebruikt:

- **D-HYDRO Suite:** Voor de berekeningen is D-HYDRO Suite 2022.01_patch01 (DIMRset 2.17.12_patch01) gebruikt. Voor toekomstige berekeningen met de nieuwe modellen kan versie 2023.01 worden gebruikt.¹ De versie 2023.01 is ook gebruikt voor de afleiding van de extra stationaire randvoorwaarde van 750 m³/s.
- **Baseline:** Voor de Baselinewerkzaamheden is gebruik gemaakt van ArcMap 10.6.1 met Baseline 6.3.1.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux H6 cluster bij Deltares, onder het CentOS 7 besturingssysteem.

1.4 Organisatie en bijdragen

Aan dit project is door de volgende personen bijgedragen:

Naam	Organisatie	Rol
Anke Becker	Deltares	deelprojectleider
Asako Fujisaki	Deltares	werkzaamheden rooster en D-HYDRO
Ron Agtersloot	AHA	werkzaamheden D-HYDRO
Ton Visser	Deltares	werkzaamheden Baseline
Anna van den Hoek	Deltares	Werkzaamheden extra randvoorwaarden
Eveline van der Deijl	Deltares	Werkzaamheden extra randvoorwaarden, deelprojectleider Maas Modelschematisaties
Aukje Spruyt	Deltares	projectleider KPP Modelschematisaties Zoet
Anna Kusters	Deltares	projectleider beno deelmodellen Rijn, afstemming methodiek, hoofdreview conceptrapport
Erik Mosselman	Deltares	Review van de samenvatting, review van de wijze waarop het commentaar van RWS op het conceptrapport verwerkt is, review van aanvullingen voor versie v2.0

¹ N.B.: Vanwege een verbeterde implementatie van de afhandeling van Qh-relaties in de code wijken de waterstanden op de benedenrand met v2023.01 enkele centimeters af van de in dit rapport gepresenteerde resultaten. Dit heeft geen gevolgen voor de conclusies in dit rapport.

Naam	Organisatie	Rol
Lianita Suryawinata	RWS-ZN	discussie methodiek en resultaten, aanleveren Baselinemaatregelen, controle
Tom Kuijpers	RWS-ZN	discussie methodiek en resultaten, aanleveren Baselinemaatregelen, controle
Siebolt Folkertsma	RWS-ZN	discussie methodiek en resultaten, aanleveren Baselinemaatregelen, controle
Martin Scholten	RWS-WVL	opdrachtgever

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de opbouw van het beno22-model van de gehele Maas, met 40-m-rooster. Hoofdstuk 3 vergelijkt de berekende waterstanden en inundatiepatronen met het voorgaande beno-model, beno19, om te beoordelen of alle verschillen verklaarbaar zijn.

Hoofdstuk 4 presenteert de verfijning van het rooster ter gebruik in de deelmodellen. De nieuwe aanpak voor de opbouw van de deelmodellen van de Maas in de 6^e generatie staat beschreven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 laat de opbouw zien, en in hoofdstuk 7 worden de resultaten van de deelmodellen vergeleken met de resultaten van het 40 m model van de gehele Maas. Hoofdstuk 8 laat zien hoe voor de deelmodellen aanvullende sets randvoorwaarden zijn afgeleid.

Hoofdstuk 8 presenteert conclusies en aanbevelingen.

2 Opbouw beno-model

2.1 Opbouw vanuit Baseline

2.1.1 Opbouw baseline-maas-beno22_6-v1

De Baseline-schematisatie `baseline-maas-beno22_6-v2` is de eerste beno-schematisatie van de Maas die is opgebouwd vanuit Baseline-NL. Daarvoor is de schematisatie `baseline-nl_land-beno22_6-v1` verbeterd met de volgende aanvullende maatregelen om te komen tot `baseline-nl_land-beno22_6-v2`:

```
ma_Qraai6G_a10
ma_meetpunten2021_a4
ma_hwvprimairekeringen_a4
ma_updatebandijkenvbeno_a2
ma_zomerb_a4
```

Vervolgens is er een uitsnede ('clip') gemaakt met behulp van `clip_contour-maas-beno22_6-v2`, met als resultaat de schematisatie `baseline-maas-beno22_6-v2` voor de Maas.

2.1.2 Conversie naar D-HYDRO-model

Het beno-model is geconverteerd naar invoer voor D-HYDRO. Daarbij is gebruik gemaakt van het rooster `grid-maas_40m_v1_net.nc` en de modelrand `model_boundary-maas-beno22_6-v2`. De naam van het D-HYDRO-model is `dflowfm2d-maas-beno22_6-v2a`.

2.2 Randvoorwaarden

Voor de testberekeningen is gebruik gemaakt van de nieuwe standaardsommen (uit 2022) voor de Jaarlijkse Actualisatie Maas-Modellen (JAMM). Dit betreft een selectie van de sommen uit De Jong (2022). Deze selectie bestaat uit 5 dynamische afvoergolven en 7 stationaire afvoeren, zie

Tabel 1. De initiële condities voor de stationaire berekeningen uit

Tabel 1 zijn uiteindelijk aangepast om te lange rekentijden te voorkomen (paragraaf 2.3).

Op de bovenrand van het model, bij Lixhe, en op de locaties van laterale toestromingen of onttrekkingen worden afvoertijdseries of constante afvoeren opgelegd, en op de benedenrand van het model, bij Keizersveer, wordt de QH-relatie zoals ontwikkeld door Van der Wijk (2022) gebruikt, in de versie met 5 cm zeespiegelstijging (`Keizersveer_Qh_bnd_j19_zs.bc`).

Aanvullend aan boven genoemde standaardsommen zijn er met de RGWM nieuwe randvoorwaarden aangemaakt voor stationaire berekeningen met afvoeren van 1.700 en 2.500 m³/s, en zijn de laterale toestromingen voor de stationaire afvoeren van 1.300 m³/s, 2.100 m³/s en 6.000 m³/s uit De Jong (2022) verbeterd². De aanpak hiervoor wordt beschreven in Van der Deijl (2023). De hieronder gepresenteerde resultaten zijn berekend met de nog niet gecorrigeerde lateralen.

² De aanpak voor het afleiden van stationaire lateralen met de RWGM uit De Jong (2022) was nog niet geschikt voor afvoeren kleiner dan 2.300 m³/s of groter dan 4.100 m³/s. Voor lagere en hogere afvoeren werden de waarden voor 2.300 m³/s of 6.000 m³/s simpelweg geëxtrapoleerd. Dit is nu verbeterd.

Als tweede aanvulling zijn met de RGWM ook voor een stationaire afvoer van 750 m³/s de randvoorwaarden afgeleid. Hiervoor is de relatie voor lage stationaire afvoeren van De Jong, Van der Deijl en Spruyt (2021) toegepast.

Tabel 1 Standaardrandvoorwaarden Maas.

Naam	Situatie	Bovenstroomse randvoorwaarde bij Lixhe ³ (max. afvoer) in m ³ /s	Initiële condities
S50	Stationair	69,86	Q25
S250	Stationair	269,10	Q250
S1300	Stationair	1298,76	Q250
S2100	Stationair	2098,76	Q750
S3200	Stationair	3192,77	Q1000
S4100	Stationair	4088,48	Q1250
S6000	Stationair	5983,99	Q1500
D1300	Dynamisch	1311,00	Q250
D2100	Dynamisch	2108,85	Q750
D3200	Dynamisch	3204,00	Q1000
D4100	Dynamisch	4104,00	Q1250
D6000	Dynamisch	6003,00	Q1500

2.3 Initiële condities

Met de initiële condities die beschikbaar waren voor het beno19-model (

Tabel 1) waren in het geval van de stationaire berekeningen heel lange rekenperiodes (orde 90 dagen) nodig om tot een volledig stationaire toestand te komen. Dit kwam doordat een aantal grote retentiegebieden maar heel langzaam volliep. Daarom is besloten om voor alle stationaire berekeningen nieuwe initiële condities aan te maken die dicht bij de gewenste eindtoestand liggen.

De initiële condities zijn bepaald met zeer lange stationaire berekeningen (90 d), waarvoor wel de initiële condities uit

Tabel 1 zijn gebruikt. Het resultaat van deze berekeningen is omgezet naar velden van waterstanden en stroomsnelheden (in de vorm van *samples*, xyz-waardes). Deze kunnen, samen met initiële stuwstanden die worden opgegeven via de invoerbestanden voor de stuwgeometrie, worden gebruikt als initiële condities voor toekomstige berekeningen. Hiermee kan de nodige rekenperiode worden verkort naar 10 dagen.

N.B.: In tegenstelling tot *restart*-bestanden (die ook beschikbaar zijn in D-HYDRO) wordt met de velden van waterstanden en stroomsnelheden geen perfecte "warme" start bereikt, dat wil zeggen dat er alsnog enig inspelen nodig is voordat een volledig stationaire toestand wordt bereikt. Voor de RWS-modellen is om praktische redenen alsnog gekozen voor gebruik van deze velden in plaats van *restart*-bestanden.

De naamgeving van de bestanden met de nieuwe initiële condities is als volgt:

S0050.xyz (waterstanden),
S0050_x.xyz (snelheden in x-richting),

³ De afvoeren bij Lixhe zijn afgeleid van afvoeren bij Borgharen. De bijbehorende afvoeren bij Borgharen zijn de afgeronde waardes die in de naam van de standaardsommen gebruikt zijn, zie eerste kolom van dit tabel.

S0050_y.xyz (snelheden in y-richting),
 Maas_structures_S0050.ini (initiële stuwstanden),
 waarbij achter de "S" de afvoer van de betreffende berekening staat. De namen hierboven zijn dus een voorbeeld voor de standaardsoort "S0050".

2.4 Kunstwerken en sturing

De kunstwerken en sturing zijn overgenomen uit maas-beno19_6-v1a (Van der Deijl et al., 2022). Daarnaast zijn er 6 nieuwe kunstwerken toegevoegd in de in- en uitlaatkanalen van maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo. Deze kunstwerken zorgen ervoor dat de maatregelen niet te vroeg meestromen en dat ze niet te veel afvoer trekken. Tabel 2 toont de dimensies ervan. De nieuwe kunstwerken worden niet aangestuurd met D-RTC, maar hebben een vaste instelling.

Tabel 2 Nieuwe kunstwerken in dflowm2d-maas-beno22_6-v2a.

Naam	rkm	Crest Level (m +NAP)	Gate Lower Edge Level (m+NAP)	Gate Height (m)	Gate Opening Width (m)	Crest Width (m)	Type
Inlaat-Elerweerd	47,02	27,68	29,68	2,0	0	35,4	General Structure
Uitlaat-Elerweerd	49,40	26,18	28,18	1,5	0	54,0	General Structure
Inlaat-Heerenlaak	53,00	21,18	24,18	5,8	0	37,25	General Structure
Uitlaat-Heerenlaak	53,00	24,18	27,18	2,8	0	38,85	General Structure
Contelmo-Zuid	54,50	25,7	28,7	999	0	60,00	General Structure
Contelmo-Noord	55,00	29,0	999	999	0	30,00	General Structure

3 Resultaten beno-model

3.1 Waterstandsverschillen

3.1.1 Stationaire berekeningen

In Figuur 1 zijn de last25-waterstandsverschillen op de as van de rivier weergegeven tussen de modelschematisaties beno19_6-v1a en beno22_6-v2a (beiden 40-m-rooster) voor de stationaire (S) berekeningen uit

Tabel 1.

Bij het laagste afvoerniveau (S50) wordt in beide modellen, beno19 en beno22, de sturing van alle stuwen behalve Linne en Roermond instabiel. De instellingen van de PID-controllers zijn nog niet geschikt voor deze lage afvoer. Figuur 2 laat aan de hand van stuw Grave zien dat de kruinhoogte in beide modellen binnen een vergelijkbare bandbreedte en met vergelijkbare golflengte (orde 8 uur) schommelt. De golven zijn tussen de twee modellen echter in de tijd verschoven. De last25-waarden van de waterstanden worden over het laatste uur van de berekeningen bepaald en hangen daarmee af van de timing van de golven. Figuur 3 laat zien hoe de schommeling in waterstanden bij rkm 195, zo'n 5 km bovenstrooms van stuw Lith, verschoven is in de tijd tussen de modellen. De last25-waarden verschillen hierdoor orde 5 mm. De last25-waarde is dus in de S50-berekeningen geen goede benadering van de gemiddelde waterstand meer. Dat verklaart de onregelmatige waterstandsverschillen tussen beno19 en beno22 in deze berekening. In de S250-berekening wordt de PID van stuw Borgharen instabiel.

Er wordt aanbevolen om de PID-parameters verder af te regelen. Als dat niet goed lukt voor het hele afvoerbereik kunnen er meerdere losse PID-controllers met verschillende parameter sets worden gedefinieerd voor verschillende afvoerbereiken.

In S250 loopt het waterstandsverschil in de stuwpannen benedenstrooms van Roermond op in elk stuwpan, tot maximaal orde 2 cm (verschillend per stuwpan). De waterstanden in beno22 liggen lager dan in beno19, omdat de zomerbedbodemplas in beno22 structureel lager ligt. Bovenstrooms van elke stuw is het waterstandsverschil weer verdwenen, omdat de stuwen bij deze afvoer in beide modellen op dezelfde streefpeil sturen. De zomerbedbodemplas is door RWS-ZN opnieuw gecontroleerd en voor goed bevonden.

Ook in de berekeningen met hogere afvoer ligt de waterstand in beno22 tussen rkm 247 en rkm 57 structureel iets lager dan in beno19 vanwege het verschil in bodemligging. Over het algemeen is het waterstandsverschil kleiner naarmate de afvoer toeneemt, omdat het verschil in bodemligging met toenemende waterdiepte minder relevant wordt.

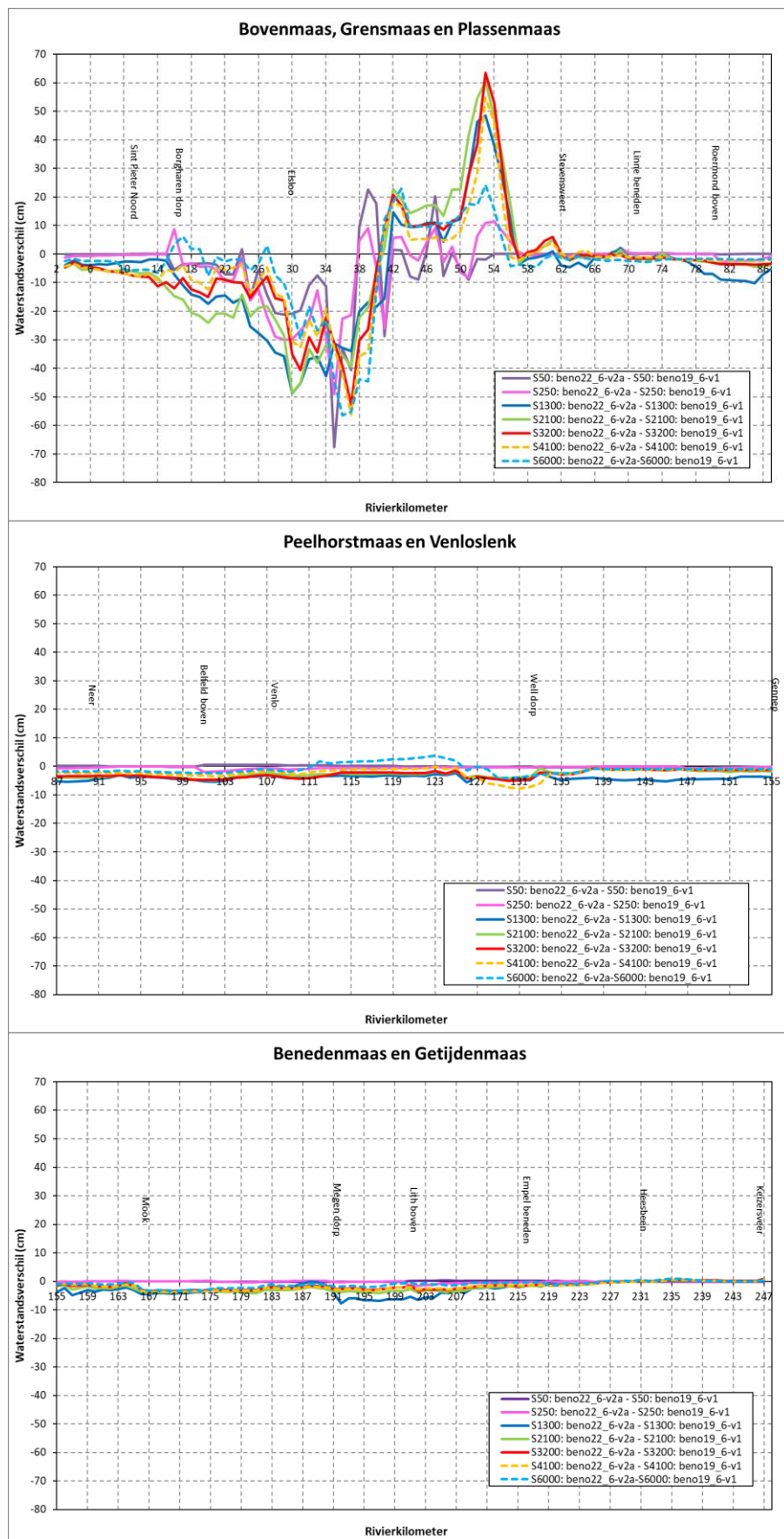
De waterstandsverschillen tussen rkm 190 en 210 (7 cm voor S1300), rkm 125-134 (6-9 cm voor S3200 en S4100) en rkm 77 – 87 (Buggenum, 10 cm voor S1300) steken boven dit algemene patroon uit. Lokaal is bij Buggenum een verdieping van de bodem tussen 1 en 2 m ten opzichte van beno19 te zien (Figuur 7). In S1300 is de afvoer hier nog geconcentreerd in het zomerbed, waardoor dit verschil een grote invloed heeft. In S2100 en hoger stroomt de brede uiterwaard parallel mee en heeft het bodemverschil minder invloed op de waterstanden. Een vergelijkbaar effect speelt tussen rkm 190 en 210: met name tussen rkm 202 en 206 en tussen rkm 208 en 212 is het zomerbed sterk verlaagd, waardoor zich vanaf rkm 212 een waterstandsverlaging opbouwt richting bovenstrooms. Bij rkm 190 wordt deze weer teniet gedaan door de veranderingen in de plas van Gouden Ham, die in beno22

vanwege aangepaste bodemhoogtes later doorstroombaar is dan in beno19 in de S1300-berekening.

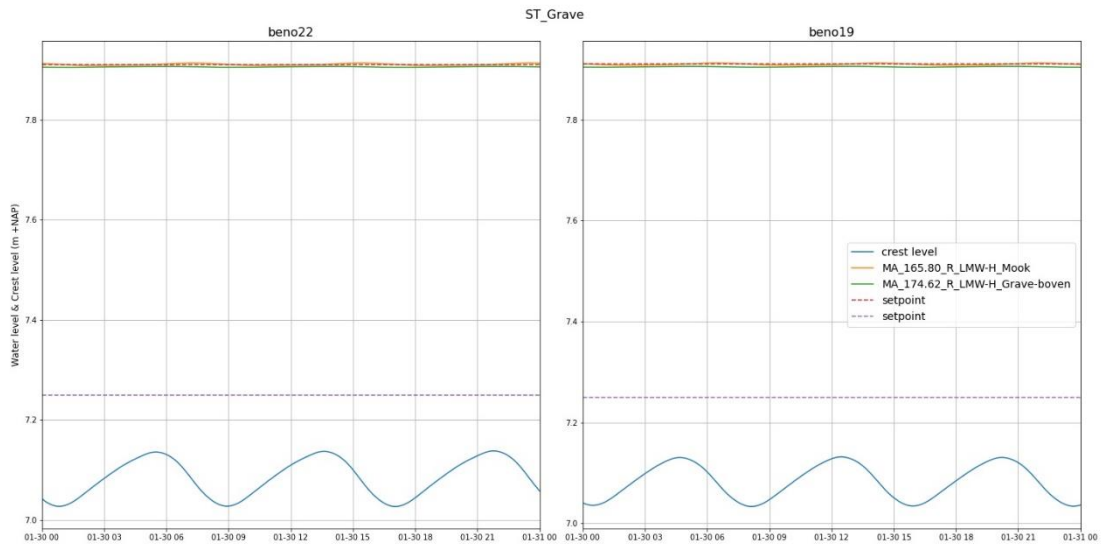
Vanaf S2100 stroomt hier de uiterwaard over een grote breedte mee zodat de veranderingen in het zomerbed en in de plas veel minder relevant worden. Bij rkm 130 (Ooijen-Wanssum) zijn er meerdere veranderingen uitgevoerd aan de schematisatie: 1) Eens tukje kade tussen rivier en uiterwaard is verwijderd (niet de primaire kering), 2) De haven van Wansum was in beno19 onterecht afgesloten met overlaten, dit is weer doorstroombaar gemaakt, en 3) de kade tussen rivier en uiterwaard is in beno22 met ongeveer 50 cm verlaagd. Dit heeft met name bij de afvoeren S3200 en S4100 invloed op de waterstanden, omdat dan de kade in beno22 aanzienlijk verder overstroomt dan in beno19. In S6000 stroomt in beide modellen de hele uiterwaard mee en wordt het verschil in kadehoogte minder relevant.

Op de Grensmaas zijn de verschillen groot voor alle afvoerniveaus, ook bij de lage afvoeren S50 en S250. Op dit traject is, onder andere door het hoogwater van juli 2021, de bodemligging in het zomerbed sterk veranderd. Vooral tussen rkm 34 en 39 ligt de zomerbedbodem in beno22 veel lager dan in beno19 (tot orde 5 m). Hier is het doorstroomde gebied ook bij hoge afvoeren vrij smal en is de invloed van de zomerbedverlaging voor alle doorgerekende afvoerniveaus te zien in de waterstandsverschillen. Bij de twee laagste afvoeren loopt het waterstandsverschil bij rkm 34, waar het verschil in zomerbedbodem weer klein is, terug. Bij S250 stroomt in beno19 bovendien de “omstroming” van Maasband mee vanwege de hogere waterstanden, en in beno22 niet. Bij S3200 begin in beno19 ook de linker uiterwaard mee te stromen, in beno22 begint dat vanwege de lagere waterstanden pas later. Ook zijn er veranderingen aangebracht in het winterbed die de waterstanden beïnvloeden (uiterwaard bij Bosscherveld – rkm 14-17, uiterwaard bij Borgharen – rkm 17-19, binnenbocht bij Meers- rkm 31-33, plashoogtes in de Maasbeemder Greend – rkm 35, Berg aan de Maas/Nattenhoven – rkm 39-41, Negenoord/Kerkeweerd – rkm 42,5, Bichterweerd – rkm 43-46, Vissersweert – rkm 49-50). Dit is te zien in Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6.

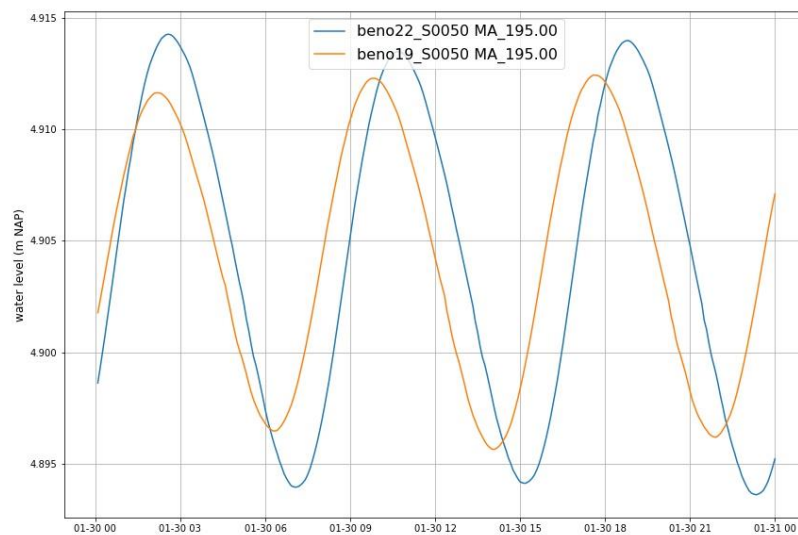
Tussen rkm 47 en 55 zijn de waterstanden vooral voor de hogere afvoeren (S250 en hoger) aanzienlijk toegenomen ten opzichte van het beno19-model, met een maximum van 63 cm. Dit komt omdat in beno19 de maatregelen Contelmo, Heerenlaak en Elerweerd al waren meegenomen, maar zonder de kunstwerken in de inlaten en uitlaten toe te voegen als “general structure”. Er stroomde daarom in beno19_6 veel te veel water door deze uiterwaarden. Dit is in beno22_6 gecorrigeerd. De afvoeren door de kunstwerken zijn nu in dezelfde orde grootte als in een 5^e generatie WAQUA-model, en de waterstandsverschillen zijn geverifieerd.



Figuur 1 Waterstandsverschillen (last25) tussen beno22 en beno19 voor de stationaire berekeningen (S).



Figuur 2 Verloop van de kruinhoogte van stuw Grave (blauw) en de waterstanden bij LMW-stations Mook en Grave boven (geel en groen) in de modellen beno22 (links) en beno19 (rechts) voor de laatste 24 uur van de S50-berekeningen.



Figuur 3 Waterstand bij rkm 195 in beno22 (blauw) en beno19 (oranje) in de laatste 24 uur van de S50-berekening. De "last25"-waterstand wordt bepaald over het laatste uur. Het resultaat is dus afhankelijk van de fase van de waterstandsschommelingen.



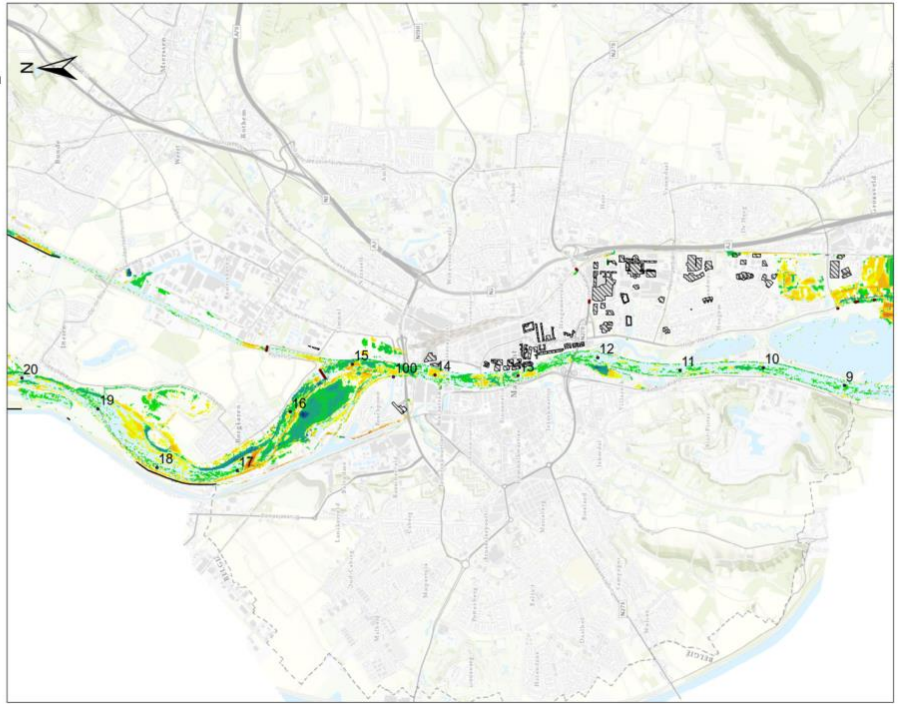
- Flow blocking polygons
- Flow blocking lines
- Kunstwerken

Beno22 - beno19 bodem

- > 5 m
- + 2 tot 5 m
- + 1 tot 2 m
- + 0,5 tot 1 m
- + 0,2 tot 0,5 m
- + 0,1 tot 0,2 m
- 0,1 tot 0,1 m
- 0,2 tot - 0,1 m
- 0,5 tot - 0,2 m
- 1 tot - 0,5 m
- 2 tot - 1 m
- 5 tot - 2 m
- < -5 m

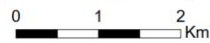
Deze vershikaart toont:
Beno22 hoogtemodel min
Beno19 hoogtemodel

Ligging van de beno22 bodem t.o.v. de beno19 bodem



Deltares 2

Figuur 4 Verschillen in bodemhoogte tussen rkm 9 en 20 (beno22-beno19).



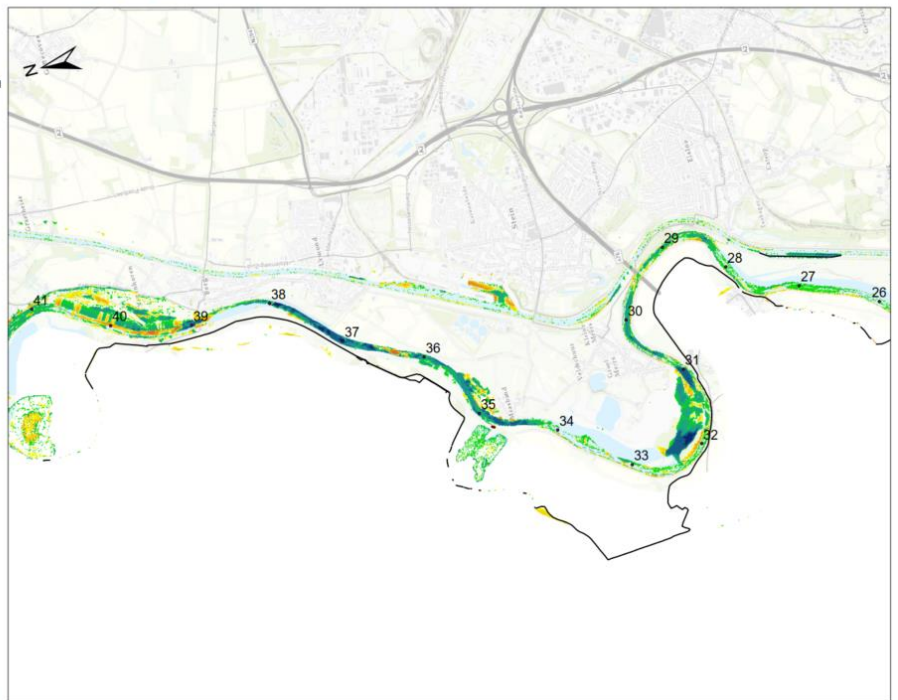
- Flow blocking polygons
- Flow blocking lines
- Kunstwerken

Beno22 - beno19 bodem

- > 5 m
- + 2 tot 5 m
- + 1 tot 2 m
- + 0,5 tot 1 m
- + 0,2 tot 0,5 m
- + 0,1 tot 0,2 m
- 0,1 tot 0,1 m
- 0,2 tot - 0,1 m
- 0,5 tot - 0,2 m
- 1 tot - 0,5 m
- 2 tot - 1 m
- 5 tot - 2 m
- < -5 m

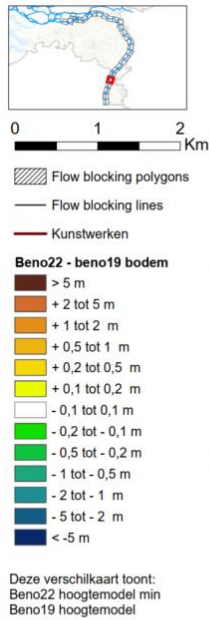
Deze vershikaart toont:
Beno22 hoogtemodel min
Beno19 hoogtemodel

Ligging van de beno22 bodem t.o.v. de beno19 bodem

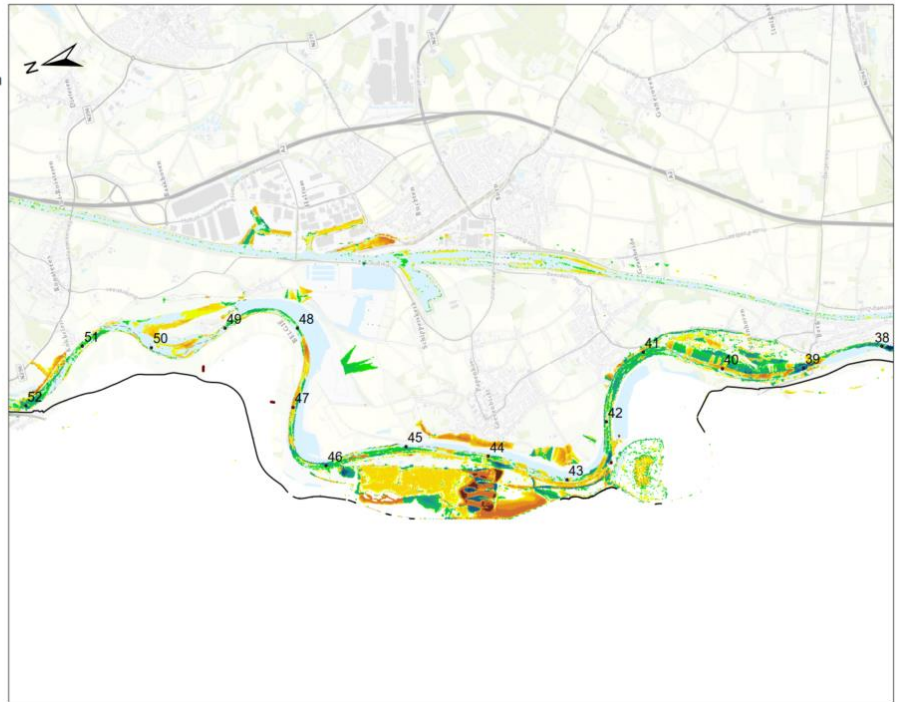


Deltares 4

Figuur 5 Verschillen in bodemhoogte tussen rkm 26 en 41 (beno22-beno19).



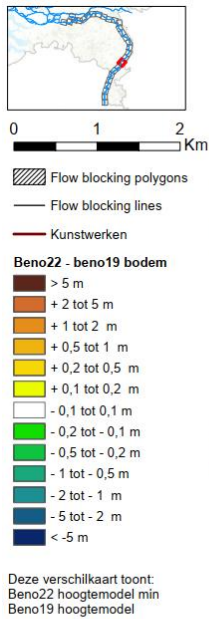
Ligging van de beno22 bodem t.o.v. de beno19 bodem



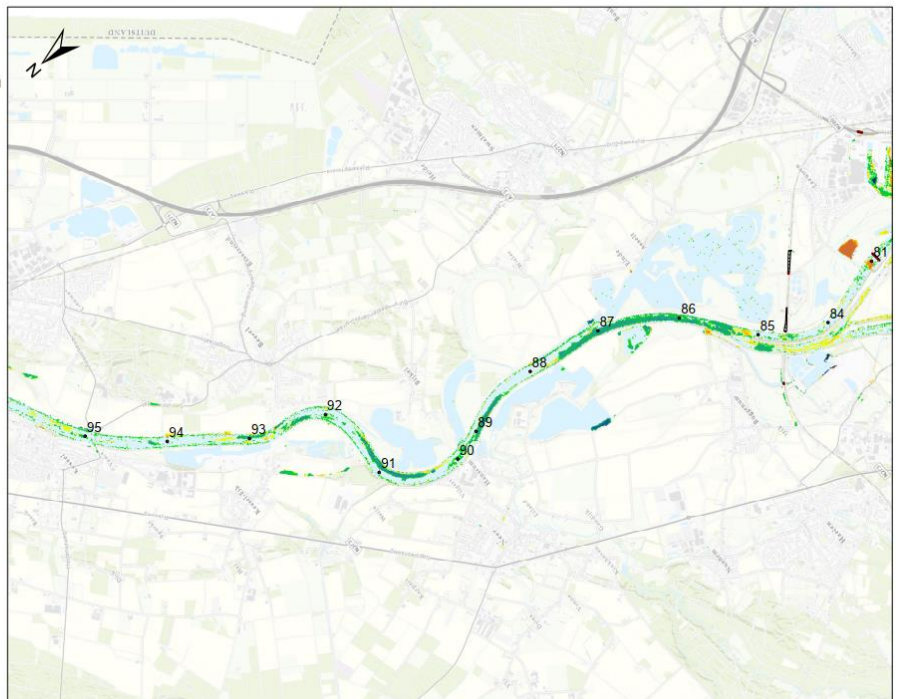
Deltares

5

Figuur 6 Verschillen in bodemhoogte tussen rkm 38 en 52 (beno22-beno19).



Ligging van de beno22 bodem t.o.v. de beno19 bodem



Deltares

9

Figuur 7 Verschillen in bodemhoogte tussen rkm 81 en 95 (beno22-beno19)

3.1.2 Dynamische berekeningen

Figuur 8 presenteert de max13-waterstandsverschillen op de as van de rivier tussen de modelschematisaties beno19_6-v1a en beno22_6-v2a voor de dynamische (D) berekeningen uit

Tabel 1. De variatie en pieken in de waterstandsverschillen zijn over het algemeen vergelijkbaar met die in de bijbehorende stationaire berekeningen. Het verloop van het waterstandsverschil van D1300 wijkt echter vanaf rkm 135 wat af en is vrij grillig.

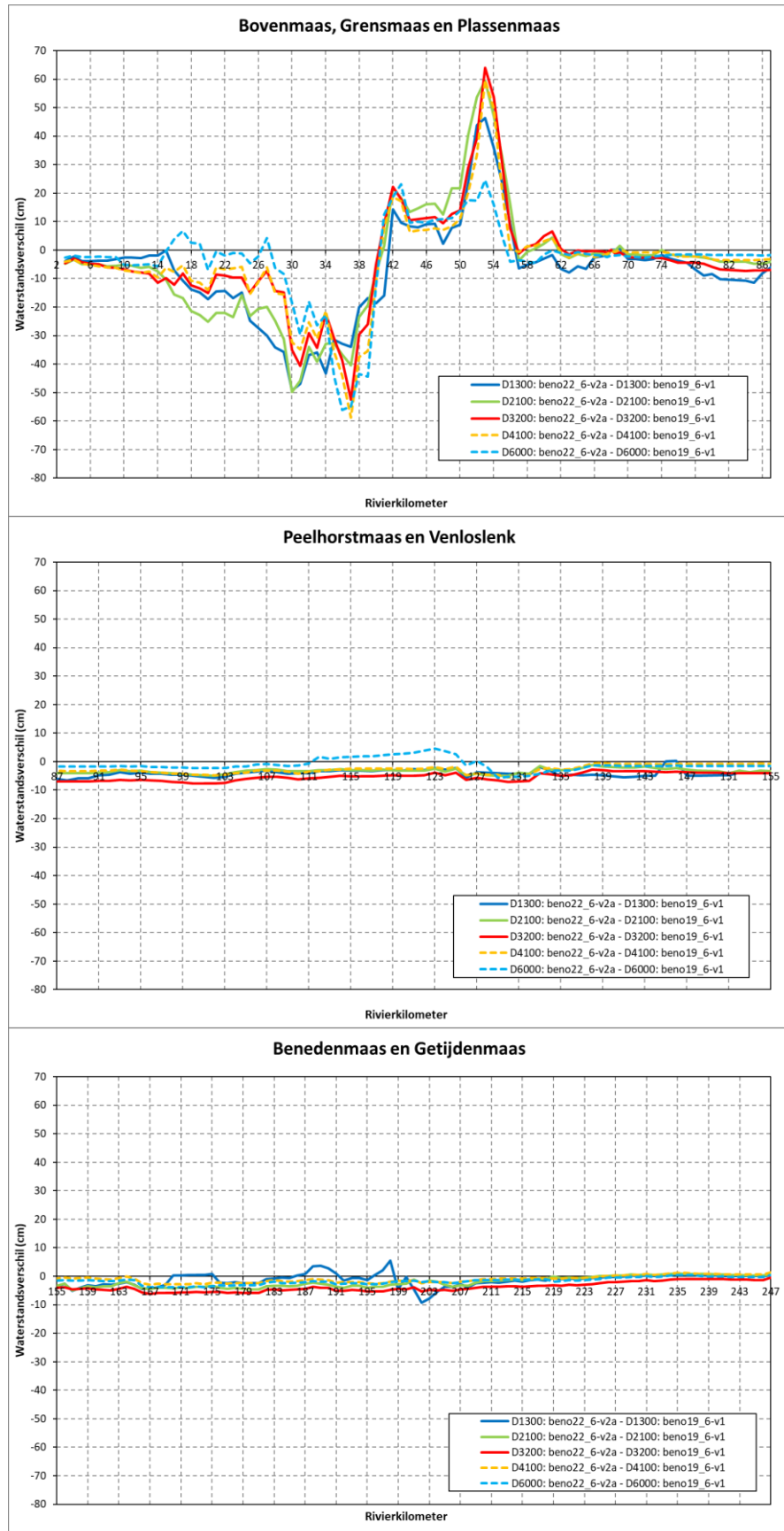
In D1300 zit de sturing van stuw Lith tijdelijk op de grens tussen het hoge (streefpeil 3,95 m +NAP bij Lith boven) en middelste waterstandsbereik (streefpeil 5,40 m +NAP bij Megen dorp), waarvoor verschillende streefpeilen zijn gedefinieerd op verschillende locaties. Na de hoogwaterpiek, als de afvoer weer valt, begint de sturing in beno22 en beno19 heen en weer te springen tussen deze condities, waardoor de kruin steeds op en neer beweegt (Figuur 9). De sturing wordt instabiel. Dit werkt door op de waterstanden bovenstrooms van de stuw (Figuur 10). Bij stuw Grave is dit in mindere mate ook te zien (Figuur 10).

De instabiliteit van de stuwsturing was ook al in de 5^e-generatiemodellen in WAQUA een probleem. Dat is toen opgelost door de aansturing uit te breiden met veel meer waterstandsbereiken en te zorgen dat de transitie tussen de drie streefpeilen vloeiend wordt (Agtersloot, 2012). Er wordt aanbevolen dat ook in de 6^e-generatiemodellen te doen.

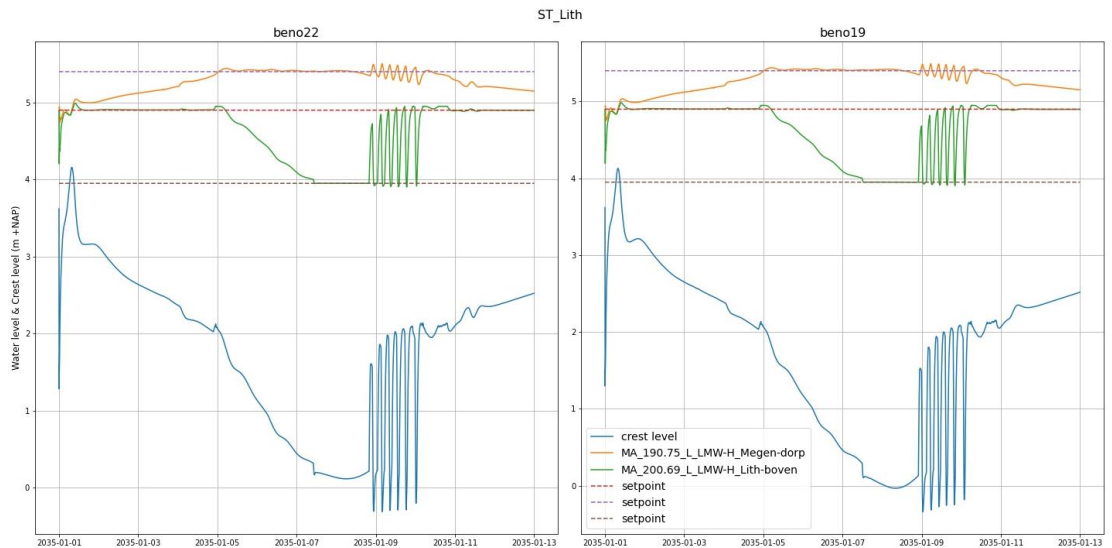
Voor de stuwen Sambeek, Grave en Lith geldt bovendien dat in een hoogwatersituatie met piekafvoeren rond de 1.300 m³/s, waar de stuwsturing nog net actief is, de maximale waterstand niet in het hele stuwspan representatief is voor de passage van de hoogwaterpiek. In de benedenstroomse delen van de stuwspanen wordt de hoogste waterstand (max13) dan namelijk niet bij passage van de piek bereikt, maar tijdens lagere afvoeren (Figuur 10). Tussen ongeveer rkm 145 (bovenstrooms van stuw Sambeek) en LMW-station Lith dorp (rkm 202, benedenstrooms van stuw Lith) geven de max13-waterstandsverschillen tussen beno19 en beno22 voor de D1300-berekening dus geen goed beeld en moeten deze niet meegenomen worden in de beoordeling van de modellen. De grilligheid van het waterstandsverschil is te verklaren door dit effect en de instabiliteit in de stuwbeving.

Ook rond rkm 80 is er een groot waterstandsverschil tussen beno19 en beno22 bij de D1300-afvoer. Er is niet duidelijk hoe dit wordt veroorzaakt.

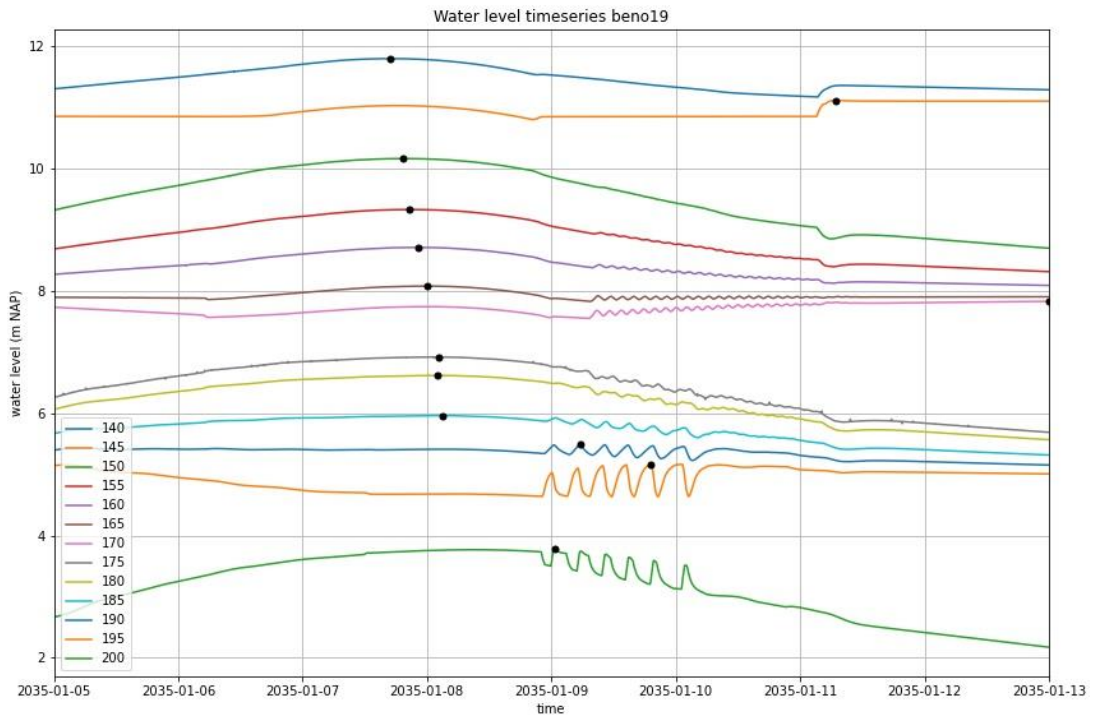
Het waterstandsverschil voor D3200 ligt vanaf ongeveer rkm 80 (Roermond) opvallend lager dan voor de andere afvoeren. Dit komt doordat in het beno22-model vanaf die locatie ongeveer 25 m³/s minder afvoer door het beno22-model stroomt dan door beno19 (Figuur 11), omdat de linker uiterwaard in beno19 significant minder sterk instroomt dan in beno22 (Figuur 12).



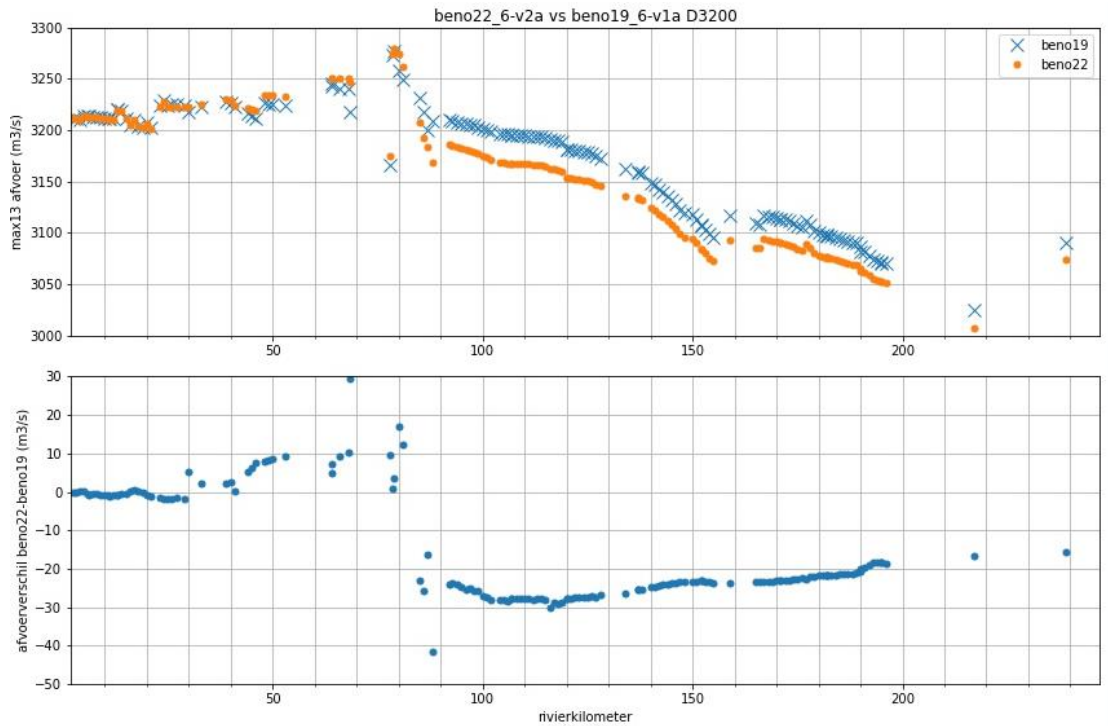
Figur 8 Waterstandsverschillen (max13) tussen beno22 en beno19 voor de dynamische berekeningen (D).



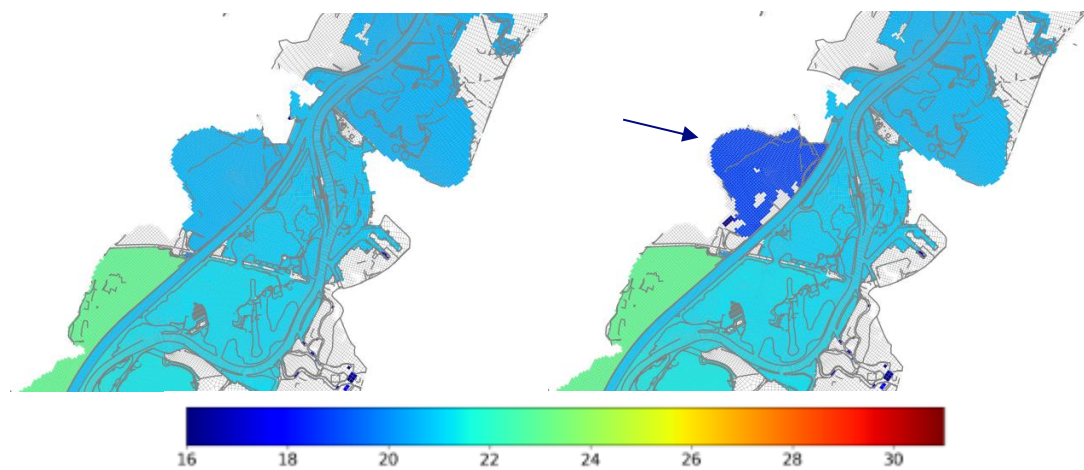
Figuur 9 Kruinhoogte (blauw) van stuw Lith en waterstand bij Lith boven (groen) en Megen dorp (oranje) in de berekening D1300. De horizontale stippellijnen geven de streefpeilen voor drie waterstands bereiken weer, waarbij de twee lagere peilen voor Lith boven gelden en de hoogste voor Megen dorp. Tussen 1/9/2035 en 1/10/2035 springt de stuw tussen twee streefpeilen heen en weer. Dat is ook te zien aan de waterstand bij Lith boven.



Figuur 10 Waterstanden op locaties tussen rkm 140 en 200 (D1300 beno19). Zwarte stippels = maximale waterstand, rond dit tijdstip wordt de max13-waterstand bepaald. De situatie in beno22 is vergelijkbaar. De stuwen liggen bij de volgende rivierkilometers: Sambeek rkm 146,6; Grave rkm 175,7; Lith rkm 200,9.



Figuur 11 Max13 afvoer beno22 en beno19 D3200.



Figuur 12 Waterstandskaart (max13, in m+NAP) voor de berekening D3200 bij rkm 75-87 (links: beno22, rechts: beno19).

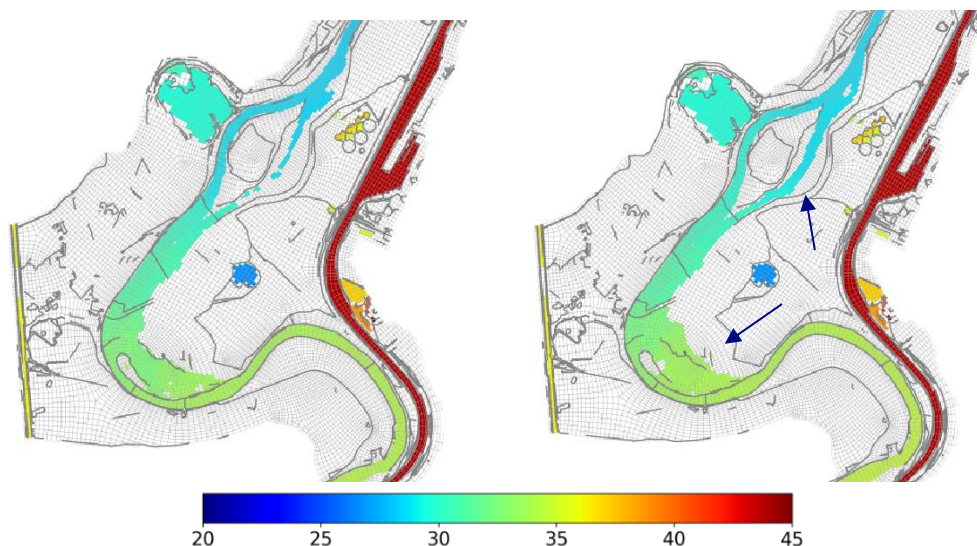
3.2 Inundatiepatronen

Naast de waterstanden op de as van de rivier zijn 2D waterstandskarten met elkaar vergeleken om verschillen in de inundatie van de uiterwaarden tussen beno19 en beno22 te analyseren. De figuren in de volgende paragrafen geven de waterstanden voor beide modellen weer⁴, waarbij voor de stationaire berekeningen de last25-waterstand gebruikt wordt en voor de dynamische berekeningen de max13-waterstand.

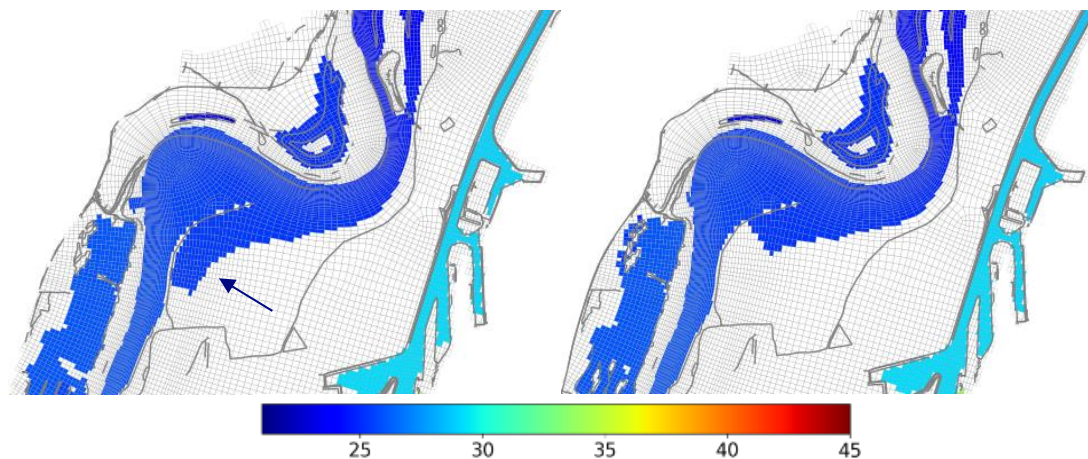
⁴ In D-HYDRO wordt bij droge cellen de bodemhoogte weggeschreven als waterstand. Daarom zijn alleen cellen met minstens 5 mm waterdiepte zijn gepresenteerd in de figuren.

3.2.1 Stationaire berekeningen

Bij de laagste afvoer, **S50**, stroomt alleen het zomerbed mee en zijn er geen duidelijke verschillen te herkennen in de omvang van het natte gebied. In de **S250**-berekening liggen de waterstanden hoger, wat zich in de bocht van Meers en in de geul achter Maasband in kleine verschillen in het natte gebied uit. Door de lagere waterstanden op de Grensmaas is het natte gebied in beno22 kleiner dan in beno19 (Figuur 13), dit wordt onder andere veroorzaakt door een aanzienlijk lager zomerbed in beno22 (zie paragraaf 3.1.1). Ook ten noorden van Grevenbicht (Koeweide) is een klein verschil in overstromingsgebied te herkennen (Figuur 14). Hier zijn de waterstanden in beno22 juist hoger dan in beno19 vanwege het toevoegen van de nieuwe kunstwerken bij maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo.



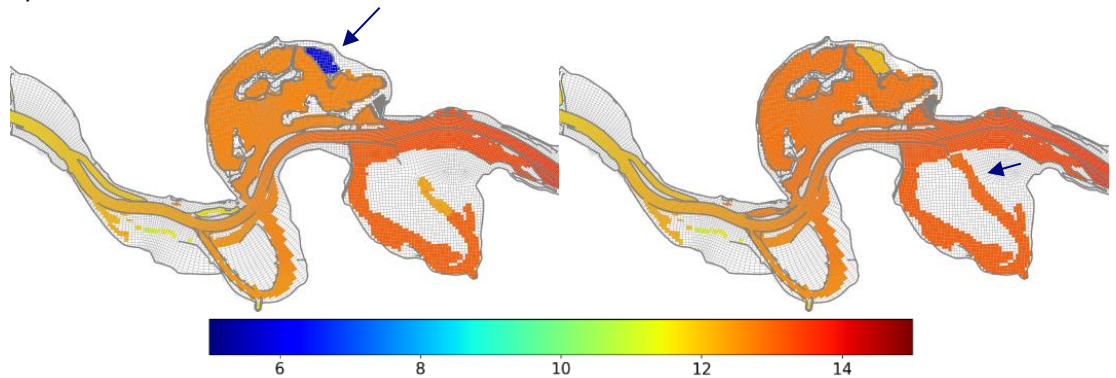
Figuur 13 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S250 bij rkm 32 (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 14 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S250 bij rkm 46 (links: beno22, rechts: beno19).

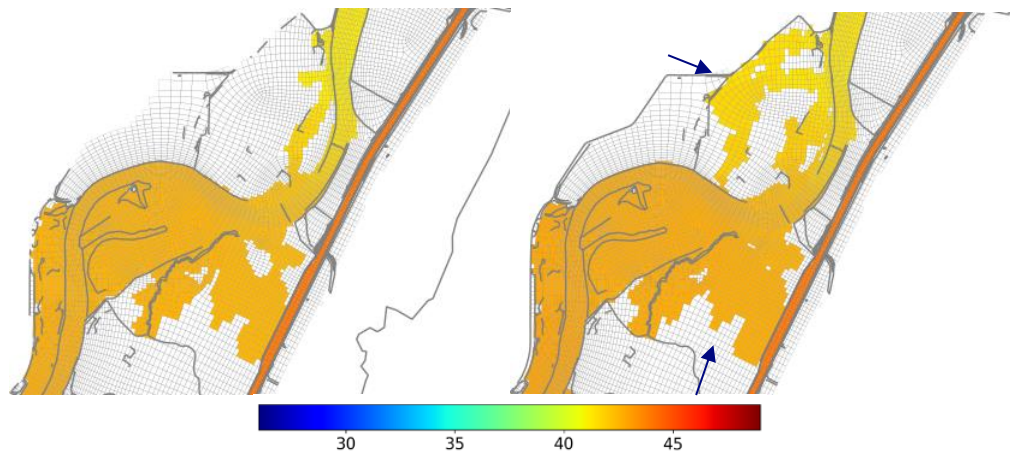
In **S1300** beginnen ook uiterwaarden onder te lopen, maar de verschillen in de inundatiegebieden blijven beperkt tot kleine oppervlaktes bij Megen en aan de overkant bij de Gouden Ham (Figuur 15).

Bij de Gouden Ham is weliswaar het inundatievlak gelijk, maar in beno22 blijft de waterstand op het niveau van het initiële waterstandsveld, omdat de kade hier niet overstroomt.

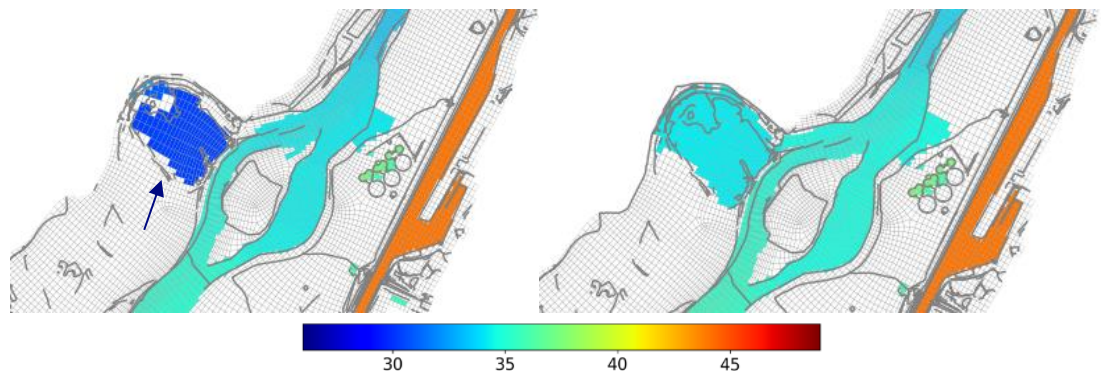


Figuur 15 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S1300 bij rkm 190 (links: beno22, rechts: beno19).

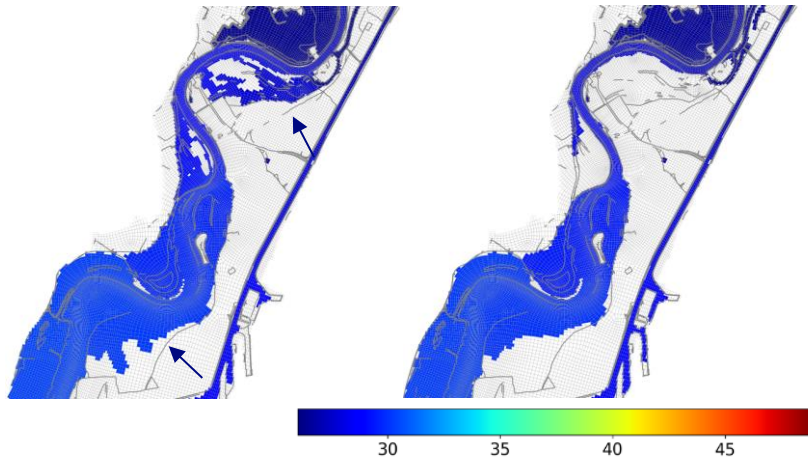
Bij **S2100** stromen er vanwege de lagere waterstanden op de Grensmaas enkele uiterwaarden in beno22 minder in dan in beno19 (Figuur 16, Figuur 17). Ook benedenstrooms van de Grensmaas liggen de waterstanden in beno22 over het algemeen enkele cm lager dan in beno19 en stromen uiterwaarden iets minder in (Figuur 19). Rond rkm 50 zijn de waterstanden in beno22 juist hoger dan in beno19 vanwege de nieuwe kunstwerken bij Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo, waardoor de uiterwaarden sterker onderlopen (Figuur 18).



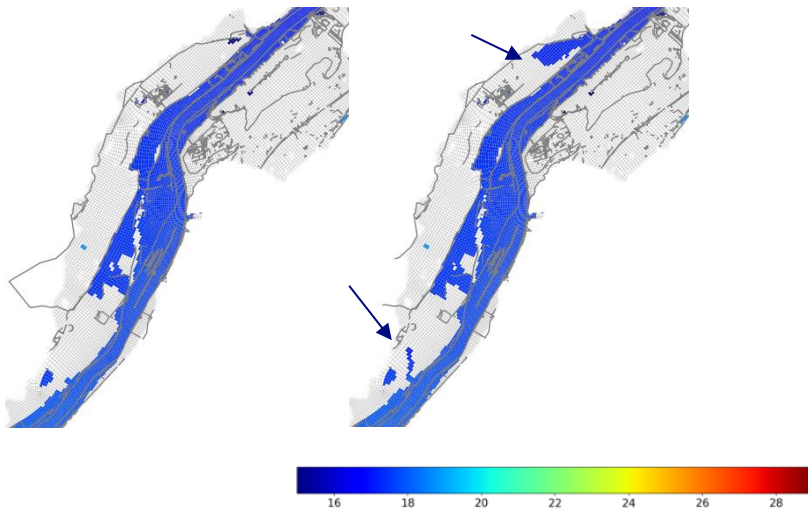
Figuur 16 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S2100 bij rkm 22-24 (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 17 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S2100 bij rkm 35 (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 18 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S2100 bij rkm 46-56 bij de nieuwe kunstwerken (links: beno22, rechts: beno19).

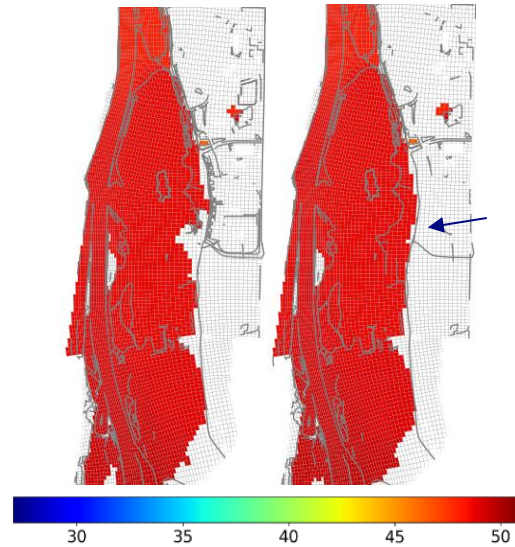


Figuur 19 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S2100 bij rkm 99 en 105 (links: beno22, rechts: beno19).

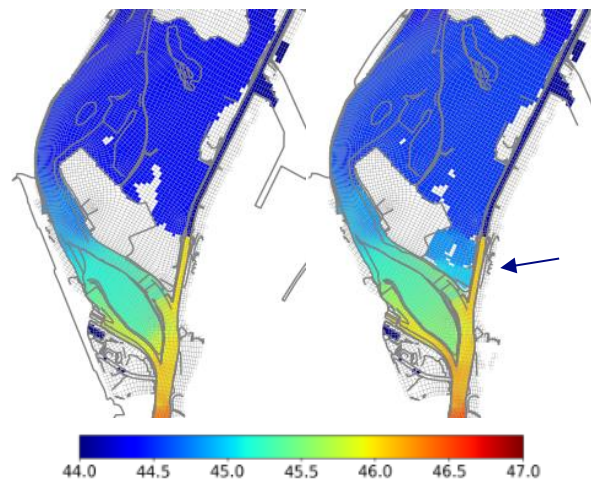
In de **S3200**-berekening zijn de volgende verschillen te zien:

- Bij het grindgat Oost-Maarland aan de oostkant ontstaan er verschillen vanwege een aanpassing aan de winterbedhoogte (grindgat) en vanwege de lagere waterstanden in beno22 (Figuur 20). Ook in het gebied tussen de Maas en het Julianakanaal bij keersluis Limmel ontstaat er een verschil door het verschil in waterstanden (Figuur 21).
- Op de Grensmaas, benedenstrooms van de bocht bij Meers, is het zomerbed door het hoogwater van juli 2021 sterk geërodeerd (meerdere meters). Daardoor zijn de waterstanden in beno22 lager dan in beno19 en stromen de uiterwaarden minder ver in (Figuur 22).
- Vanwege de nieuwe kunstwerken stroomt er in beno22 minder water door Contelmo, en daarom loopt de uiterwaard daar minder onder (Figuur 23). Bij rkm 62 stromen de uiterwaarden in beno22 iets verder in vanwege een aanpassing aan dijkkring Stevensweert (Figuur 24). De kruinhoogten zijn aangepast conform de laatste gegevens van het Waterschap en liggen in beno22 lager dan in beno19.

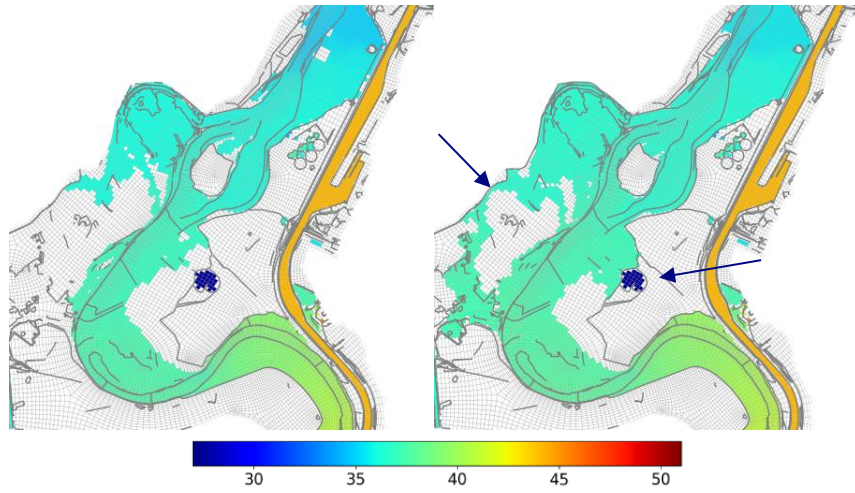
- Bij rkm 68z stroomt de Boschmolenplas in beno22 net niet in, in beno19 daarentegen wel (Figuur 25). Bij rkm 77 aan de rechterkant stroomt de uiterwaard in beno22 ondanks de lagere waterstanden verder in dan in beno19 (ook Figuur 25). Dit komt doordat er hier de kadehoogtes zijn geactualiseerd, waardoor de kade deels ca. 70 cm lager is geworden.
- Bij rkm 109-116 overstroomt er in beno22 de rechter uiterwaard, in beno19 niet (Figuur 26). Dat komt door aanpassingen aan de kades van dijkkring Venlo Velden, de kruinhoogten zijn aangepast conform de laatste gegevens van het Waterschap en liggen in beno22 lager dan in beno19.



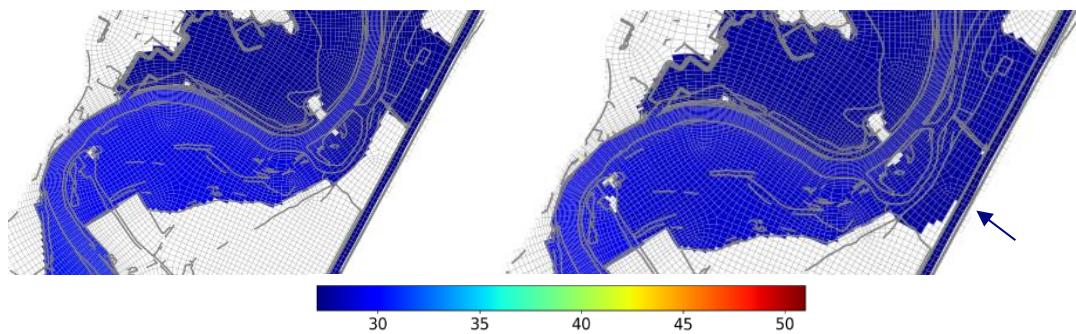
Figuur 20 Waterstandskartaar (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 9 Grindgat Oost-Maarland (links: beno22, rechts: beno19).



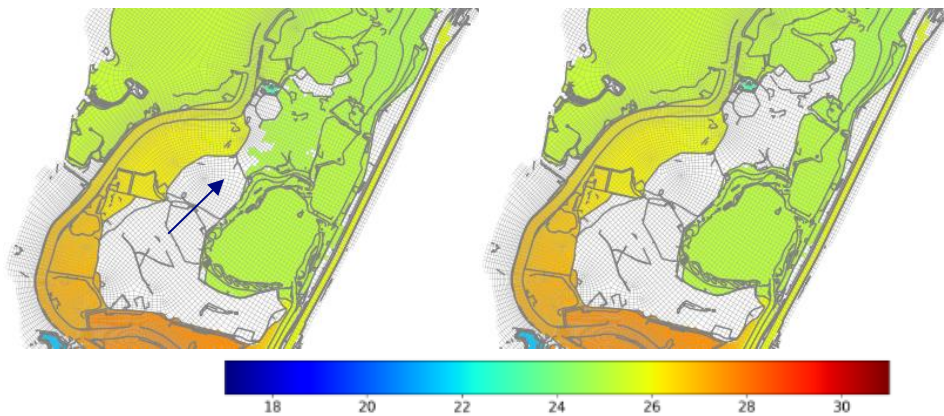
Figuur 21 Waterstandskartaar (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 15-16 (links: beno22, rechts: beno19).



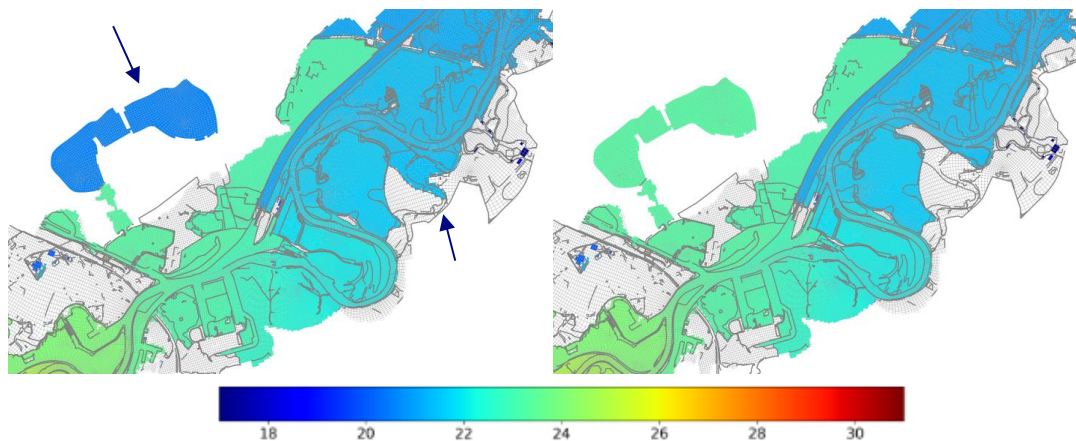
Figuur 22 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 32-33 (links: beno22, rechts: beno19).



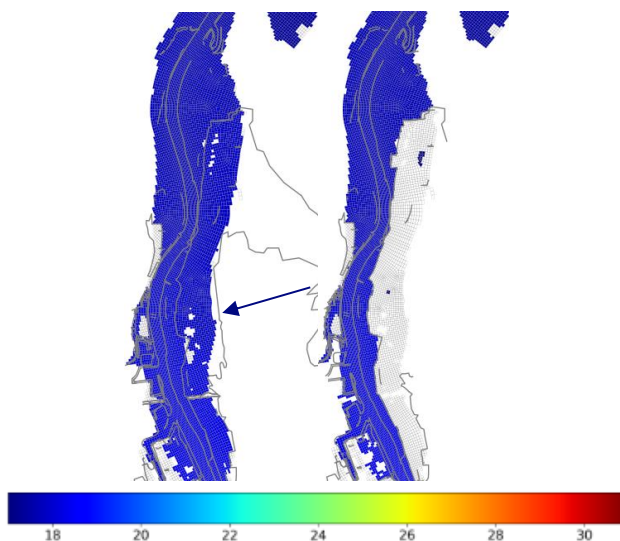
Figuur 23 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 55 bij Contelmo (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 24 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 62 (links: beno22, rechts: beno19).

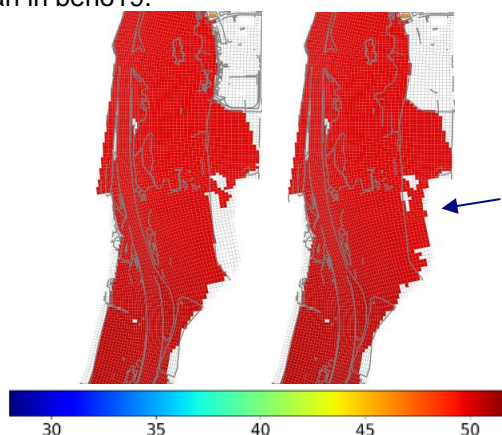


Figuur 25 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 68z Boschmolenplas/De Lange Vlieter en rkm 77 (links: beno22, rechts: beno19).

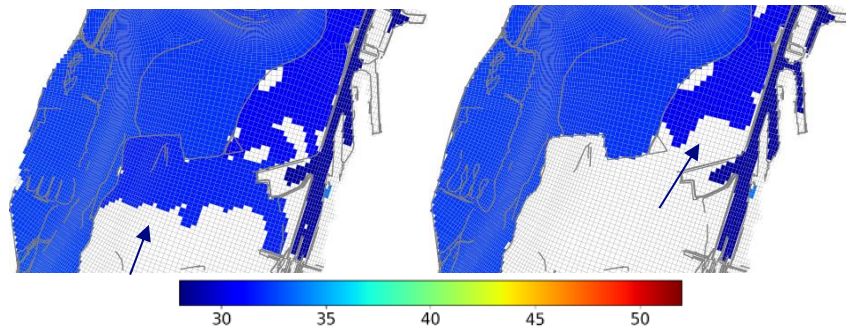


Figuur 26 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S3200 bij rkm 109-116 (links: beno22, rechts: beno19).

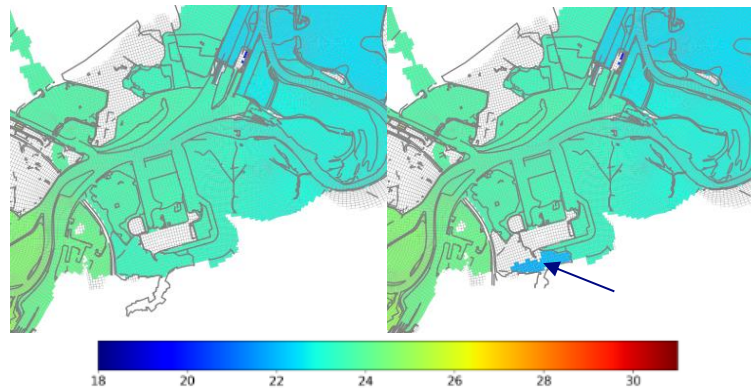
Bij **S4100** zijn ook weer kleine verschillen te zien bij rkm 9 (grindgat Oost-Maerland), bij rkm 68z en bij Ooijen-Wanssum, de redenen zijn hierboven al gegeven (Figuur 27, Figuur 29, Figuur 30). Daarnaast zijn er verschillen te zien bij rkm 45-50 (Figuur 28). Ook hier is in beno22 de kade lager dan in beno19.



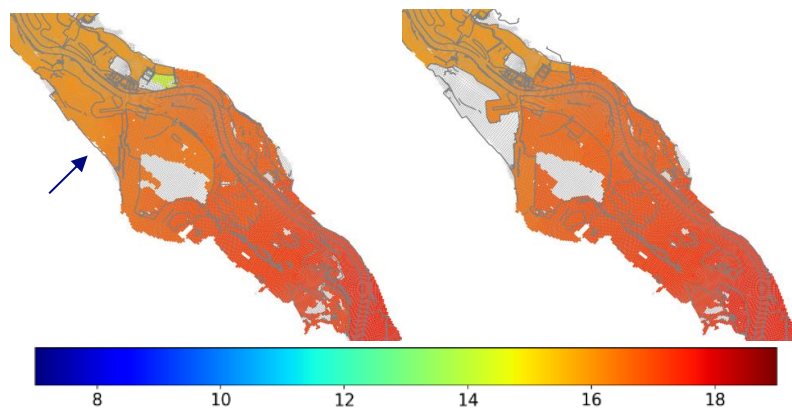
Figuur 27 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S4100 bij rkm 9 Grindgat Oost-Maerland (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 28 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S4100 bij rkm 45-50 (links: beno22, rechts: beno19).

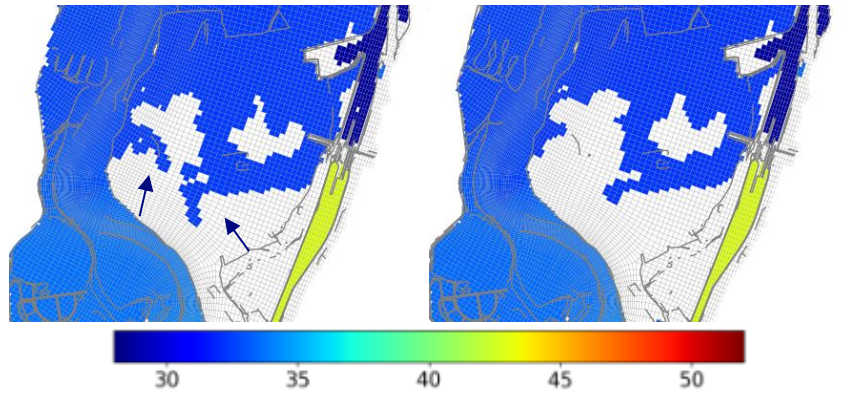


Figuur 29 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S4100 bij rkm 68z (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 30 Waterstandskaat (last25, in m+NAP) voor de berekening S4100 bij rkm 133-134 Ooijen-Wanssum (links: beno22, rechts: beno19).

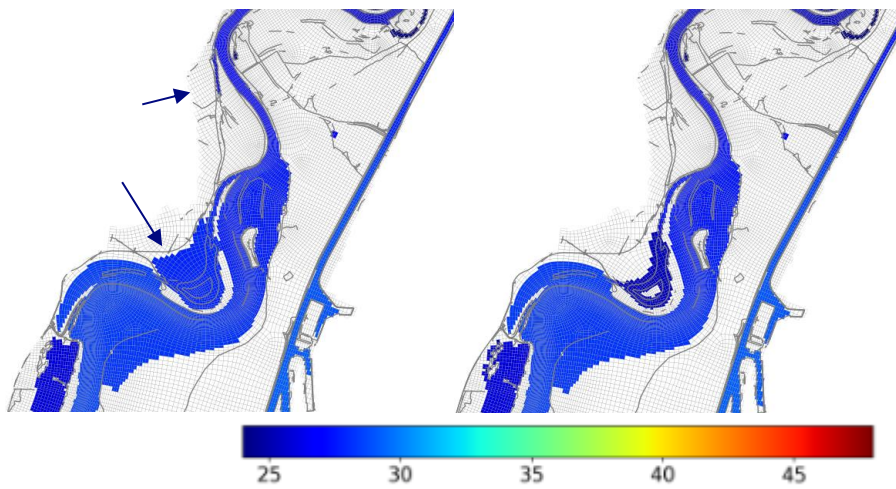
Bij **S6000** zijn de uiterwaarden overal ondergelopen en treden alleen bij rkm 50 heel kleine verschillen in inundatieomvang op (Figuur 31).



Figuur 31 Waterstandskaart (last25, in m+NAP) voor de berekening S6000 bij rkm 50 (links: beno22, rechts: beno19).

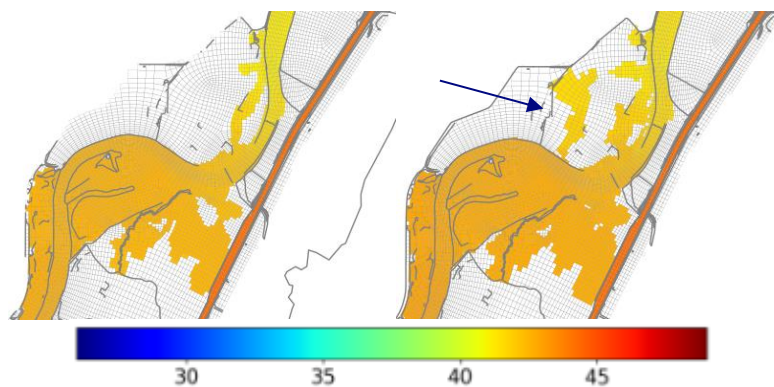
3.2.2 Dynamische berekeningen

Bij **D1300** liggen de waterstanden bij rkm 47-49 en rkm 52 vanwege de nieuwe kunstwerken aanzienlijk hoger dan in beno19, waardoor de uiterwaarden iets verder inlopen (Figuur 32).

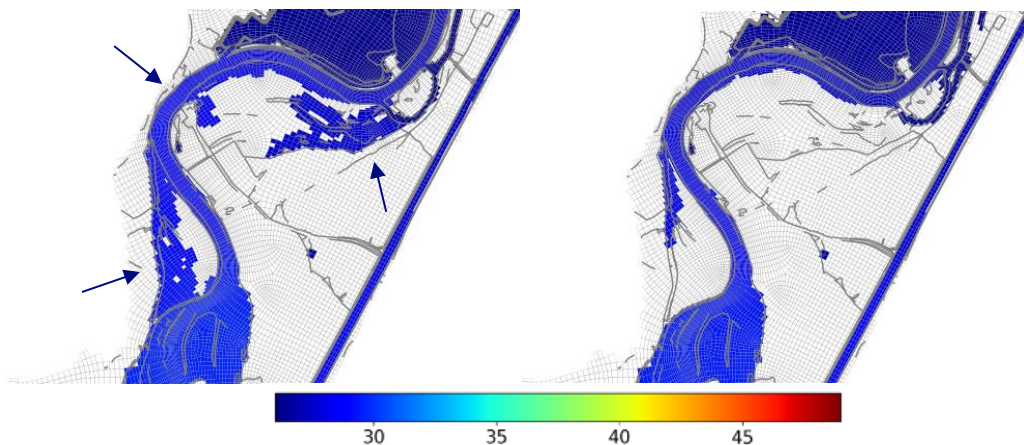


Figuur 32 Waterstandskaart (max13, in m+NAP) voor de berekening D1300 bij rkm 47-49 en 52 (links: beno22, rechts: beno19).

Bij **D2100** zijn er verschillen bij rkm 22 (Figuur 33) en bij rkm 52-55 (Heerenlaak en Contelmo). Deze zijn veroorzaakt door de lagere waterstanden bovenstrooms op de Grensmaas en de hogere waterstanden rond rkm 50 in beno22.

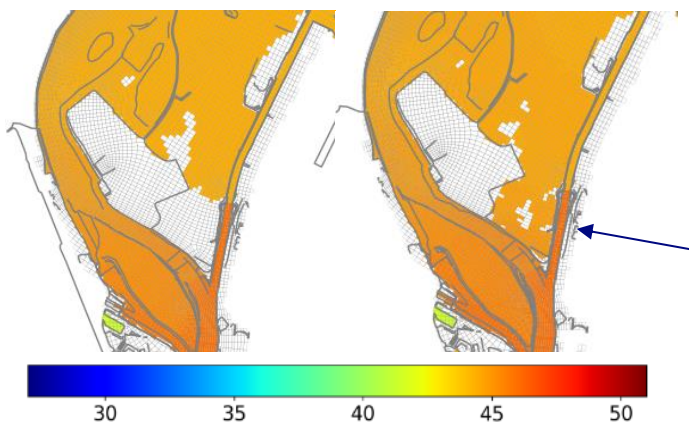


Figuur 33 Waterstandskaart (max13, in m+NAP) voor de berekening D2100 bij rkm 22 (links: beno22, rechts: beno19).

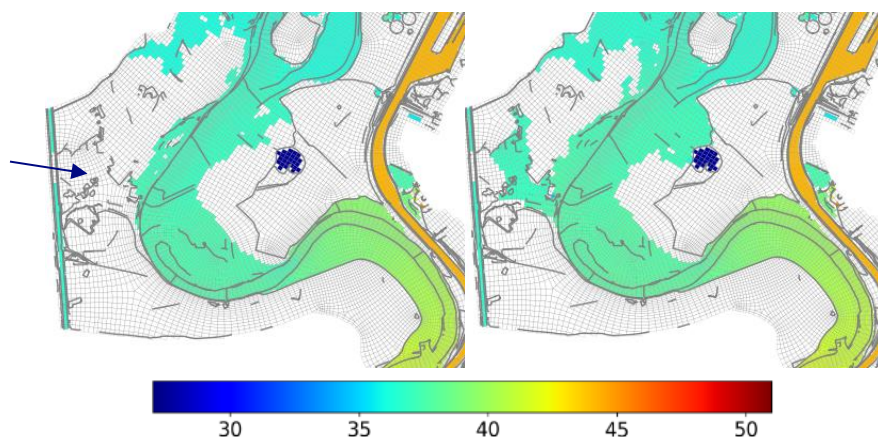


Figuur 34 Waterstandskaat ($max13$, in $m+NAP$) voor de berekening D2100 bij rkm 52-55 vanwege Herenlaak en Contelmo (links: beno22, rechts: beno19).

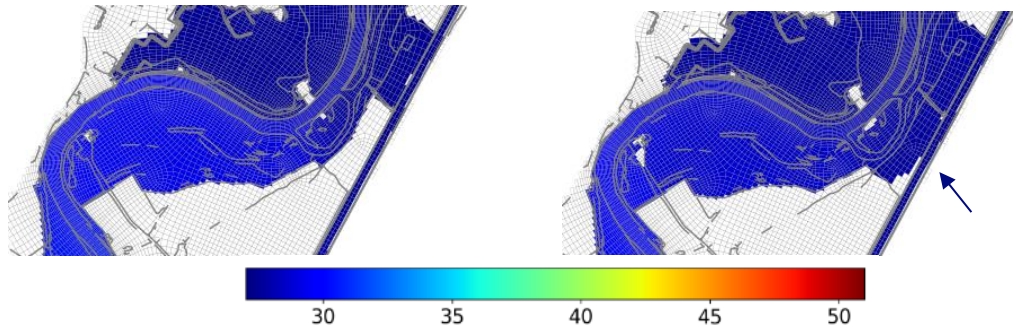
Bij **D3200** treden kleinere verschillen op bij rkm 16 (Figuur 35), rkm 32 (Figuur 36), rkm 55 (Contelmo, Figuur 37), en rkm 80 (Figuur 38). De redenen zijn in de vorige paragrafen al uitgelegd.



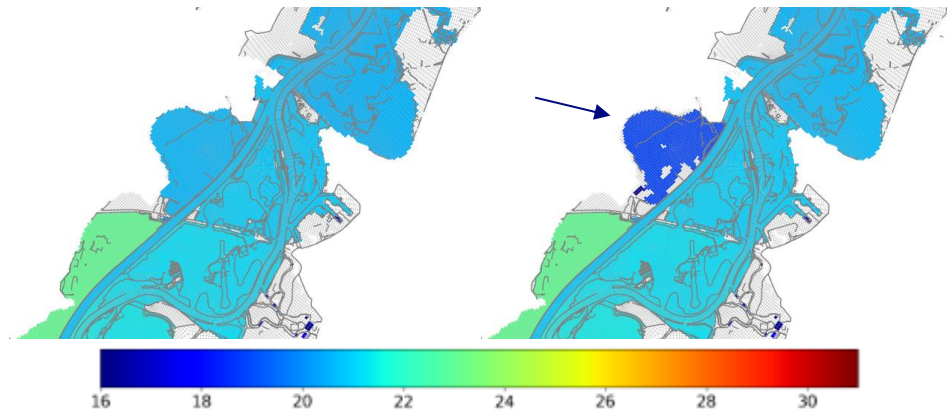
Figuur 35 Waterstandskaat ($max13$, in $m+NAP$) voor de berekening D3200 bij rkm 16 (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 36 Waterstandskaat ($max13$, in $m+NAP$) voor de berekening D3200 bij rkm 32 (links: beno22, rechts: beno19).

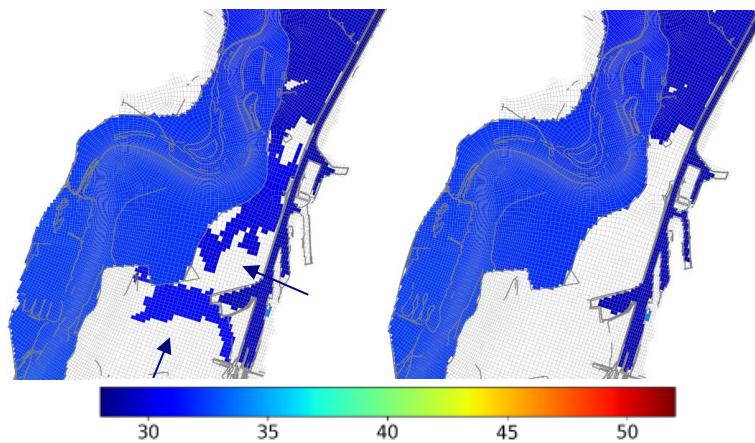


Figuur 37 Waterstandskaat (max13, in m+NAP) voor de berekening D3200 bij rkm 55 bij Contelmo (links: beno22, rechts: beno19).

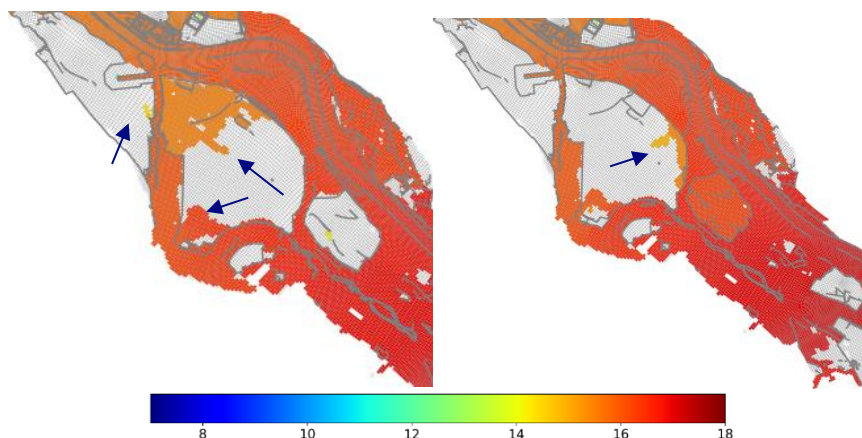


Figuur 38 Waterstandskaat (max13, in m+NAP) voor de berekening D3200 bij rkm 75-87 (links: beno22, rechts: beno19).

Bij **D4100** zien we weer verschillen bij Ooijen-Wanssum (Figuur 40) en stroomt de rechteruiterwaard in de bocht bij Roosteren in beno22 in maar in beno19 niet (Figuur 39), hier is de kade in beno22 hoger dan in beno19.

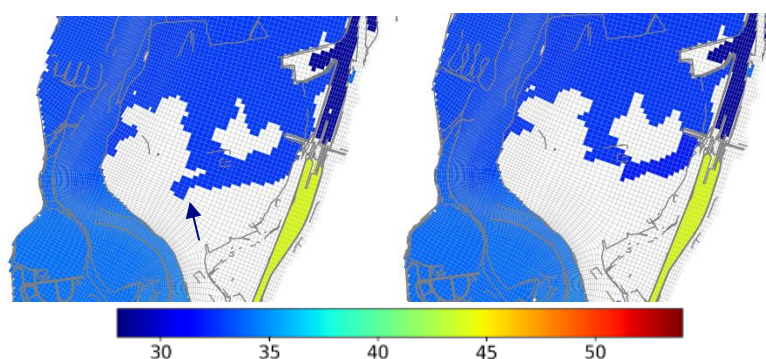


Figuur 39 Waterstandskaat (max13, in m+NAP) voor de berekening D4100 bij rkm 45-48 (links: beno22, rechts: beno19).



Figuur 40 Waterstandskaat (max13, in m+NAP) voor de berekening D4100 bij rkm 123-136 Ooijen-Wanssum (links: beno22, rechts: beno19).

Net als in de stationaire berekeningen treden bij **D6000** alleen nog kleine verschillen in inundatieoppervlak op bij rkm 50 (Figuur 41).



Figuur 41 Waterstandskaat (max13, in m+NAP) voor de berekening D6000 bij rkm 50 (links: beno22, rechts: beno19).

3.3 Rekeningtijd

Tabel 3 en Tabel 4 tonen de rekeningtijden voor de stationaire en dynamische berekeningen. De stationaire berekeningen zijn met goed ingespeelde initiële condities (zie paragraaf 2.3) gedraaid voor een periode van 10 dagen en met 4 partities. De afvoergolven van de dynamische berekeningen duren 12 dagen. De berekeningen duren tussen 5 en 16 uur, ze kunnen dus in één dag of nacht gedraaid worden.

De stationaire berekeningen voor beno22 zijn bovendien herhaald met dezelfde initiële condities en rekenperiode als gebruikt voor de berekeningen die in 2021 voor beno19 zijn uitgevoerd (Van der Deijl et al., 2022). Dit om de rekeningtijden te kunnen vergelijken met de berekeningen met het voorgaande beno-model, beno19. Bij gebruik van hetzelfde aantal partities en hetzelfde type rekennodes zijn de rekeningtijden van beno19 en beno22 vergelijkbaar (Tabel 5). Alleen de berekening S2100 duurt met beno19 langer dan met beno22. Er is niet nader uitgezocht wat de reden hiervoor is. Waarschijnlijk heeft het te maken met een lokaal kleinere tijdstap vanwege de vele verschillen in de schematisatie.

Tabel 3 Rekestijden stationaire berekeningen met beno22 (met nieuwe initiële condities en verkorte rekenperiode).

	beno22 (uur)	h6 cluster type	aantal partities	simulatieperiode (dagen)
S50	4,9	normal-e3-c7	4	10
S250	7,6	normal-e3-c7	4	10
S1300	8,7	normal-e3-c7	4	10
S2100	10,8	normal-e3-c7	4	10
S3200	11,1	normal-e3-c7	4	10
S4100	12,0	normal-e3-c7	4	10
S6000	16,6	normal-e3-c7	4	10

Tabel 4 Rekestijden dynamische berekeningen met beno22 en beno19.

	beno19 (uur)	beno22 (uur)	h6 cluster type	aantal partities	simulatieperiode (dagen)
D1300	7,6	9,1	normal-e3-c7	4	12
D2100	9,8	11,1	normal-e3-c7	4	12
D3200	8,8	8,9	normal-e3-c7	4	12
D4100	12,9	12,4	normal-e3-c7	4	12
D6000	15,5	14,3	normal-e3-c7	4	12

Tabel 5 Rekestijden voor de stationaire berekeningen met de configuratie (rekenperiode en initiële condities) van beno19.

	beno19 (uur)	beno22 (uur)	h6 cluster type	aantal partities	simulatieperiode (dagen)
S50	11,2	14,5	normal-e3-c7	4	30
S250	19,9	19,6	normal-e3-c7	4	30
S1300	22,1	25,7	normal-e3-c7	4	30
S2100	31,2	23,2	normal-e3-c7	4	30
S3200	35,6	32,2	normal-e3-c7	4	30
S4100	37,6	35,5	normal-e3-c7	4	30
S6000	50,4	48,9	normal-e3-c7	4	30

3.4 Conclusies en aanbevelingen

In beno22 liggen de berekende waterstanden, behalve op de Grensmaas, enkele cm lager dan in beno19. De reden daarvoor is dat het zomerbed in beno22 langs de hele Maas structureel lager ligt dan in beno19. Over het algemeen is het waterstandsverschil kleiner naarmate de afvoer toeneemt, omdat het verschil in bodemligging met toenemende waterdiepte minder relevant wordt. Op enkele locaties zijn de afwijkingen in berekende waterstanden groter, dit is verklaarbaar door veranderingen in de uiterwaarden.

Op de Grensmaas zijn de verschillen groot voor alle afvoerniveaus, met maximaal 70 cm lagere waterstanden in beno22. Op dit traject is, onder andere door het hoogwater van juli 2021, de bodemligging in het zomerbed sterk veranderd. Daarnaast zijn op enkele locaties maatregelen in de uiterwaard genomen.

Door het toevoegen van de kunstwerken bij Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo, die in beno19 ontbreken, stijgen de waterstanden in beno22 met maximaal 63 cm rond rkm 50.

In de dynamische berekening D1300 is de hoogste berekende waterstand over een groot traject (rkm 145 (net bovenstrooms van stuw Sambeek) tot rkm 202 (Lith dorp)) niet representatief voor de passage van de hoogwaterpiek. Dit komt doordat de stuwen nog actief zijn en de stuwen Sambeek, Grave en Lith de waterstand direct bovenstrooms van de stuw bij komst van hogere afvoeren verlagen. De hoogste waterstand (max13) wordt dan niet bij passage van de piek bereikt, maar tijdens lagere afvoeren.

Verschillen in inundatiepatronen ontstaan op alle afvoerniveaus, met name de hogere vanaf S1300/D1300. Bij de lagere afvoerniveaus blijven de verschillen beperkt omdat alleen het zomerbed meestroomt. Bij het hoogste afvoerniveau (S6000/D6000) zijn de verschillen zeer beperkt omdat de uiterwaarden bijna volledig zijn ondergelopen. De verschillen voor de overige afvoerniveaus ontstaan of door de structureel lagere waterstanden in beno22 ten opzichte van beno19, of door veranderingen in de schematisatie. De verschillen zijn het grootst voor de afvoerniveaus van 3.200 m³/s en 4.100 m³/s.

De instellingen van de PID-controllers zijn blijkbaar nog niet geschikt voor de laagste doorgerekende afvoer (S50), en bij stuw Borgharen ook niet voor S250. Er wordt aanbevolen om de PID-parameters verder af te regelen of meerdere losse PID-controllers met verschillende parametersets te definiëren voor verschillende afvoerbereiken. In de dynamische berekeningen wordt de sturing van de benedenstroomse stuwen Grave en Lith instabiel bij de overgang van het ene naar het volgende streefpeil. Er wordt aanbevolen de sturing uit te breiden voor een betere transitie tussen streefpeilen. De uitgebreide sturing uit het 5^e generatie WAQUA-model kan een startpunt hiervoor zijn. Dit kan het beste ook doorgevoerd worden voor stuw Sambeek, waar ook overgangen tussen verschillende streefpeilen in de sturing zitten. Deze hebben in de voorliggende berekeningen echter niet tot problemen geleid.

Er is een bug gevonden in D-HYDRO, die voor een fout in de afvoerbilans zorgt rond bruggen en stuwen die partitiegrenzen kruisen. Dit probleem is (als work-around) verholpen door te werken met vaste partitiegrenzen die handmatig zijn aangepast om kruisingen met stuwen of bruggen te vermijden. Inmiddels is versie 2023.01 beschikbaar, waarin deze fout is opgelost. De verschillen in resultaten zijn onderzocht in De Goede en Plieger (2023). Die analyse laat zien dat er door de nieuwe versie verschillen in de waterstand op de benedenstroomse modelrand optreden. Dit komt door een verbeterde implementatie van de afhandeling van Qh-relaties in v2023.01.

4 Verfijning rooster

4.1 Methodiek

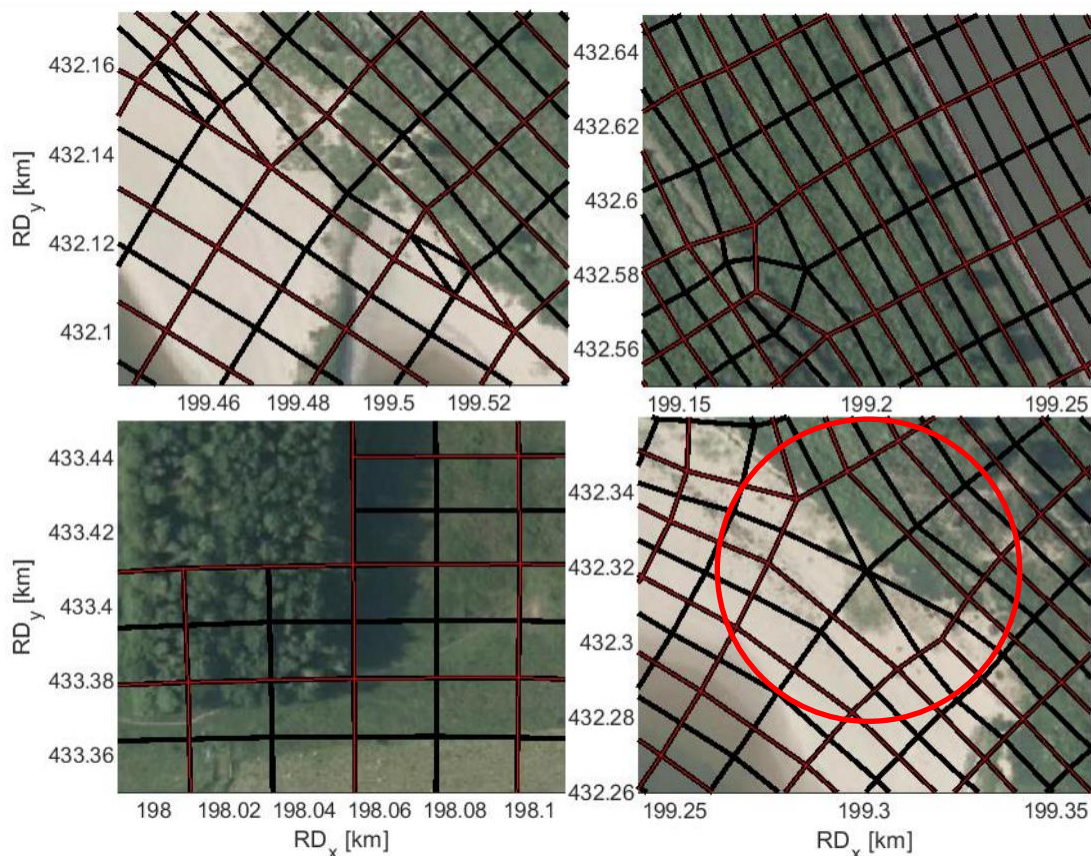
4.1.1 Automatische verfijning van het rooster

In 2020 is door Deltares onderzoek gedaan naar methoden voor automatische roosterverfijning (Laan, 2020). Twee van de vijf onderzochte methoden leken kansrijk voor toepassing in de deelmodellen:

- de functie CellsAndFaces in Interacter (de debug interface van de softwareontwikkeling)
- de functie CellsAndFaces in RGFGGRID (het officiële roosterbewerkingsprogramma van D-HYDRO)

In overleg met RWS is de keuze gevallen op de methode CellsAndFaces in RGFGGRID (Kosters, 2021). Doordat in deze methode al rekening wordt gehouden met orthogonaliteit is minder handmatige nabewerking nodig na het automatisch verfijnen. Daarnaast is RGFGGRID een officieel product van Deltares, terwijl Interacter dat niet is.

Deze verfijningsmethode splitst cellen op aan de hand van de oppervlakte. Elke cel wordt opgedeeld in kleinere cellen met een gelijk oppervlak. In Figuur 42 (uit Laan, 2020) is te zien dat een driehoek verandert in vier driehoeken, een vierhoek in vier vierhoeken, een vijfhoek in vijf vierhoeken en een zeshoek in zes vierhoeken. Alle oorspronkelijke roosterlijnen blijven behouden en het resultaat ziet er gestroomlijnd uit. Er is echter een vervorming zichtbaar in de nieuwe roosterlijnen rond overgangen naar andere celtypes. In Figuur 42 (uit Laan, 2020) is dit het duidelijkst zichtbaar in de opgedeelde cellen naast de verfijnde zeshoek (rechtsonder, aangegeven met een rode cirkel). Als gevolg van deze vervormingen resulteert de verfijning in RGFGGRID in een betere orthogonaliteit ten opzichte van verfijning met CellsAndFaces in Interacter (die voor de rest hetzelfde doet als CellsAndFaces in RGFGGRID) (Laan, 2020). Dit duidt erop dat in het verfijningsalgoritme van RGFGGRID rekening wordt gehouden met de orthogonaliteit. Ten opzichte van het 40-m-rooster gaat de orthogonaliteit echter ook met deze methode iets achteruit.



Figuur 42 Voorbeeld van het oorspronkelijke rooster (rood) en het verfijningsresultaat (zwart) met CellsAndFaces in RGFRID voor driehoeken, vijfhoeken, zeshoeken en randen (van linksboven met de klok mee) (uit Laan, 2020).

4.1.2 Handmatige aanpassingen 20-m-rooster

Het heeft de voorkeur om na het automatisch verfijnen van het 40-m-rooster zo weinig mogelijk handmatige aanpassingen aan het 20-m-rooster te doen. Op die manier kan het 20-m-rooster in de toekomst zonder teveel moeite opnieuw worden afgeleid uit het 40-m-rooster. Kusters (2021) constateert dat met name te grote cellen en cellen die de tijdstap limiteren (te kleine cellen of en cellen met te slechte orthogonaliteit) wel aangepast moeten worden. Met RWS is overeengekomen om de volgende aanpassingen handmatig door te voeren, deze aanpak is ook voor de Maas gevolgd:

- alle cellen met orthogonaliteit > 0.5 verbeteren, anders rekent D-HYDRO niet
- wat betreft de celgrootte alleen probleemcellen binnen het actieve gebied (binnen de rekenroosterbegrenzing) verbeteren
 - cellen aanpassen die de tijdstap van het hele model beperken. Hiervoor zijn testberekeningen uitgevoerd met het verfijnde rooster. Dit zijn stationaire berekeningen met een afvoer van 3.200 m³/s en 4.100 m³/s (de twee hoogwaterreferenties van de Maas) voor een eerste versie van de deelmodellen (zie paragraaf 4.2.2).
 - de grote cellen (> 1.600 m²) bekijken, die naar verwachting resulteren in een minder nauwkeurige weergave van de geometrie van het gebied. De ervaring van Kusters (e-mail-communicatie januari 2022) is dat een deel buiten het actieve gebied valt of zich vanzelf oplost bij het verbeteren van de orthogonaliteit. Een ander deel kon al in het 40-m-rooster niet worden opgelost, en dus ook niet in het verfijnde rooster. Van de overige grote cellen is er in beeld gebracht waar ze liggen en of ze verbeterd konden worden.

4.1.3 Toekomstige aanpassingen 40-m-rooster

Door handmatige aanpassingen aan het 20-m-rooster is dit rooster niet meer direct reproduceerbaar uit het 40-m-rooster. Toekomstige aanpassingen aan het 40-m-rooster zijn daardoor niet zonder meer te vertalen naar het 20-m-rooster, als het hele rooster opnieuw moet worden verfijnd. Het is echter wel mogelijk om alleen het gebied waar de aanpassing aan het 40-m-rooster heeft plaatsgevonden opnieuw te verfijnen en vervolgens te vervangen in het 20-m-rooster. Met deze methode is het niet nodig om een volledig automatische roosterverfijning te gebruiken.

4.2 Resultaat

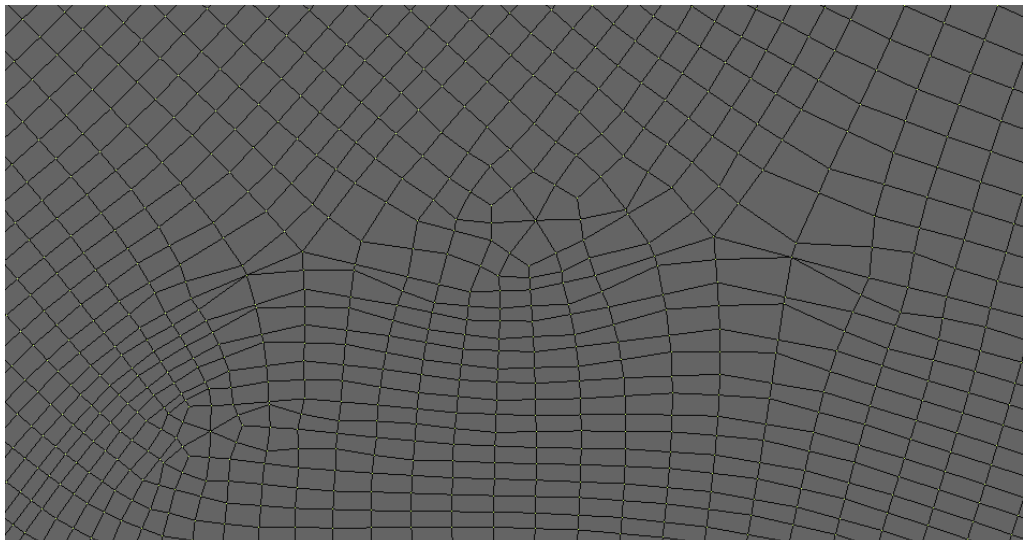
4.2.1 Handmatige aanpassingen

Direct na automatische verfijning was de kwaliteit van het rooster wat betreft orthogonaliteit en celgrootte in grote delen van het modelgebied al vrij goed, maar lokaal waren op sommige locaties handmatige aanpassingen nodig:

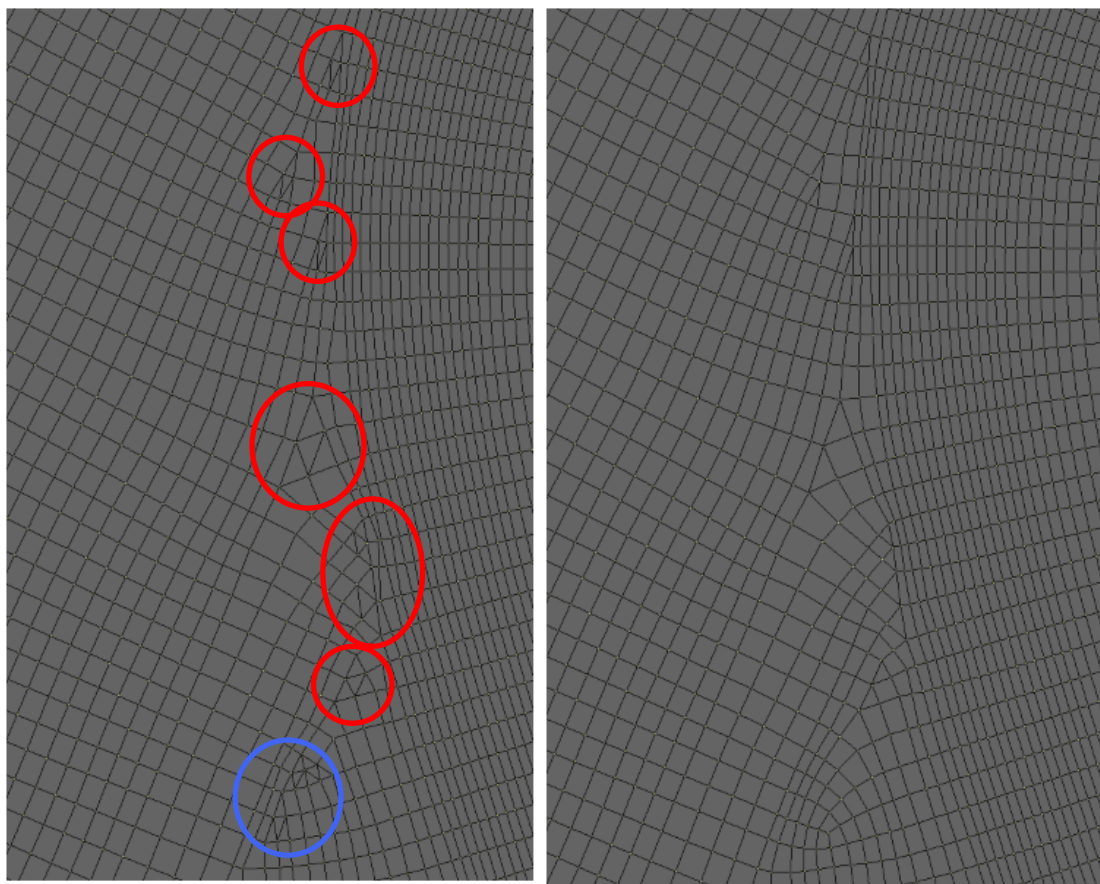
- In enkele kleinere gebieden moest een (automatische) orthogonalisatieslag uitgevoerd worden.
- Op sommige locaties moesten eerst knopen handmatig verschoven worden omdat het orthogonalisatie-algoritme anders geen oplossing kon vinden. Figuur 43 geeft een typisch voorbeeld van een locatie met dit probleem.
- Op sommige locaties genereert het verfijningsalgoritme onnodig kleine driehoekscellen, omdat een bestaande driehoekscel wordt ingedeeld in vier kleinere cellen, waarbij twee ervan samen een vierhoek vormen. Deze twee zijn dus samengevoegd in een vierhoek. Figuur 44 toont een aantal typische voorbeelden hiervan (rood omcirkeld).
- Op enkele locaties was het beter om het rooster helemaal aan te passen. Het ging hierbij om enkele kleine gebieden. Figuur 44 toont een typisch voorbeeld hiervan (blauw omcirkeld).

Tabel 6 en

Tabel 7 vatten de roostereigenschappen van het 40-m-rooster en het verfijnde 20-m-rooster samen, voor het 20-m-rooster voor de situatie voor en na handmatige aanpassingen.



Figuur 43 Voorbeeld voor een locatie waar de ligging van knopen handmatig aangepast moest worden om vervolgens een orthogonalisatieslag uit te kunnen voeren. Zonder handmatige aanpassing kon het orthogonalisatie-algoritme geen goede oplossing vinden.



Figuur 44 Voorbeeld van een typische locatie met kleine cellen (driehoeken) die zijn verwijderd. Links: resultaat van de automatische verfijning. De rode cirkels geven aan waar overbodige driehoeken zijn verwijderd. De blauwe cirkel laat een locatie zien waar het rooster helemaal is aangepast.

Tabel 6 Overzicht van de celoppervlaktes in het 40 m en 20-m-rooster (20m_v0: voor handmatige optimalisatie, 20m: daarna), uitgedrukt in aantal cellen en als percentage van het totale aantal cellen.

	$0 \leq A < 25$	$25 \leq A < 50$	$50 \leq A < 100$	$100 \leq A < 200$	$200 \leq A < 400$	$400 \leq A < 625$	$625 \leq A < 800$	$800 \leq A < 1600$	$1600 \leq A < 2500$	$A > 2500$	Totaal aantal cellen
aantal cellen											
40m	0	0	5	137	3.218	33.936	54.255	227.915	73.358	7.660	400.484
20m_v0	20	564	13.613	352.124	911.586	293.490	24.202	6.430	44	1	1.602.074
20m	2	517	13.502	352.148	911.690	293.487	24.216	6.422	33	1	1.602.018
percentage van het totale aantal cellen											
40m	0,00	0,00	0,00	0,03	0,80	8,47	13,55	56,91	18,32	1,91	400.484
20m_v0	0,00	0,04	0,85	21,98	56,90	18,32	1,51	0,40	0,00	0,00	1.602.074

20m	0,00	0,03	0,84	21,98	56,91	18,32	1,51	0,40	0,00	0,00	1.602.018
-----	------	------	------	-------	-------	-------	------	------	------	------	-----------

Tabel 7 Overzicht van de orthogonaliteit in het 40 m en 20-m-rooster (20m_v0: voor handmatige optimalisatie, 20m: daarna), uitgedrukt in aantal net links en als percentage van het totale aantal net links.

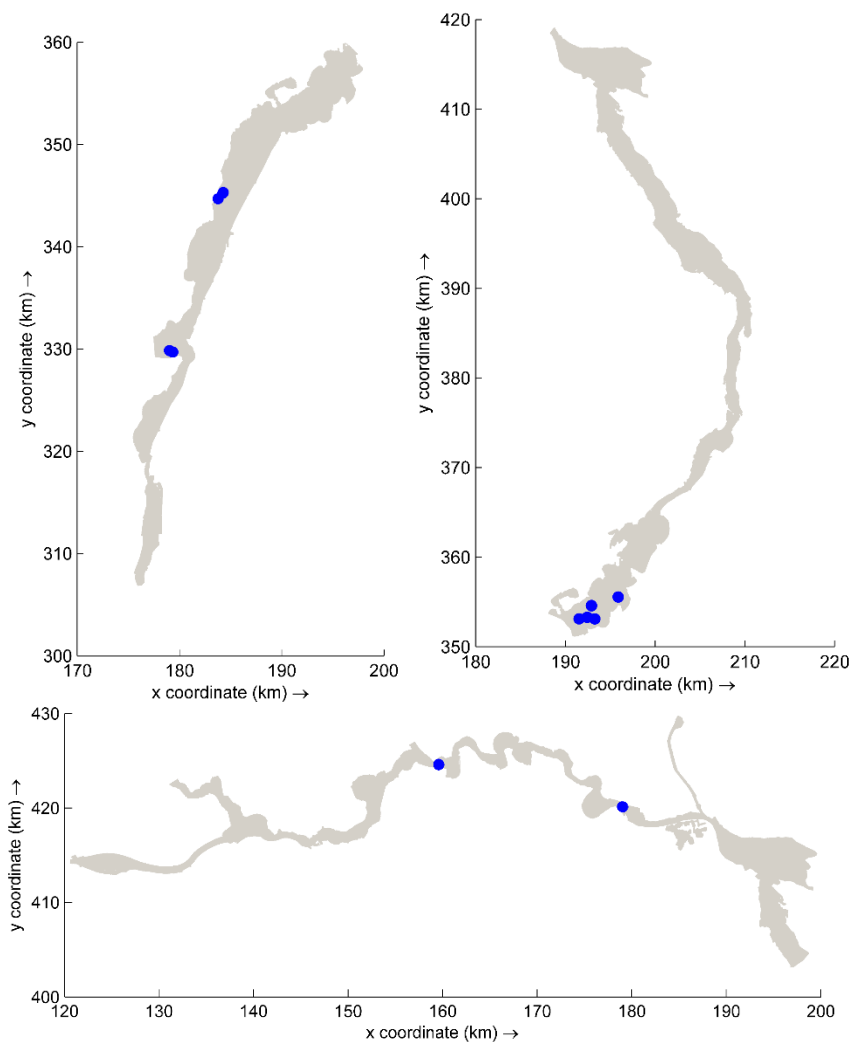
	$0 \leq O < 0.01$	$0.01 \leq O < 0.05$	$0.05 \leq O < 0.1$	$0.1 \leq O < 0.5$	$0.5 \leq O < 1$	$O = 1$	Totaal aantal net links
aantal net links							
40m	689.648	102.216	1.024	1	0	0	792.889
20m_v0	2.756.611	417.270	10.024	3.814	53	0	3.187.772
20m	2.765.047	412.530	7.521	2.618	0	0	3.187.716
percentage van het totale aantal net links							
40m	86,98	12,89	0,13	0,00	0,00	0,00	792.889
20m_v0	86,47	13,09	0,31	0,12	0,00	0,00	3.187.772
20m	86,74	12,94	0,24	0,08	0,00	0,00	3.187.716

4.2.2 Tijdstaptest

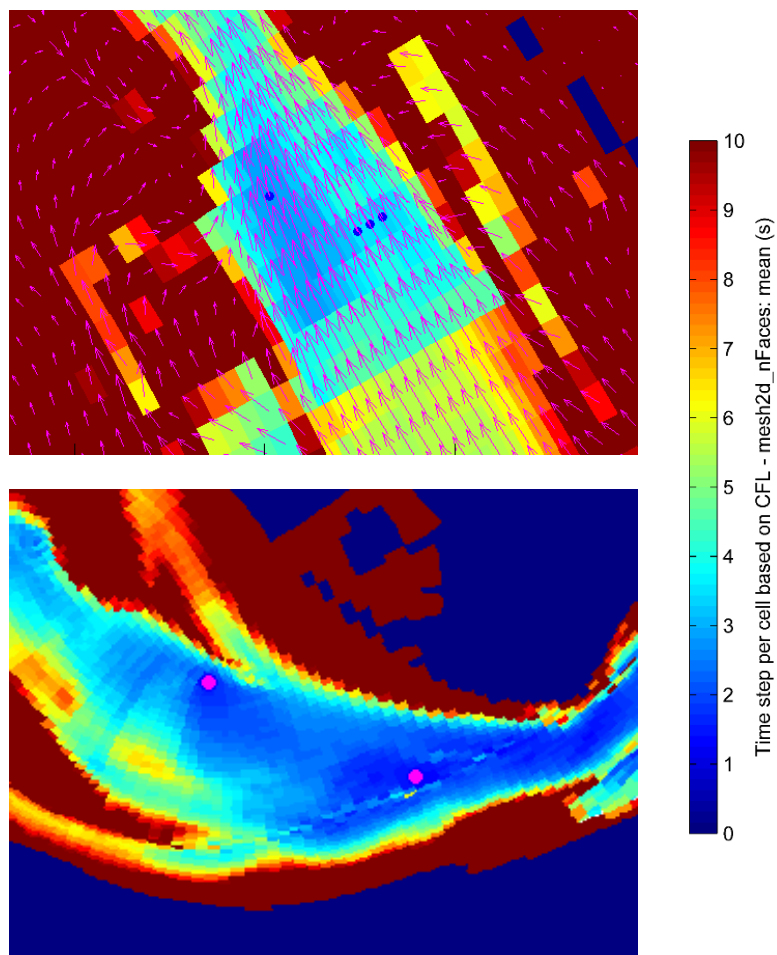
Met het verfijnde rooster zijn drie deelmodellen opgebouwd. Dit wordt in Hoofdstuk 5 beschreven. Met een eerste versie van de deelmodellen (voorafgaand aan de correctie van de Baseline-schematisatie) is geanalyseerd welke rekencellen de rekentijdstap van de modellen beperken en of er nog optimalisatie van het rooster mogelijk is. Figuur 45 toont de locaties van de cellen die de tijdstap meer dan 100 keer beperken in de simulatie met een stationaire afvoer van 4.100 m³/s. Het gaat om een beperkt aantal cellen. Een analyse van de reden voor de tijdstapbeperking liet zien dat het vooral over cellen gaat met een hoge stroomsnelheid die niet in lijn is met de langsrichting van de cel. Figuur 46 geeft enkele voorbeelden. Ook is duidelijk dat de limiterende cellen zijn omgeven door andere cellen die een bijna even kleine tijdstap vragen. Dit betekent dat verdere optimalisatie niet mogelijk is zonder het roosterconcept aan te passen (en daarbij het rooster mogelijk te verslechteren voor andere stromingscondities). Daarom is besloten het rooster niet verder aan te passen. Tabel 8 geeft de gemiddelde tijdstap in de stationaire testberekeningen weer. Deelmodellen B en C rekenen met een tijdstap van gemiddeld iets meer dan 2 seconden. Deelmodel A heeft vanwege de hoge stroomsnelheden in de Grensmaas een aanzienlijk kleinere gemiddelde tijdstap nodig. De rekentijdstap in het totaalmodel met 40-m-rooster is met ongeveer 2,9 seconden maar iets groter dan die van deelmodellen B en C en ruim 2 keer zo groot als die van deelmodel A. Dat komt omdat ook in het totaalmodel de Grensmaas maatgevend is voor de tijdstap. Door de roosterverfijning wordt dus alleen de tijdstap in deelmodel A veel lager dan in het totaalmodel.

Tabel 8 Gemiddelde tijdstap (s) van de deelmodellen en het totaalmodel met 40-m-rooster in de testberekeningen (simulatieperiode van 13 dagen).

berekening	totaalmodel	deelmodel A	deelmodel B	deelmodel C
S3200	2,865	1,296	2,080	2,006
S4100	2,859	1,204	2,134	2,207



Figuur 45 Locatie van de cellen die de tijdstap meer dan 100 keer beperken in de testberekening met een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$. Boven links: deelmodel A; boven rechts: deelmodel B; onder: deelmodel C.



Figuur 46 Voorbeelden van locaties die de rekentijdstap van de deelmodellen bepalen. Boven: Vernauwing van de stroming bovenstrooms van stuw Grave in deelmodel C. Onder: Stroming van de hoofdgeul naar de uiterwaarde in de bocht bij Meers in deelmodel A.

5 Aanpak deelmodellen

5.1 Aanpak en ervaringen deelmodellen Maas in de 5^e generatie

Voor het maken van de deelmodellen voor de Maas is tot nu toe (in de 5^e generatie) de volgende aanpak gevolgd:

- Er zijn 9 deelmodellen gemaakt met een onderlinge overlap van 5 tot 30 km (verschillend per deeltraject).
- Voor de deelmodellen zijn stationaire randvoorwaarden aangemaakt voor 1/1250 en 1/250 afvoeren (3.224 m³/s en 4.118 m³/s bij Eijsden).
 - De gemiddelde maximale waterstand voor de 13 tijdstappen rondom de top (max13) uit de dynamische simulaties met Q3224 en Q4118 met het volledige 40 m model is gebruikt als benedenstroomse randvoorwaarde voor de deelmodellen.
 - Het gemiddelde van de maximale afvoeren (max13) op de boven- en benedenrand uit de dynamische berekening met het volledige 40 m model is als bovenstroomse modelrand opgelegd in het deelmodel.
- Er is met lateralen gerekend. Deze zijn afgeleid uit de dynamische simulaties met Q3224 en Q4118 met het volledige 40 m model. Daarbij is de afvoer van de lateraal op het moment van optreden van de piekwaterstand gebruikt.

In de deelmodellen werden stationaire simulaties uitgevoerd die zo goed mogelijk de afvoergolven van de hoogwaterreferenties met een piekafvoer van 3.224 en 4.118 m³/s moesten beschrijven (zie paragraaf 5.4 voor de redenering daarachter). Dit betekent dat er een afregeling nodig was om de dynamische simulaties uit het volledige model zo goed mogelijk te vertalen naar randvoorwaarden van de stationaire sommen in het deelmodel. Daarbij werd gekeken naar de waterstanden op de as van de rivier en het inundatiebeeld. De 5^e generatie deelmodellen zijn als volgt afgeregeld:

- De afvoer op de bovenrand werd aangepast wanneer niet het juiste inundatiebeeld ontstond. Het uitgangspunt hierbij was dat de aanpassing in afvoer niet groter mocht zijn dan 100 m³/s ten aanzien van de initiële Q3224- en Q4118-afvoeren, zoals berekend met het volledige 40 m model. Het inundatiebeeld kan gezien worden als benadering voor een juiste waterstand in de uiterwaard.
- Absolute waterstandsverschillen (tussen stationaire berekeningen met de deelmodellen en dynamische berekening met het volledige model) op de as van de rivier kleiner dan 5 cm ten opzichte van het volledige 40 m model waren acceptabel. In de praktijk kwamen er echter afwijkingen tot +/-15 cm voor, ook nog na aanpassing van de afvoer op de bovenrand. Doordat er in veel gevallen zowel een grote positieve als een grote negatieve fout optrad, was een optimalisatie door enkel aanpassing van de stationaire afvoer niet te realiseren. Gemiddeld over de hele lengte van het deelmodel kwamen de verschillen wel onder de 5 cm.
- De deelmodellen werden volgens bovenstaande procedure geoptimaliseerd voor Q3224- en Q4118-afvoeren.
- Bij de beoordeling van inundatiebeelden is uitsluitend een kwalitatieve beoordeling op basis van vergelijking van inundatiefiguren uitgevoerd.

De eerste keer dat er deelmodellen werden afgeleid in de vijfde generatie zijn er voorafgaand aan deze afregeling bovendien passende waarden voor de tijdstap en de wervelviscositeit ("eddy viscosity) bepaald. Deze numerieke modelparameters zijn immers afhankelijk van de grootte van de roostercellen.

De volgende ervaringen kunnen worden gerapporteerd (Agtersloot, 2014, en De Jong, 2018):

- Door de gekozen aanpak om de afvoer op de bovenrand te bepalen werden de lateralen voor ongeveer 150% meegenomen: als lateraal zelf voor 100% en via de middeling van de afvoer (zoals aan het begin van deze paragraaf beschreven) nog eens voor ongeveer 50%. Dit betekent dat in modellen met een hoge laterale toestroming (deelmodellen 3, 7 en 9) de afvoer alsnog te hoog kon uitvallen.
- Het hebben van minder deelmodellen zou het gebruiksgemak vergroten, het beheer vereenvoudigen en ervoor zorgen dat er minder vaak maatregelen te dicht bij een modelrand liggen, waardoor de effecten van de maatregel niet goed beoordeeld kunnen worden.
- De rekentijden van de deelmodellen blijken niet zo relevant voor het proces van het beoordelen van een maatregel. De Baseline-werkzaamheden vergen immers veel meer werk- en doorlooptijd. Rekentijden zijn dus geen goed argument voor meer deelmodellen.
- De overlap tussen de deelmodellen was op veel modelgrenzen niet voldoende lang, ingrepen die met de modellen beoordeeld worden kunnen daardoor te dicht bij de rand komen te liggen. Een overlaplengte van orde 25-30 km wordt aanbevolen.

5.2 Aanpak Rijntakken in de 6^e generatie

Bij voorkeur zou de aanpak voor het afleiden van deelmodellen voor Rijntakken en Maas gelijk moeten zijn. Daarom wordt hieronder in het kort beschreven welke aanpak er voor de 6^e generatie Rijntakkenmodellen is gekozen. Details zijn te vinden in Kusters (2022).

Voor de Rijntakken worden er vier deelmodellen gemaakt, drie voor de takken Boven-Rijn – Waal, Boven-Rijn – Pannerdensch Kanaal – Neder-Rijn - Lek en Boven-Rijn – Pannerdensch Kanaal – IJssel en een splitsingspuntenmodel voor maatregelen die de afvoerverdeling beïnvloeden.

Het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) geeft aan dat voor de toets op hoogwaterveiligheid een dynamische berekening moet worden gebruikt als wordt verwacht dat een maatregel niet alleen een lokale waterstandsverhoging/verlaging tot gevolg heeft maar invloed heeft op een groter gebied, bijvoorbeeld door topvervlakking. Dat is voor de Rijntakken niet relevant omdat de topvervlakking beperkt is. Daarom worden voor alle deelmodellen stationaire randvoorwaarden gebruikt. Er worden randvoorwaarden gemaakt voor alle standaardsommen die nodig zijn voor de toetsingen volgens het RBK, dus niet alleen hoogwater, maar ook invloed op scheepvaart (dwarsstroming) en morfologie. De stationaire berekeningen met de deelmodellen worden vergeleken met stationaire berekeningen met het grote (40 m) model.

Er wordt met stationaire lateralen gerekend. De stationaire afvoerwaarden voor de lateralen (gebruikt voor zowel de deelmodellen als het gehele 40 m model) zijn bepaald uit dynamische berekeningen met het gehele Rijntakkenmodel (afvoer bij lateraal op moment van optreden piekwaterstand).

5.3 Gebruik van de deelmodellen voor de Maas

De deelmodellen voor de Maas worden gebruikt voor:

- het bepalen van het waterstandseffect van een maatregel;
- het beoordelen van morfologische effecten van een maatregel; en
- het beoordelen van de invloed van een maatregel op de scheepvaart als gevolg van veranderende dwarsstroomsnelheden.

De deelmodellen worden niet gebruikt voor:

- het bepalen van het juridische winterbed; en
 - de compensatie van bergend volume bij maatregelen in het bergend gebied, of bij maatregelen in het stroomvoerend gebied die (volgens de berekening met het deelmodel voor het waterstandseffect) geen waterstandsverhoging veroorzaken.
- Hiervoor wordt een dynamische berekening met het grote (40 m) model uitgevoerd.

5.4 Herziening aanpak voor de 6^e generatie deelmodellen voor de Maas

5.4.1 Meenemen topvervlakking

Het is van belang dat de deelmodellen een realistische waterstand berekenen, omdat de effecten van een maatregel waterstandsafhankelijk zijn. Op de Maas heeft, in tegenstelling tot de Rijntakken, bij hoogwater de topvervlakking een belangrijke invloed op de afvoer en waterstanden. De Jong en Asselman (2019) vonden voor afvoergolven met gemiddelde golfvorm en afvoerpieken tussen de 3.200 en 4.400 m³/s aan de bovenrand een invloed van 400 tot ruim 600 m³/s op de afvoerpiek en tot ruim 60 cm op de waterstanden langs de Maas (Figuur 47). Bij stompe golven is de invloed kleiner dan bij spitse golven (Figuur 48).

Er zijn dan drie opties voor het maken en gebruiken van de deelmodellen met betrekking tot topvervlakking:

- 1 behouden van de aanpak uit de 5^e generatie (stationaire berekeningen waarin via de randvoorwaarden wordt gecompenseerd voor het effect van topvervlakking).
- 2 overgaan naar dynamische berekeningen met de deelmodellen. Op de bovenranden worden de afvoergolven opgelegd, op de benedenranden Qh-relaties. Afvoergolven en Qh-relaties worden afgeleid met het grote 40 m model. Voordeel is dat er een eerlijke vergelijking tussen 40 m groot model en deelmodel gemaakt wordt en geen stappen voor compensatie van het verschil tussen een dynamische en een stationaire berekening nodig zouden moeten zijn. Nadeel is dat, als een maatregel invloed heeft op de topvervlakking, er een waterstandsverschil tot aan de benedenrand van het model optreedt, omdat de Qh-relatie in de berekening met maatregel een andere benedenstroomse waterstand levert dan in de berekening zonder maatregel. Dat is misschien wel realistisch maar maakt de ingreep moeilijk te beoordelen. Deze optie lijkt daarom niet wenselijk.
- 3 blijven werken met stationaire berekeningen met de deelmodellen. Om alsnog de invloed van topvervlakking mee te kunnen nemen worden er kunstmatige laterale onttrekkingen opgelegd op de as van de rivier.

In overleg met RWS is voor de hoogwaterreferentieis gekozen voor optie 3. De aanpak voor de deelmodellen voor de Maas wijkt – voor de hoogwaterreferentieis – daarmee af van de aanpak voor de deelmodellen voor de Rijn in de manier waarop rekening wordt gehouden met de invloed van topvervlakking.

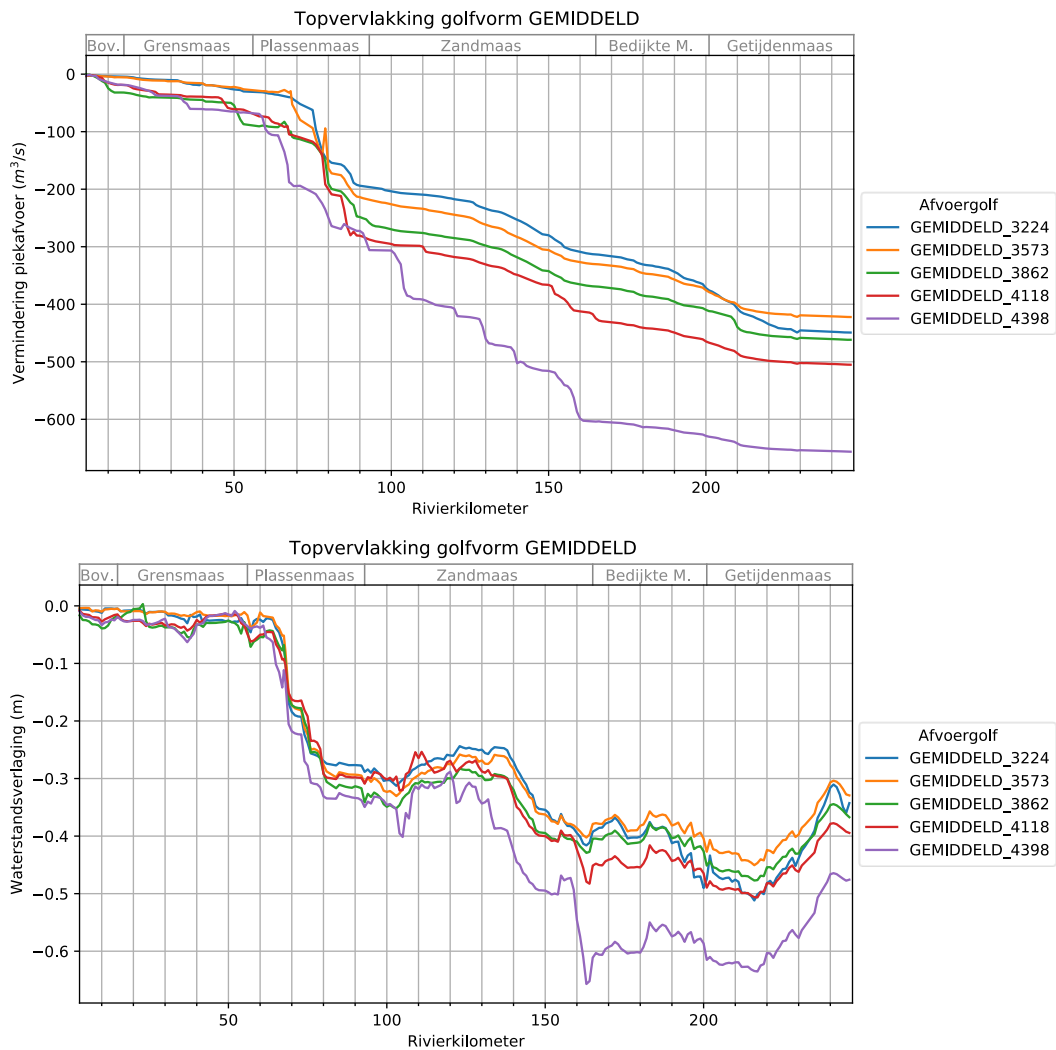
Voor de deelmodellen van beno22 worden voor het eerst ook aanvullende randvoorwaarden voor lagere afvoerniveaus dan de hoogwaterreferenties afgeleid, waarvoor is besloten om geen rekening te houden met topvervlakking. Welke randvoorwaarden dat zijn wordt in detail beschreven in paragraaf 5.4.8.

Hoe de randvoorwaarden en lateralen voor de hoogwaterreferenties zijn afgeleid staat beschreven in paragrafen 5.4.5 en 5.4.6. Voor de randvoorwaarden voor de lagere afvoeren wordt dit gepresenteerd in paragraaf 5.4.8.

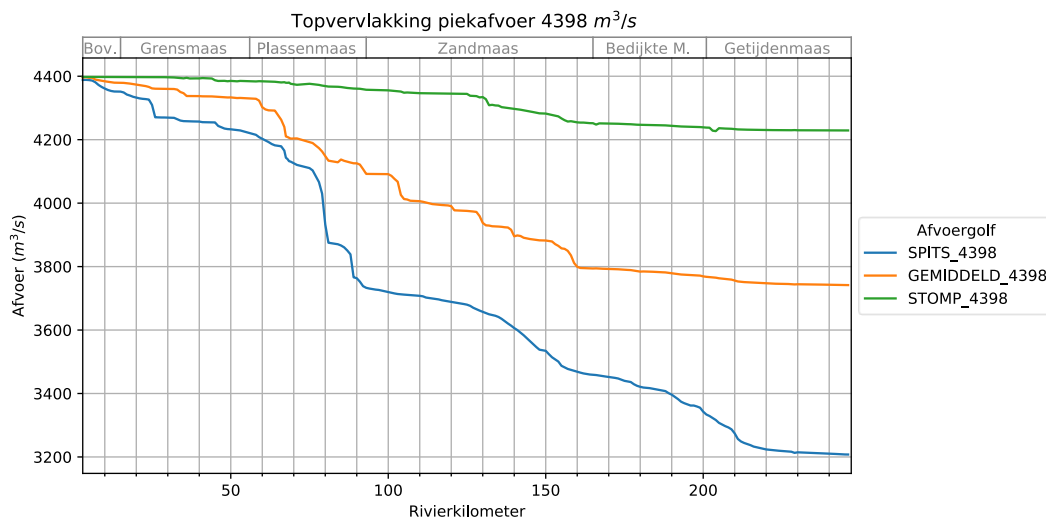
5.4.2 Aantal deelmodellen

Voor meer gebruiksgemak en een makkelijker beheer van de modellen bestaat de wens om het aantal deelmodellen te verkleinen naar 3. In paragraaf 6.3 worden geschikte locaties voor de deelmodelranden gekozen, waarbij rekening wordt gehouden met een overlap van orde 20 km.

Met deze deelmodellen zijn testberekeningen uitgevoerd om te beoordelen of de rekestijden dan nog acceptabel zijn. Door optimalisatie van de initiële condities (zie paragraaf 6.5) en de nodige rekenperiode (paragraaf 7.4) zijn de rekestijden bij drie deelmodellen uiteindelijk acceptabel bevonden. Daarbij wordt de kanttekening geplaatst dat de rekestijd van het hydrodynamische model over het algemeen niet het knelpunt is bij het beoordelen van een maatregel.



Figuur 47 Verandering van de piekafvoer (boven) en piekwaterstand (midden) langs de Maas door topvervlakking voor verschillende afvoerpieken en gemiddelde golfvorm. Uit De Jong & Asselman (2019).



Figuur 48 Verandering van de piekafvoer langs de Maas door topvervlakking voor een afvoerpiek van 4.398 m³/s en verschillende golfvormen. Uit De Jong & Asselman (2019).

5.4.3 Keuze afvoergolven

Er is besloten om de afvoergolven aan te passen aan de nieuwe hoogwaterreferenties uit het RBK. Deze bestaan uit afvoergolven met een golfvorm conform uitgangspunten van project BOI2023 en een piekafvoer bij Borgharen van 3.200 m³/s (Maasvallei) of 4.100 m³/s (Bedijkte Maas). Deze zijn gedocumenteerd in De Jong (2022).

5.4.4 Keuze numerieke instellingen

In de 5^e generatie modellen zijn de tijdstap, de horizontale wervelviscositeit (“eddy viscosity”) en de parameter ThetaC (in de WAQUA-modellen van de 5^e generatie een gewichtsfactor die werd gebruikt bij de bepaling van het energieverlies over een overlaat) aangepast ten opzichte van het volledige 40 m model om 1) de waterstanden in de deelmodellen dichter bij de waterstanden in het gehele model (40 m) te krijgen (wervelviscositeit) en 2) de berekende waterstanden stabiel te maken (ThetaC).

De tijdstap wordt in D-HYDRO automatisch aangepast aan de grootte van de roostercellen in combinatie met de stroomsnelheid in die cellen. Hiervoor hoeft in de 6^e generatie deelmodellen dus geen keuze meer gemaakt te worden.

De parameter ThetaC (nu aangeduid met *waquaweirtheta*) wordt in D-HYDRO ook gebruikt. De ervaring met de 5^e generatie deelmodellen leert echter dat het aanpassen van deze waarde een grote invloed kan hebben op de benodigde simulatieduur voor de standaardberekeningen, omdat (veel) minder snel een stabiele eindtoestand wordt bereikt in de stationaire berekeningen. Daarom wordt deze parameter in de 6^e generatie deelmodellen bij voorkeur niet aangepast. Voor de deelmodellen van de Rijntakken is geconcludeerd dat *waquaweirtheta* in D-HYDRO niet helpt om de geobserveerde waterstandsfluctuaties in het model te verkleinen. De parameter is daarom ook in de deelmodellen voor de Maas niet aangepast.

In de 6^e generatie modellen in D-HYDRO is overgestapt naar een andere aanpak voor de horizontale wervelviscositeit. Er wordt gebruik gemaakt van de Smagorinsky-formulering, een eenvoudig model voor turbulentie. Hiermee is het mogelijk om automatisch om te gaan met grote verschillen in celgrootte en mogelijk daarbij behorende stroomsnelheidsverschillen. Er is gekozen voor een Smagorinsky-coëfficiënt van 0,2 (Minns et al., 2022).

De daarbij horende constante achtergrondwaarde (*vicouv*, in het 40 m model op een waarde van 0,1 m²/s gezet) kan bij een fijner rooster nog worden vergroot om de berekende waterstanden te corrigeren voor de hogere roosterresolutie. Dit is uiteindelijk ook gedaan, zie paragraaf 6.6.

5.4.5 **Bepalen randvoorwaarden hoogwaterreferenties**

De waterstanden op de benedenranden van de deelmodellen zijn op dezelfde manier bepaald als in de 5^e generatie (max13-waarde van de waterstand uit de dynamische berekening met het volledige 40 m model). Hetzelfde geldt voor de lateralen (afvoer lateraal op het moment van optreden van de piek in de waterstand). De laterale afvoeren verschillen niet van die uit het 40 m model van de gehele Maas.

Op de bovenranden wordt net als in de 5^e generatie deelmodellen een afvoer opgelegd. Deze wordt echter anders bepaald. Er wordt namelijk uitgegaan van de max13-waarde van de afvoer uit het volledige 40 m model ter plekke van de bovenrand van het deelmodel. Er vindt dus geen middeling van de afvoer op boven- en benedenrand plaats, en evenmin wordt de afvoer gecorrigeerd.

Omdat de (stationaire) randvoorwaarden voor de hoogwaterreferenties worden afgeleid van dynamische berekeningen met het 40 m model van de gehele Maas, worden deze randvoorwaarden aangeduid met de naam "SD3200" en "SD4100".

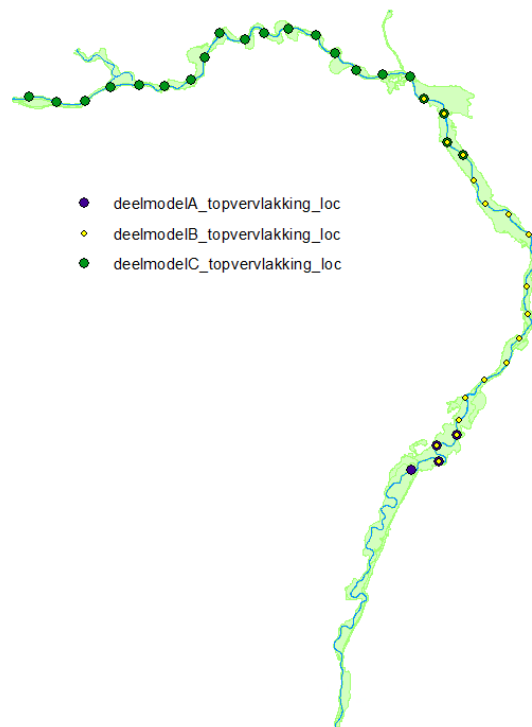
5.4.6 **Onttrekkingen voor de kunstmatige lateralen (hoogwaterreferenties)**

De kunstmatige laterale onttrekkingen om de invloed van topvervlakking mee te kunnen nemen worden toegevoegd op de as van de rivier, met een regelmatige afstand van 5 km. Hiervoor zijn aparte locaties gedefinieerd. De waardes moeten immers bij elke actualisatie van de deelmodellen worden aangepast, omdat wijzigingen in de modelgeometrie de topvervlakking kunnen beïnvloeden, terwijl de waardes voor de "gewone" lateralen over het algemeen niet veranderd worden⁵. Daarom is het eenvoudiger deze twee gescheiden te houden.

De laterale onttrekkingen zijn in deelmodellen B en C (tussen rkm 70 en 245) gedefinieerd op 5 km onderlinge afstand. Ook in deelmodel A zijn de onttrekkingen op 5 km afstand gedefinieerd, maar ze worden in dit deelmodel pas vanaf rkm 65 toegepast, omdat pas vanaf die rivierkilometer topvervlakking een belangrijke rol speelt. In totaal zijn het, 4, 19 en 21 locaties voor respectievelijk de deelmodellen A, B en C, met de modelgrenzen zoals vastgelegd in paragraaf 6.3. De locaties worden op een kaart gepresenteerd in Figuur 49.

De afvoerwaardes voor de kunstmatige onttrekkingen worden als volgt bepaald: De max13-waarde (+/- 60 min rondom de hoogwaterpiek) van de afvoer uit het volledige 40 m model ter plekke van de benedenrand van het deelmodel wordt afgetrokken van de max13-waarde van de afvoer uit het volledige 40 m model ter plekke van de bovenrand van het deelmodel. Dit geeft de invloed van de topvervlakking en de gewone lateralen over de lengte van het deelmodel. Daar worden vervolgens de gewone lateralen afgetrokken. Het resulterende afvoerverschil is puur de invloed van de topvervlakking en wordt evenredig verdeeld over de lengte van het deelmodel. De berekende waterstanden en inundatiebeelden hebben laten zien dat deze aanpak voldoet (zie paragraaf 6.4).

⁵ De "gewone" lateralen zijn onderdeel van de de standaardssommen voor de Jaarlijkse Actualisatie Maas-Modellen (JAMM).



Figuur 49 Locaties van de kunstmatige lateralen voor de berekeningen van de twee hoogwaterreferentieis. Voor beide hoogwaterreferentieis worden dezelfde locaties gebruikt.

5.4.7 Validatie resultaten deelmodellen

Omdat de kunstmatige lateralen maar een benadering voor de invloed van de topvervlakking zijn zullen ook met de herziene aanpak verschillen tussen de stationaire berekeningen met de deelmodellen en de dynamische berekeningen met het volledige model optreden. Deze verschillen worden op dezelfde manier als in de 5^e generatie beoordeeld. Samengevat is dit (details zie paragraaf 5.1) voor alle drie deelmodellen:

- vergelijken van de waterstanden op de as van de rivier (deelmodel stationair vs. volledig model dynamisch) voor de 3.200 m³/s en 4.100 m³/s afvoergolven, waarbij afwijkingen van maximaal +/- 5 cm geaccepteerd worden
- vergelijken van de inundatiebeelden langs de onbedijkte Maas

5.4.8 Aanvullende sets van standaard randvoorwaarden

Volgens het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) moet niet alleen gekeken worden naar hoogwaterveiligheid maar ook naar de effecten van maatregelen op morfologie en scheepvaart (dwarsstroming). Voor de Rijntakken worden de deelmodellen daarom met een uitgebreidere set aan standaard randvoorwaarden geleverd. Om de hoeveelheid werk voor een vergunningverlening te beperken en voor een betere reproduceerbaarheid van de resultaten is besloten om ook voor de Maas een uitgebreidere set aan standaard randvoorwaarden mee te leveren met de deelmodellen. Daarvoor moeten topafvoeren worden gebruikt die relevant zijn voor de toetsen volgens het RBK. RWS-ZN heeft aangegeven dat aanvullende randvoorwaarden gewenst zijn voor de (stationaire) afvoeren 1.300 – 1.700 – 2.100 – 2.500 m³/s. Deze randvoorwaarden zijn voor het totaalmodel (zie paragraaf 2.2) afgeleid met de RGWM waarbij gebruik is gemaakt van de relatie voor stationaire hoge afvoeren (groter dan 1300 m³/s bij Borgharen). Later is ook besloten om de stationaire lage afvoer van 750 m³/s toe te voegen welke is afgeleid met de relatie voor stationaire lage afvoeren (lager of gelijk aan 1300 m³/s bij Borgharen).

De werkwijze voor het vervolgens bepalen van de nieuwe randvoorwaarden voor de deelmodellen wijkt iets af van de werkwijze voor de hoogwaterreferenties.

Omdat het voor de toetsen voor morfologie en scheepvaart niet noodzakelijk is om het gedrag van de rivier bij een hoogwatergolf na te bootsen in de deelmodellen, worden de afvoeren op de bovenranden en de waterstanden op de benedenranden bepaald met een **stationaire** berekening met het 40 m model van de gehele Maas (in plaats van een dynamische berekening). In plaats van max13-waardes worden daarom de last25-waardes van afvoeren op de bovenranden en waterstanden op de benedenranden bepaald. Om dezelfde reden hoeft geen rekening te worden gehouden met topvervlakking en zijn er dus geen kunstmatige lateralen nodig. De 'echte' laterale toestromingen bij zijrivieren en gemalen worden bepaald met de RGWM. De werkwijze daarvoor is in detail beschreven in Van der Deijl (2023).

De sets van randvoorwaarden bevatten dus:

- de constante afvoer en de constante waterstand voor de boven- en benedenrand van de deelmodellen;
- de (constante) laterale toestromingen;
- **geen** (constante) onttrekkingen voor de invloed van topvervlakking.

Omdat deze aanvullende randvoorwaarden baseren op stationaire berekeningen met het 40 m model van de gehele Maas, krijgen deze de naam S1300, S1700, S2100 en S2500 (in tegenstelling tot de afkorting "SD", die in de naam van de randvoorwaarden voor de hoogwaterreferenties wordt gebruikt).

6 Opbouw deelmodellen

6.1 Opbouw vanuit Baseline

Voor de deelmodellen is dezelfde Baseline-schematisatie gebruikt als voor het gehele beno-model: `baseline-maas-beno22_6-v2a`.

6.2 Conversie naar D-HYDRO

Conversie van Baseline naar D-HYDRO met het definitieve 20-m-rooster (Hoofdstuk 4) voor alle deelmodellen tegelijk was niet mogelijk, omdat Baseline dit qua hoeveelheid data niet aan kon. Daarom is het 20-m-rooster opgeknipt ter hoogte van de vastgestelde randen van de deelmodellen (zie paragraaf 6.3). De deelroosters heten:

- 1 `1grid-maas_20m_km002-085-v1_net.nc` (deelmodel A)
- 2 `2grid-maas_20m_km067-165-v1_net.nc` (deelmodel B)
- 3 `3grid-maas_20m_km144-247-v1_net.nc` (deelmodel C)

Ook is voor elk deelmodel een model boundary gemaakt, door de model boundary van het totaalmodel (`model_boundary-maas_beno22_6_v2`) op te knippen. Met deze deelroosters en model boundaries is `baseline-maas-beno22_6-v2` geconverteerd naar de volgende modelschematisaties:

- 1 `dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km002_085-v2a` (deelmodel A);
- 2 `dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km067_165-v2a` (deelmodel B);
- 3 `dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a` (deelmodel C).

6.3 Locaties randen deelmodellen

Tabel 9 geeft de locatie van begin en einde van de deelmodellen weer. De drie modellen zijn ongeveer even lang (80-100 km) en hebben een overlap van een kleine 20 km.

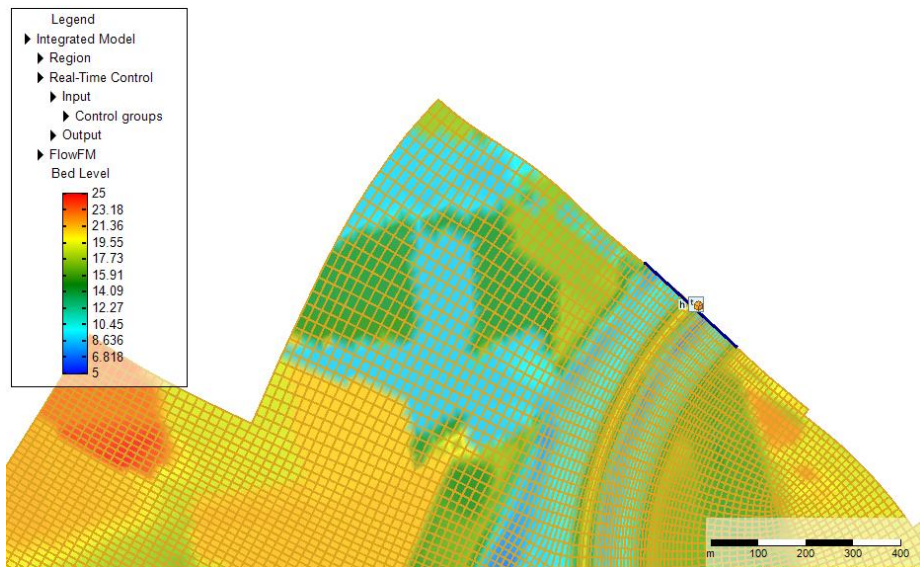
Tabel 9 Locaties randen deelmodellen.

Deelmodel	rivierkilometer (van-tot)	lengte	overlap
A	3-84,6	82 km	18 km
B	67-165	98 km	
C	144-247	103 km	19km

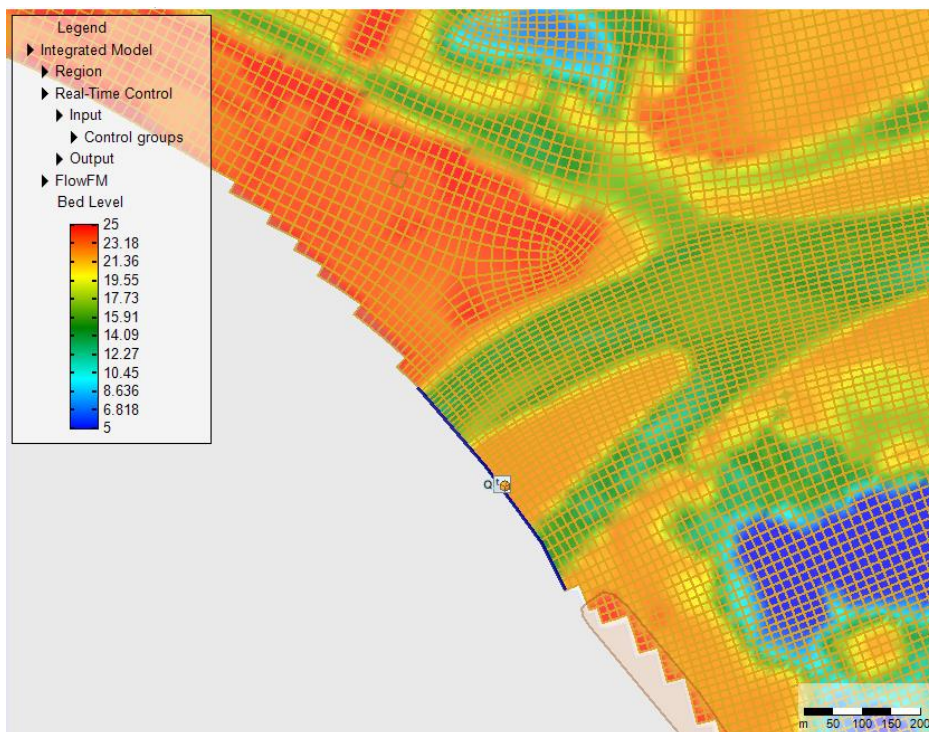
De locatie van de bovenstroomse open rand van deelmodel A en de benedenstroomse open rand van deelmodel C zijn gelijk gehouden aan de open randen van het totaalmodel. Figuur 50 toont de benedenstroomse rand van deelmodel A, die langs de spoorbrug bij Buggenum loopt. De rand loopt zowel over de hoofdgeul van de Maas (rechts) als over het Lateraalkanaal (links). Dat is een gunstige locatie, omdat bij afvoeren van 4.100 m³/s (de maximale afvoer die met de deelmodellen wordt doorgerekend) de hele stroming door de hoofdgeul en het Lateraalkanaal gaat. De uiterwaarden links en rechts daarvan zijn afgesloten door de brughoofden van de spoorbrug en hoge grond.

De bovenstroomse open rand van deelmodel B ligt bij de brug van de snelweg A2 bij Wesseem.

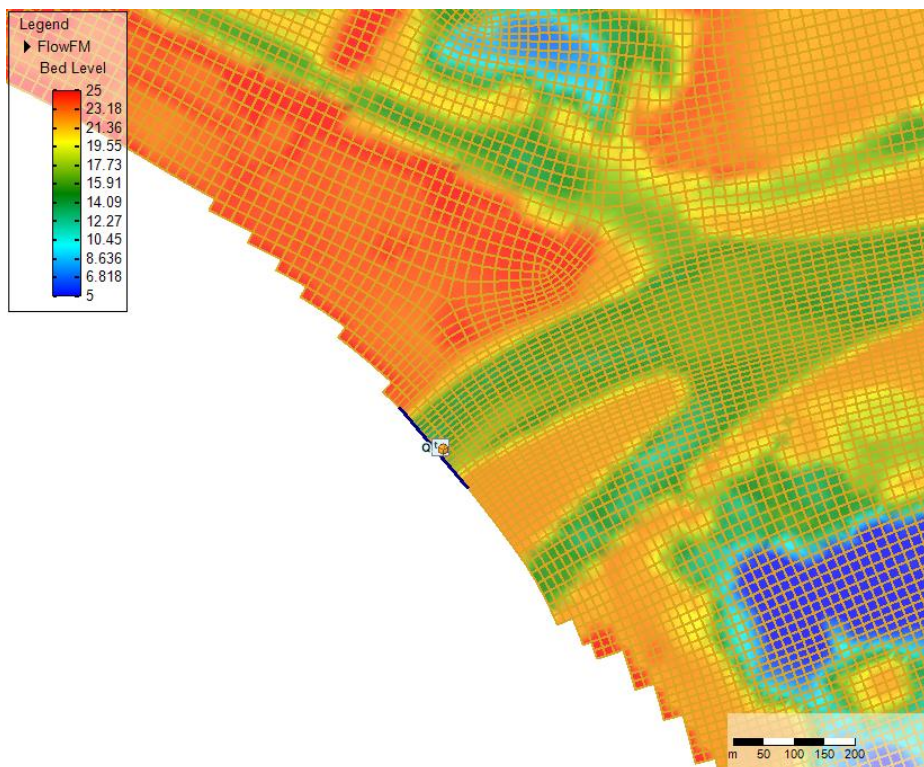
De situatie daar is vergelijkbaar met de uitstroomrand van deelmodel A: de stroming loopt bij hoge afvoeren door de Maas en het einde van het Julianakanaal, de uiterwaarden zijn afgesloten door de brughoofden. Bij afvoeren van 2.100 m³/s of kleiner stroomt het Julianakanaal nog niet mee en gaat de afvoer volledig door de Maas. Daarom wordt er op de bovenrand van deelmodel B onderscheid gemaakt tussen de afvoeren vanaf 2.500 m³/s en hoger en afvoeren vanaf 2.100 m³/s en lager. Voor de hogere afvoeren loopt de open rand over zowel de Maas als het Julianakanaal (Figuur 51), voor de lagere afvoeren alleen over de Maas (Figuur 52). Als er in de toekomst ook met afvoeren tussen 2.100 m³/s en 2.500 m³/s gerekend gaat worden, moet met behulp van het 40m-model van de gehele Maas per afvoer worden onderzocht welke van de twee randen nodig is.



Figuur 50 Benedenstroomse rand van deelmodel A (langs de spoorbrug bij Buggenum).

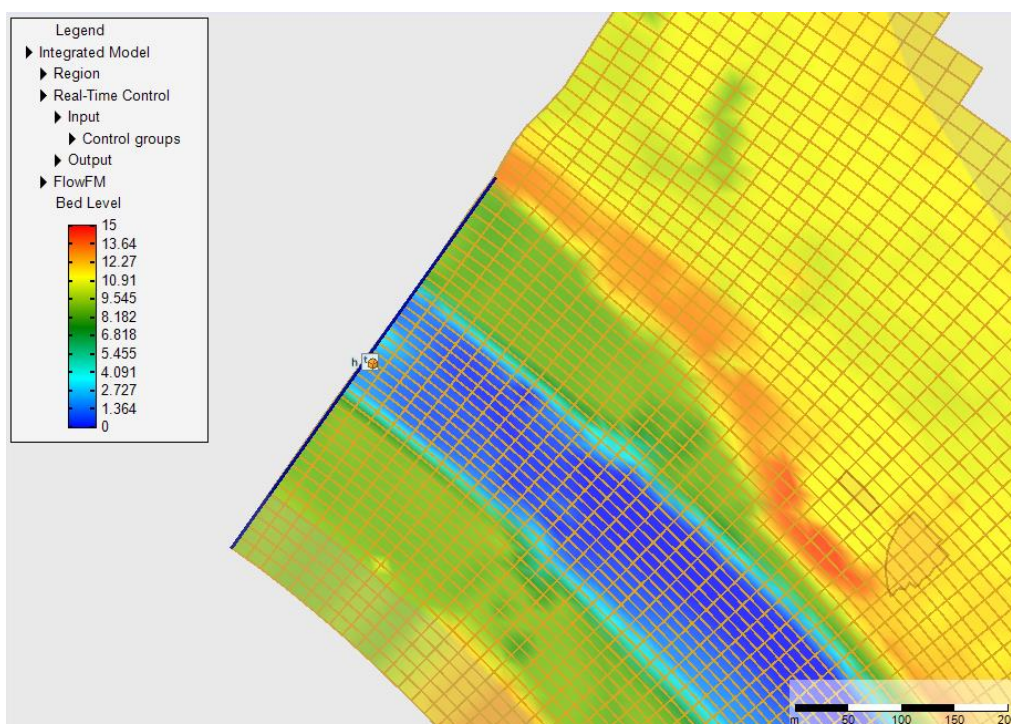


Figuur 51 Bovenstroomse rand van deelmodel B (langs de snelweg A2) voor afvoeren van 2.500 m³/s en hoger.



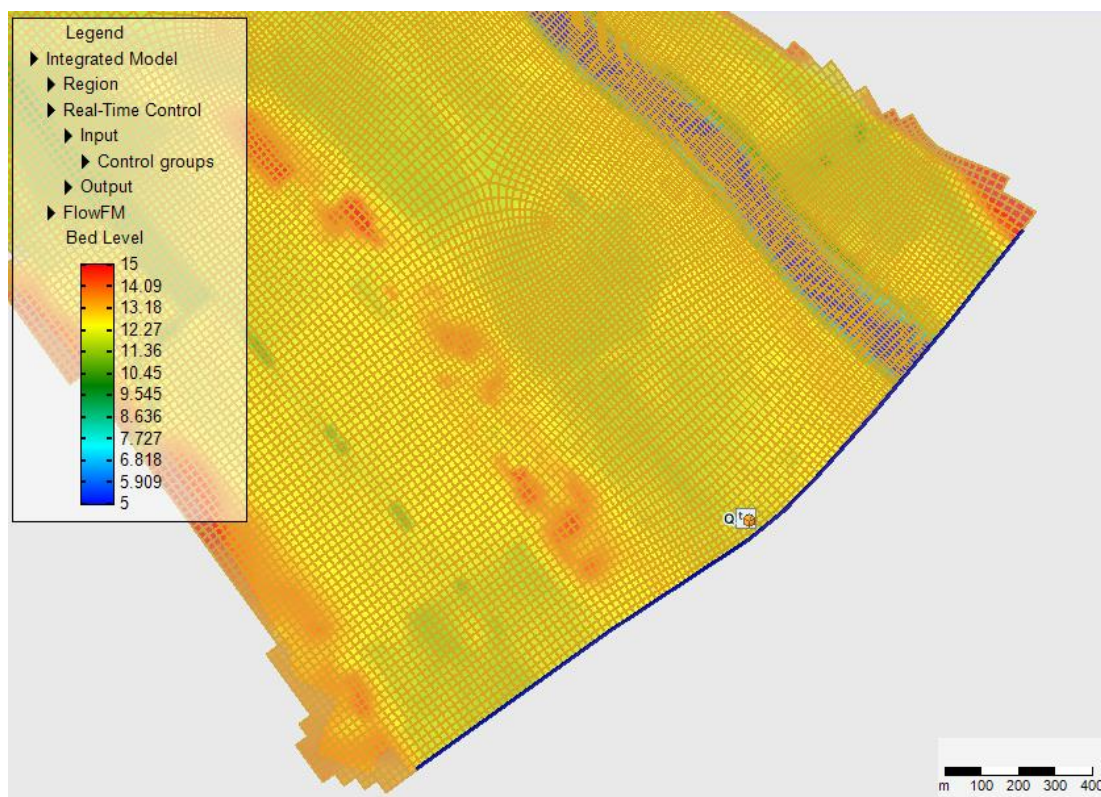
Figuur 52 Bovenstroomse rand van deelmodel B (langs de snelweg A2) voor afvoeren van $2.100 \text{ m}^3/\text{s}$ en lager.

Figuur 53 toont de benedenstroomse open rand van deelmodel B, langs Spoorbrug Mook en de fietsbrug daarnaast. Hier is sprake van smalle uiterwaarden zonder plassen, overlaten of kunstwerken, dus parallelle stroombanen aan de hoofdgeul.



Figuur 53 Benedenstroomse rand van deelmodel B (langs de Spoorbrug Mook en Fietsbrug Mook).

De bovenstroomse rand van deelmodel C wordt gepresenteerd in Figuur 54. Anders dan bij de andere randen loopt de stroming hier door vrij brede uiterwaarden, maar wel in parallelle stroombanen. Smallere locaties in de buurt waren niet geschikt voor een open rand vanwege overstromende kades, kunstwerken of geplande grote rivierverruimingen. De verdeling van de stroming over de modelrand wordt in D-HYDRO puur gebaseerd op de waterdiepte per cel en wijkt daarom op deze rand af van de daadwerkelijke verdeling.



Figuur 54 Bovenstroomse rand van deelmodel C.

6.4 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.4.5, 5.4.6 en 5.4.8. Tabel 10 laat de resulterende waarden voor de afvoeren op de bovenrand en de waterstanden op de benedenrand zien voor zowel de hoogwaterreferenties als de aanvullende randvoorwaarden. Tabel 11 toont de berekening van de kunstmatige onttrekkingen voor de hoogwaterreferenties.

Tabel 10 Randvoorwaarden en waarde van de kunstmatige laterale onttrekkingen (per onttrekking).

	deelmodel A		deelmodel B		deelmodel C	
	afvoer bovenrand (m ³ /s)	waterstand benedenrand (m +NAP)	afvoer bovenrand (m ³ /s)	waterstand benedenrand (m +NAP)	afvoer bovenrand (m ³ /s)	waterstand benedenrand (m +NAP)
S_750	767,24	15,35	784,85	7,91	843,97	1,00
S1300	1311,37	17,076	1346,057	8,282	1421,575	1,424
S1700	1709,25	18,18	1752,321	9,517	1828,014	1,736
S2100	2100,28	19,115	2149,583	10,368	2225,72	2,06
S2500	2496,46	19,863	2553,509	11,113	2642,257	2,384
SD3200	3192,77	20,645	3251,198	11,655	3111,96	2,634
SD4100	4088,48	21,715	4091,212	12,171	3902,923	3,211

Tabel 11 Berekening van de kunstmatige laterale onttrekkingen voor de hoogwaterreferenties (behalve in de laatste kolom zijn dit afgeronde waardes).

	deel-model	Q boven (m ³ /s)	Q beneden (m ³ /s)	dQ (m ³ /s)	som Qlat (m ³ /s)	Q tvvl totaal (m ³ /s)	aantal kunstm. ontr.	Q tvvl per locatie (m ³ /s)
SD3200	A	3202	3174	28	175	-203	4	-50,869
	B	3251	3086	165	150	-315	19	-16,577
	C	3112	3084	28	227	-256	21	-12,172
SD4100	A	4101	4119	-18	219	-201	4	-50,176
	B	4091	3854	237	183	-420	19	-22,110
	C	3903	3855	48	169	-217	21	-10,322

6.5 Initiële condities

Als initiële condities worden, net als in het 40 m model van de gehele Maas, velden van waterstanden en stroomsnelheden opgelegd (in de vorm van *samples*, xyz-waardes). Daarnaast worden initiële stuwstanden opgegeven via de invoerbestanden voor de stuwgeometrie. De waardes zijn het resultaat van de ingespeelde berekeningen (30 d) met de huidige modelschematisaties (beno22_6-v2a).

De naamgeving van de bestanden met de nieuwe initiële condities is dezelfde als voor het gehele model met 40-m-rooster (paragraaf 2.3), behalve dat de letter A, B of C is toegevoegd om aan te geven bij welk deelmodel de initiële condities horen:

A_S1300.xyz (waterstanden),
A_S1300_x.xyz (snelheden in x-richting),
A_S1300_y.xyz (snelheden in y-richting),
Maas_structures_A_S1300.ini (initiële stuwstanden),

waarbij achter de "S" de afvoer van de betreffende berekening staat. De namen hierboven zijn dus een voorbeeld voor de standaard som "S1300" en deelmodel A. In het geval van de hoogwaterreferenties wordt "SD" gebruikt in plaats van "S".

6.6 Numerieke instellingen

De constante achtergrondwaarde voor de viscositeitsberekening (*vicouv*) kan bij een fijner rooster worden vergroot om de berekende waterstanden te corrigeren voor de hogere roosterresolutie (zie ook paragraaf 5.4.4). In het volledige 40 m model wordt een waarde van 0,1 m²/s gebruikt, zoals bepaald door Minns et al. (2022). In de deelmodellen voor de Rijntakken en Maas is deze waarde verhoogd naar 0,4.

Dit heeft geresulteerd in een aanzienlijke verhoging van de waterstanden en daarmee reductie van de waterstandsverschillen tussen 20 m en 40 m model. Daarnaast worden hiermee waterstandsfluctuaties in de deelmodellen verminderd.

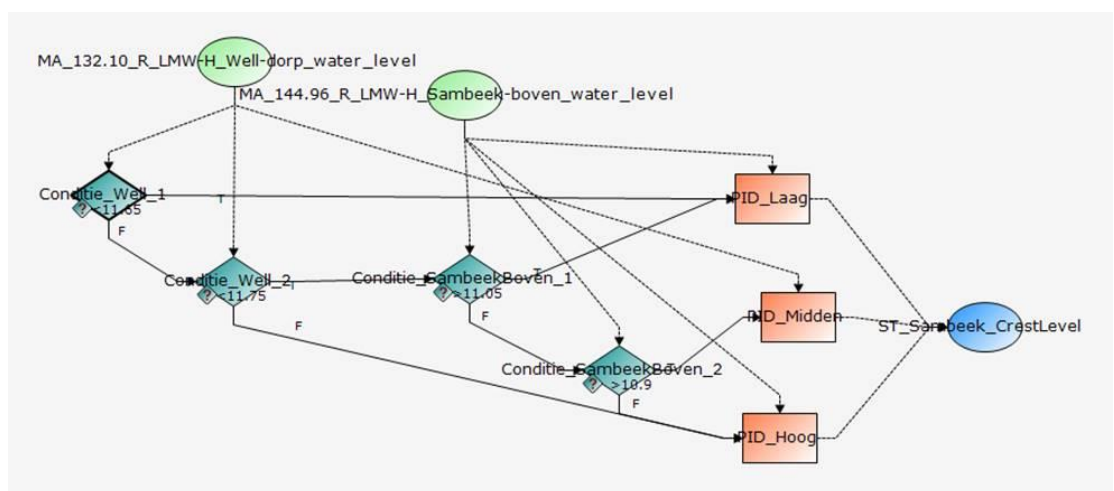
6.7 Aanvullende aanpassingen aan de deelmodellen

Er waren enkele aanvullende aanpassingen aan de deelmodellen nodig ten opzichte van de schematisatie van het totaalmodel met 40-m-rooster :

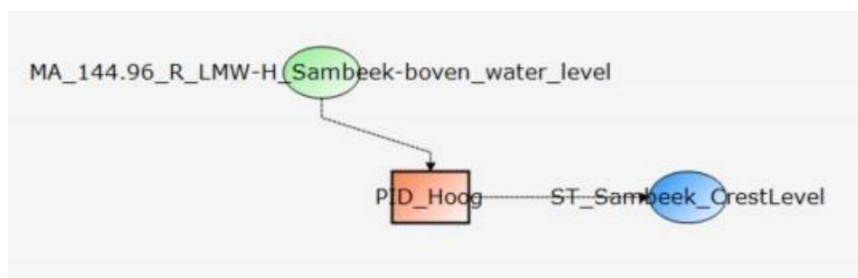
- In deelmodel C wordt stuw Sambeek gestuurd op onder andere de waterstanden van LMW-station Well-dorp, dat buiten het domein van dat deelmodel ligt (Figuur 55). In deelmodel B gebruikt keersluis Mook de waterstanden van LMW-station Mook als invoer voor de stuwsturing, ook dat valt buiten het modeldomein. Daarom is de sturing in D-RTC aangepast.

- Voor alle randvoorwaarden die voor de deelmodellen gemaakt zijn (paragrafen 5.4.3 en 5.4.8) blijft stuw Sambeek in het hoge afvoerbereik, waarin op station Sambeek boven wordt gestuurd. Daarom kan voor de deelmodellen worden volstaan met een sturing die alleen dat afvoerbereik bevat. De PID-controllers voor de afvoerbereiken “laag” en “midden” zijn uit de sturing verwijderd (Figuur 56).
- Voor keersluis Mook is de verhouding van de waterstanden bij LMW-station Mook en bij het meest benedenstroomse observatiepunt in deelmodel B (MA_165.20, dat is 600 m bovenstrooms van LMW-station Mook, Figuur 57 links boven) bepaald. Keersluis Mook start te sluiten bij een waterstand van 8,25 m+NAP bij het LMW-station en is volledig gesloten bij een waterstand van 8,30 m+NAP. Deze waarden zijn vertaald naar observatiepunt MA_165.20 met de verhouding tussen de waterstanden bij het LMW-station en het observatiepunt (0,999554), zie Figuur 57 rechts en onder.

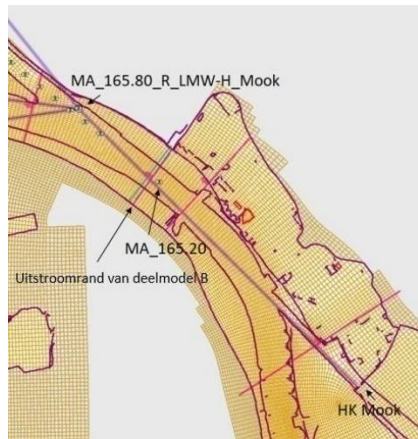
Vanwege een bug in D-HYDRO die bij partitioneringsgrenzen optreedt die over kunstwerken heen lopen is de partitionering voor alle deelmodellen handmatig aangemaakt. Inmiddels is versie 2023.01 beschikbaar, waarin deze fout is opgelost. Dit is echter nog niet in detail getest met het Maas-model.



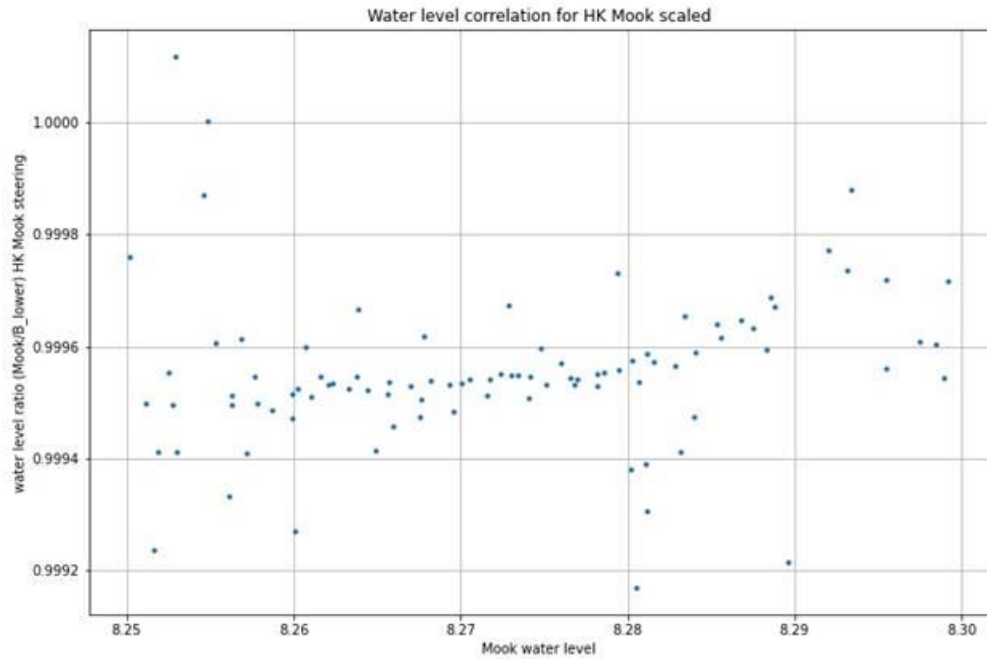
Figuur 55 Volledige stuwsturing voor stuw Sambeek, zoals gebruikt in beno22.



Figuur 56 Vereenvoudigde stuwsturing voor deelmodel C.



water_level [i] [-]	GateOpeningWidth [o] [-]
8.254	11
8.304	0

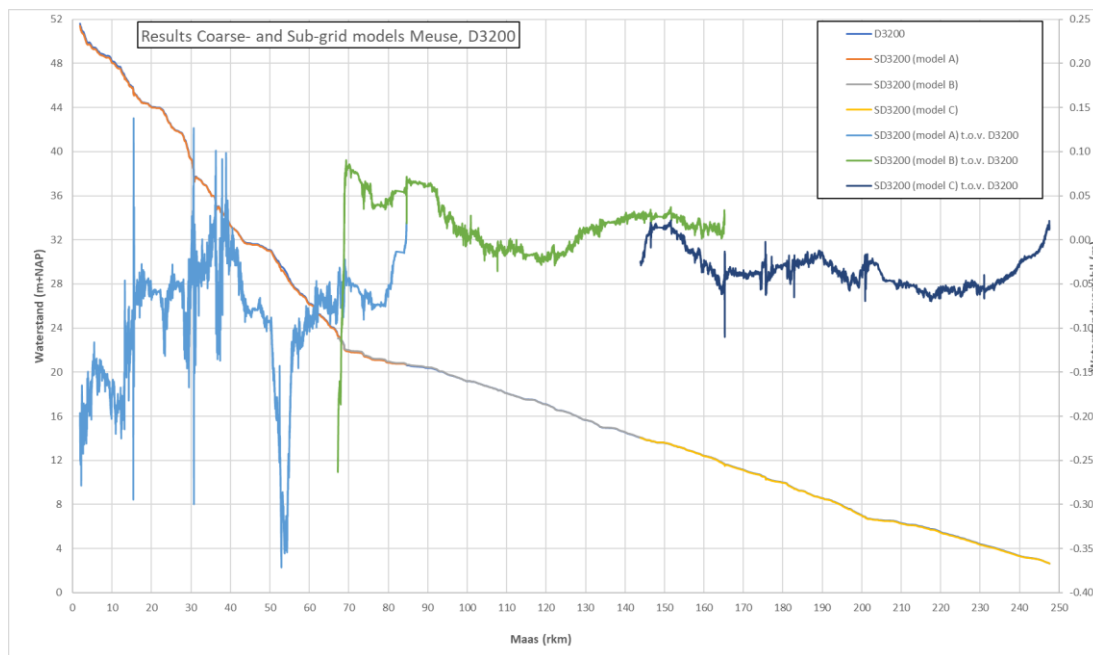


Figuur 57 Locatie LMW-station Mook, uitstroomrand deelmodel B en observatiepunt MA_165.20 (links boven). Nieuwe lookup table voor de D-RTC sturing in deelmodel B (rechts boven). Verhouding van de waterstanden (onder).

7 Resultaten deelmodellen

7.1 Waterstandsverschillen

De maximale waterstanden (max13) in de as van de Maas uit de dynamische simulaties met het hele beno22-model zijn vergeleken met de laatste waterstanden (last25) uit de stationaire simulaties met de deelmodellen. De volgende figuren tonen zowel de absolute waterstanden als de waterstandsverschillen.



Figuur 58 Waterstanden (absoluut en verschillen), simulaties 3.200 m³/s, 40 m Maasmodel en drie deelmodellen.

Deelmodel C heeft een goede overeenkomst met het gehele Maasmodel. De waterstand is gemiddeld 3,4 cm lager dan de waterstand in het gehele Maasmodel. Over het grootste deel van deelmodel C zijn de verschillen kleiner dan 5 cm, behoudens de uitschieter bij rkm 165 (11 cm) en het traject tussen rkm 214 en rkm 235, waar de verschillen oplopen tot 7 cm.

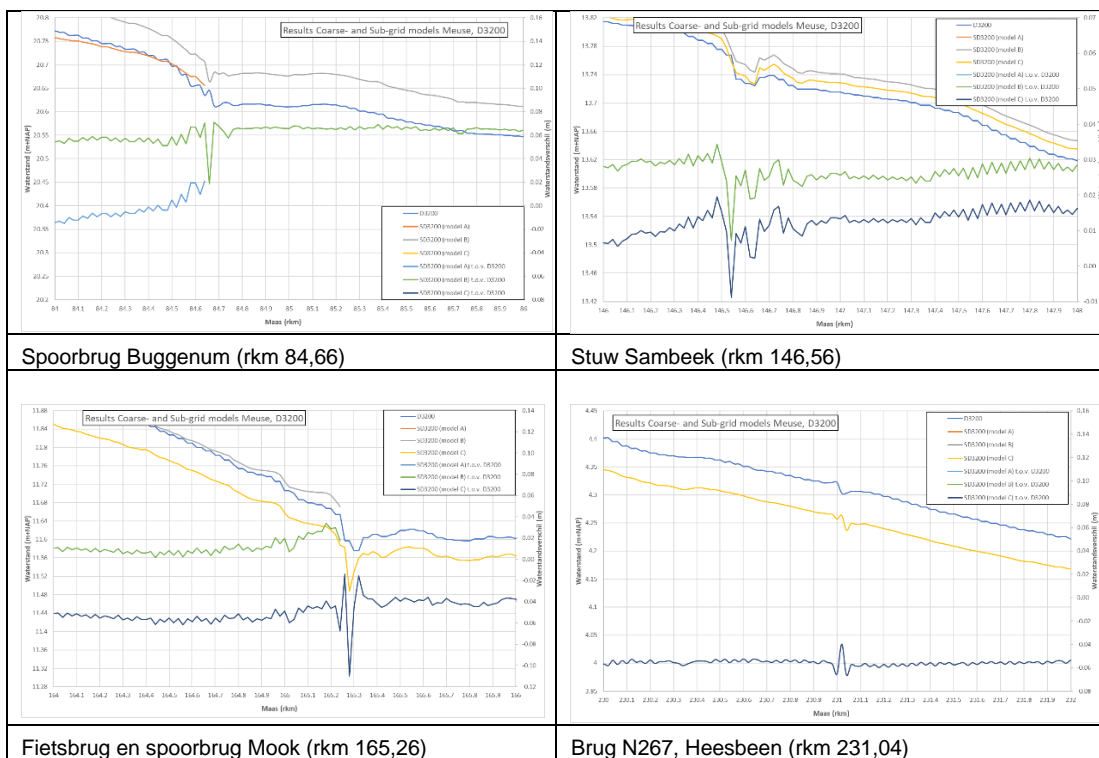
Bij deelmodel B is de overeenkomst zeer goed op het traject rkm 95 – 165; hier liggen de waterstanden een paar cm boven of onder de waterstanden van het gehele Maasmodel. Bovenstrooms liggen de waterstanden in deelmodel B 6-9 cm hoger dan in het gehele Maasmodel. Het gemiddelde verschil voor het hele deelmodel komt hiermee uit op 1,5 cm wat beter is dan de prestatie van deelmodel C. De verklaring ervoor dat de waterstanden tussen rkm 95 – 130 lager liggen dan in het model van de gehele Maas is waarschijnlijk de weergave van het zomerbed en de oevers in Venlo. In dit traject is sprake van weinig tot geen winterbed doordat de Maas hier ingesnoerd ligt tussen de waterkeringen van Venlo. Het stroombeeld wordt dus geheel bepaald door de weergave van het zomerbed, en dan blijkt dat het zomerbed en de oevers in het deelmodel net anders worden weergegeven dan in het gehele Maasmodel, als gevolg van de hogere roosterresolutie. In paragraaf 7.3 wordt hier nader op ingegaan. Ter plekke van de instroom van deelmodel B (rkm 68) is een groot verschil zichtbaar, maar het effect hiervan blijft zeer lokaal. De oorzaak is de verdeling van de afvoer over de instroomrand, in combinatie met de stroomrichting, die in werkelijkheid afwijken van de manier hoe de randvoorwaarde wordt opgelegd in D-HYDRO.

Het is niet gelukt dit verder te verbeteren. Omdat het verschil maar over een zeer korte afstand zichtbaar is en er een overlap van 20 km bestaat tussen de deelmodellen, is besloten om dit te accepteren, onder de voorwaarde dat voor ingrepen rond rkm 70 deelmodel A wordt gebruikt. Ook bij brug Buggenum (rkm 84) is een sprong zichtbaar.

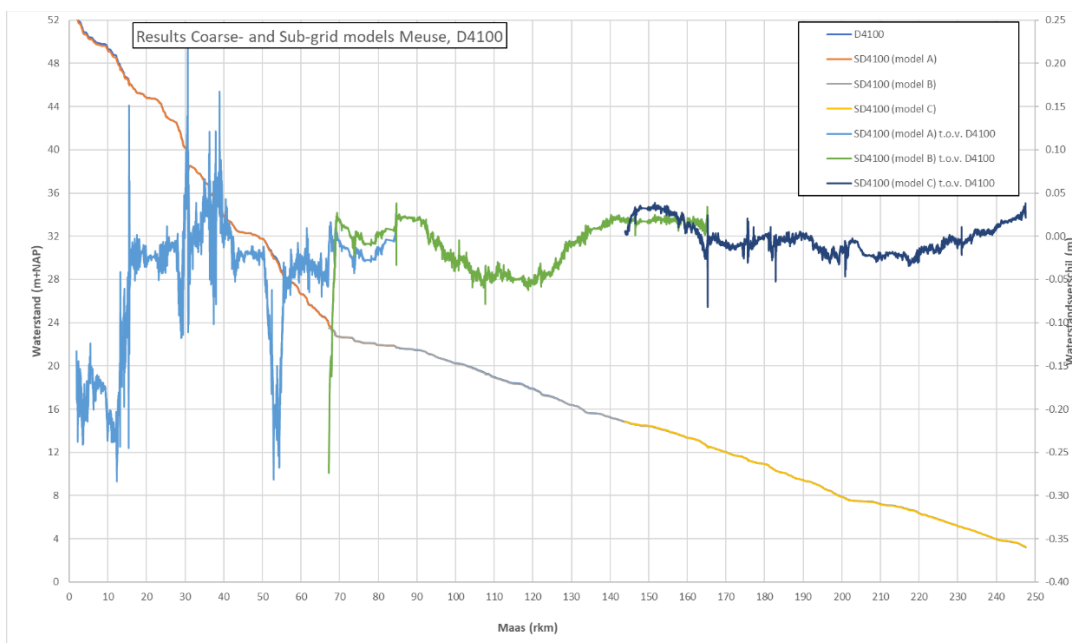
De waterstanden in het overlapgebied tussen deelmodellen B en C verschillen omdat de afvoeren verschillen (zie paragraaf 7.2.1). Dit komt omdat er bij benadering rekening is gehouden met topvervlakking (paragraaf 5.4.6).

De overeenkomst tussen deelmodel A en het gehele Maasmodel is minder goed met een gemiddeld verschil van -14.9 cm. In het bovenstroomse deel (rkm 2 – 15) liggen de waterstanden in het deelmodel 15-25 cm lager dan in het gehele Maasmodel. De oorzaak hier is de weergave van het zomerbed en de oevers in Maastricht die in het deelmodel anders uitpakt dan in het gehele Maasmodel. In de omgeving van Roosteren (rkm 50 – 65) wordt het verschil in waterstanden (tot 35 cm lager) voor een groot deel veroorzaakt doordat het Oude Maasje bij Aasterberg/Ohé en Laak (maatregel Contelmo) en de maatregel Heerenlaak meer afvoer trekken in het deelmodel dan in het gehele Maasmodel. Met een modelmaatregel in Baseline is de doorstroming bij beide maatregelen in het 40 m model al verbeterd, maar de doorstroming blijft beter met de hogere roosterresolutie van het deelmodel. Verder vallen de uitschieters bij stuw Borgharen (rkm 15) en bij Meers (rkm 30) op.

In de waterstandsverschilfiguren komen enkele in het oog springende spikes voor, bijvoorbeeld bij rkm 84,7, rkm 146,6, rkm 165,3 en rkm 231. Dit zijn locaties waar infrastructurele objecten in de schematisatie voorkomen. Een beoordeling van de lokale waterstanden laat zien dat hier resolutie een grote rol speelt. De deelmodellen hebben ten opzichte van het gehele Maasmodel een twee keer zo hoge resolutie, wat betekent dat bij een object veranderingen in waterstanden in meer detail worden weergegeven. Daarnaast is het aannemelijk dat het object zelf ook in meer detail wordt weergegeven in het deelmodel en mogelijk net op een andere locatie wordt geprojecteerd (één cel verderop). Voor de vier genoemde locaties tonen de onderstaande figuren in detail de sprongen in waterstanden bij verschillende objecten en wat dit betekent voor de verschillen tussen het gehele Maasmodel en de deelmodellen.



Figuur 59 Waterstandsverschillen geheel Maasmodel en deelmodellen bij kunstwerken.



Figuur 60 Waterstanden (absoluut en verschillen), simulaties 4.100 m³/s, 40 m Maasmodel en drie deelmodellen.

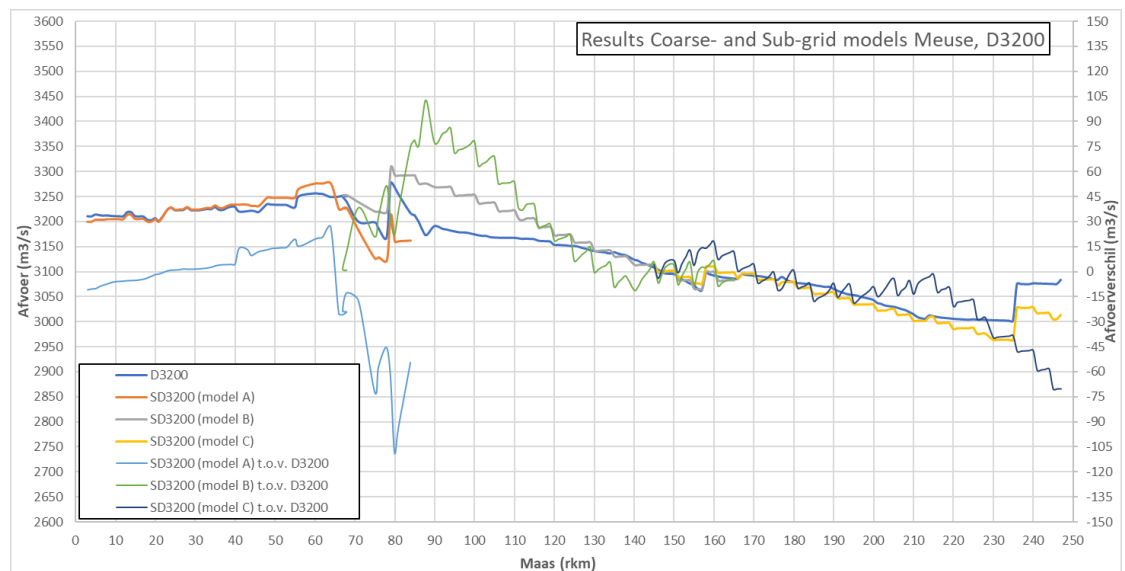
De resultaten bij een afvoer van 4.100 m³/s (zie Figuur 60) laten op hoofdlijnen dezelfde patronen en verschillen zien als bij een afvoer van 3.200 m³/s. De gemiddelde verschillen zijn minder groot en bedragen respectievelijk 0,0, -1,0 en -5,1 cm (deelmodel C, B en A). Nu heeft deelmodel C de beste overeenkomst met het geheel Maasmodel, met als kanttekening dat deelmodel B eigenlijk net zo goed is wanneer alleen naar het gemiddelde verschil wordt gekeken.

De grootste afwijking in deelmodel B is in het traject rkm 95 – 130 waar nog altijd sprake is van een structureel lagere waterstand. Deelmodel A kent nog altijd de grootste waterstandsverschillen ten opzichte van het gehele Maasmodel.

7.2 Afvoerverschillen

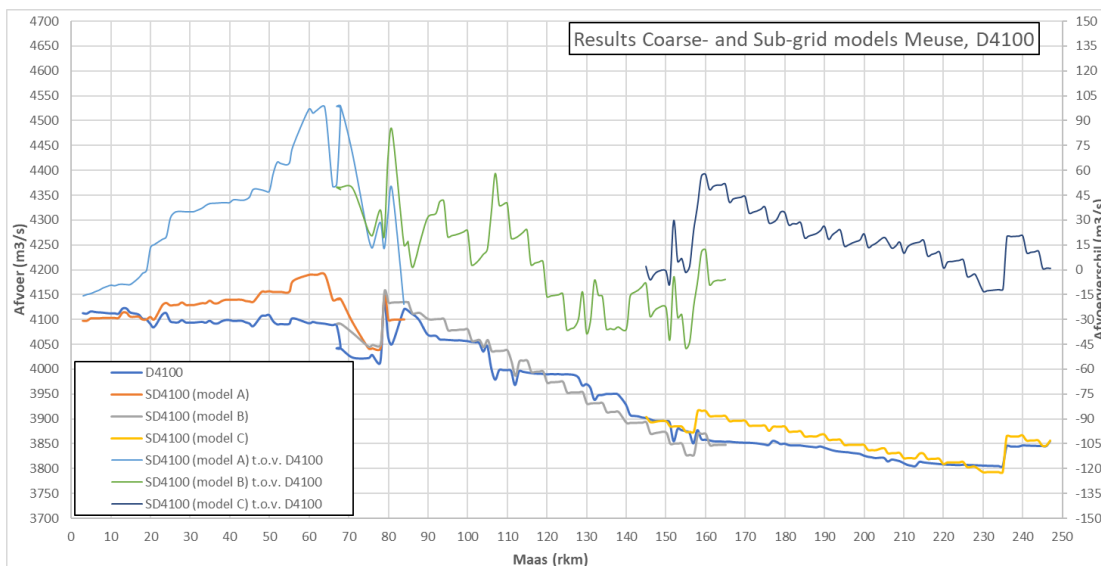
7.2.1 Afvoeren in de Maas

De maximale afvoeren (max13) in de as van de Maas uit de dynamische simulaties met het hele beno22-model zijn vergeleken met de laatste afvoeren (last25) uit de stationaire simulaties met de deelmodellen. De volgende figuren tonen zowel de absolute afvoeren als de afvoerverschillen.



Figuur 61 Afvoeren (absoluut en verschillen), simulaties 3.200 m³/s, 40 m Maasmodel en drie deelmodellen.

In Figuur 61 is zichtbaar dat de verschillen in afvoeren relatief beperkt zijn. Deelmodel C heeft de beste overeenkomst met het gehele Maasmodel. In deelmodel A wordt tussen rkm 65 en 80 iets te veel afvoer onttrokken volgens de aanpak voor de modellering van topvervlakking (paragraaf 5.4.6). Iets soortgelijks speelt tussen rkm 210 en 245. In het gehele Maasmodel blijft de afvoer hier constant, terwijl in deelmodel C nog altijd afvoer wordt onttrokken met de kunstmatige lateralen. Bij zowel deelmodel A als deelmodel C komt de afvoer aan het einde van het model niet helemaal overeen met de afvoer in het model van de gehele Maas. De oorzaak hiervoor is waarschijnlijk de manier hoe de invloed van de topvervlakking is bepaald, en met name hoe de echte laterale toestromingen daarin zijn meegenomen. Verbetering hiervan blijkt echter lastig.



Figuur 62 Afvoeren (absoluut en verschillen), simulaties 4100 m³/s, 40 m Maasmodel en drie deelmodellen.

De resultaten bij een afvoer van 4.100 m³/s (zie Figuur 62) laten op hoofdlijnen dezelfde patronen zien als bij een afvoer van 3.200 m³/s. Gemiddeld heeft deelmodel B de beste overeenkomst met het gehele Maasmodel. De verschillen op de benedenranden van de deelmodellen zijn minder groot dan voor de afvoer van 3.200 m³/s. Tussen rkm 15 en 65 vindt nu ook in het 40 m totaalmodel enige topvervlakking plaats. Door de vereenvoudigde aanpak om de hele topvervlakking in dit deelmodel op het meest benedenstroomse traject (rkm 65-80) toe te passen loopt de afvoer in het deelmodel tot aan rkm 65 te ver op. Dit wordt geaccepteerd omdat het verschil in waterstand klein blijft.

7.2.2 Nevengeulen en andere ingreeplocaties

Op verschillende locaties in het Maasmodel is sprake van nevengeulen en andere ingreeplocaties zoals retentiegebieden. Doordat hier *cross-sections* zijn opgenomen is het mogelijk om de resultaten van het gehele Maasmodel te vergelijken met de deelmodellen. Deze vergelijking is in Tabel 12 en Tabel 13 gemaakt. Voor de nieuwe kunstwerken bij de in- en uitlaten van maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo wordt deze vergelijking in paragraaf 7.2.3 gemaakt.

Tabel 12 Vergelijking van afvoeren door verschillende cross-secties tussen het gehele Maasmodel en de deelmodellen, afvoer 3.200 m³/s

Cross-sectie	Maasmodel	Deelmodel A		Deelmodel B		Deelmodel C	
	D3200	SD3200	Vershil	SD3200	Vershil	SD3200	Vershil
Nevengeul_Maasband	719	770	+51	-	-	-	-
Nevengeul_Visserweert	755	745	-10	-	-	-	-
Instream_LKWz	111	96	-15	0	-111	-	-
Instream_LKWn	14	-	-	0	-14	-	-
Instream_Ooijen	237	-	-	250	+13	-	-
Uitstroom_Blitterswijk	101	-	-	126	25	-	-
Uitstroom_Wanssum	134	-	-	112	-22	-	-
Instream_LvG	0	-	-	-	-	0	0

Tabel 13 Vergelijking van afvoeren door verschillende cross-secties tussen het gehele Maasmodel en de deelmodellen, afvoer 4.100 m³/s

Cross-sectie	Maasmodel	Deelmodel A		Deelmodel B		Deelmodel C	
	D4100	SD4100	Vershil	SD4100	Vershil	SD4100	Vershil
Nevengeul_Maasband	956	1034	+78	-	-	-	-
Nevengeul_Visserweert	981	974	-7	-	-	-	-
Instroom_LKWz	274	299	+25	225	-49	-	-
Instroom_LKWn	28	-257	-284	-260	-288	-	-
Instroom_Ooijen	436	-	-	446	10	-	-
Uitstroom_Blitterswijk	179	-	-	200	21	-	-
Uitstroom_Wanssum	272	-	-	235	-36	-	-
Instroom_LvG	56	-	-	0	-56	0	-56

Bij het beoordelen van de debieten moet rekening worden gehouden met het feit dat de debieten van de dynamische simulatie met het gehele Maasmodel de maximale debieten betreffen tijdens de simulatie. De piekafvoeren op instroomlocaties treden niet altijd op hetzelfde moment op als de piekafvoer in het zomerbed (die wordt overgenomen in de stationaire simulaties met de deelmodellen). Dit verschil verklaart de relatief grote afwijking tussen de maximale afvoer door LKWz in het gehele Maasmodel (111 m³/s) en deelmodel B (0 m³/s) in de simulatie met 3.200 m³/s en door LKWn in de simulatie met 4.100 m³/s. Op de overige locaties komen de resultaten goed met elkaar overeen.

7.2.3 Nieuwe kunstwerken

Ten opzichte van het model beno19 zijn in beno22 de ontbrekende kunstwerken bij de in- en uitlaten van maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo toegevoegd aan de schematisatie in D-HYDRO (paragraaf 2.4). De geulen waarin deze kunstwerken liggen komen in het 40 m model van de gehele Maas minder nauwkeurig terug dan in de deelmodellen (paragraaf 7.3.1). Onderstaande tabellen laten zien dat daardoor in het 40 m model minder afvoer door deze maatregelen stroomt dan in deelmodel A, ondanks de modelmaatregelen waarmee de doorstroming in deze geulen al is verbeterd. Dit veroorzaakt grote waterstandsverschillen bij Roosteren (rkm 50-65, paragraaf 7.1). Door het kunstwerk Contelmo Noord stroomt geen water, omdat de waterstand in de berekeningen D3200/S3200 en D4100/S4100 onder de drempel van het kunstwerk blijft. Pas bij nog hogere afvoeren (D6000/S6000 in het 40 m model van de gehele Maas) overstroomt deze drempel.

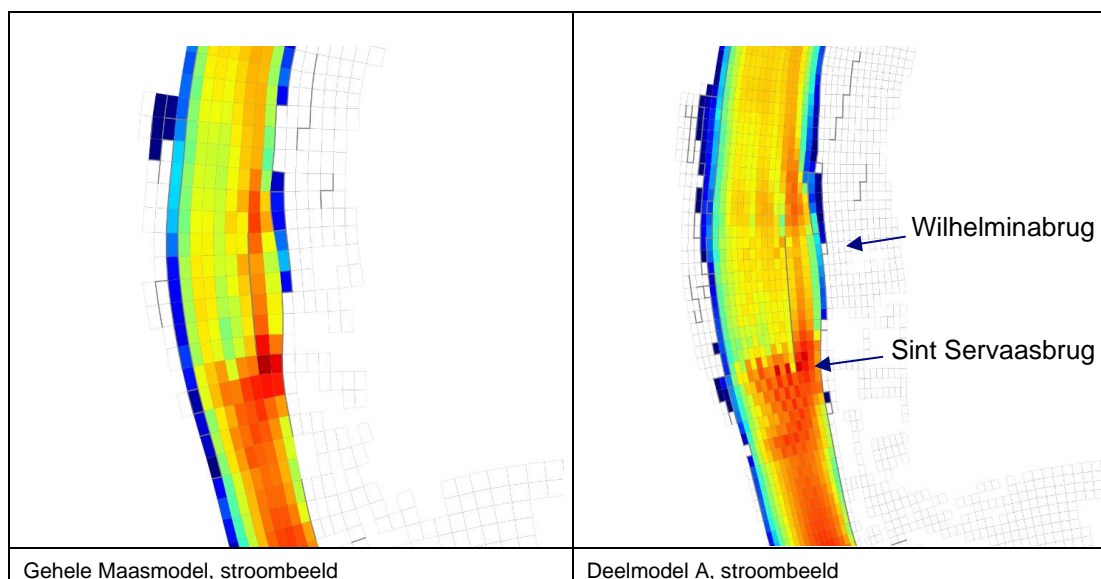
kunstwerken	model gehele Maas (m ³ /s)	Deelmodel A (m ³ /s)	
	D3200	SD3200	Vershil
Inlaat Elerweerd	59	134	+74
Uitlaat Elerweerd	47	218	+171
Inlaat Heerenlaak	356	426	+69
Uitlaat Heerenlaak	318	430	+111
Contelmo Zuid	271	301	+30
Contelmo Noord	0	0	0

kunstwerken	model gehele Maas (m ³ /s)	Deelmodel A (m ³ /s)	
	D4100	SD4100	Vershil
Inlaat Elerweerd	76	128	+52
Uitlaat Elerweerd	67	362	+295
Inlaat Heerenlaak	366	417	+51
Uitlaat Heerenlaak	315	476	+161
Contelmo Zuid	367	446	+79
Contelmo Noord	0	0	0

7.3 Discussie

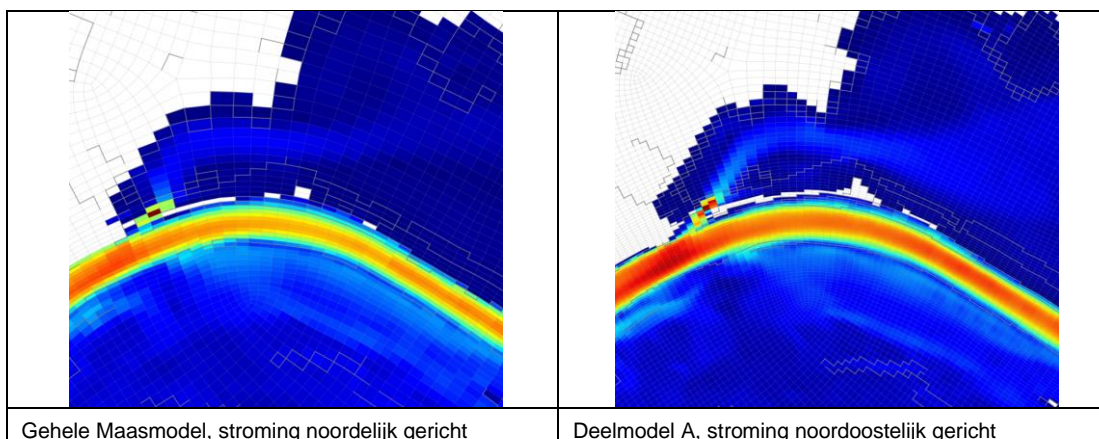
7.3.1 Invloed resolutie op stroombeeld

Zoals bij het bespreken van de resultaten (zie paragraaf 7.1) al aan de orde kwam, is er een opvallend verschil in berekende waterstanden tussen het gehele Maasmodel en deelmodel A, met name in Maastricht. Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in de resolutie van het deelmodel. De hogere resolutie vertaalt zich in een iets andere ligging van de oever en daardoor een iets breder zomerbed (n.b. lokaal kan het zomerbed ook smaller worden door een hogere resolutie). En omdat zo goed als alle afvoer door het zomerbed stroomt heeft dit een relatief groot waterstandsverlagend effect tot gevolg. Figuur 63 laat het stroombeeld zien in Maastricht.



Figuur 63 Stroombeeld in Maastricht, simulaties 3.200 m³/s, stroomsnelheden en lijnelementen.

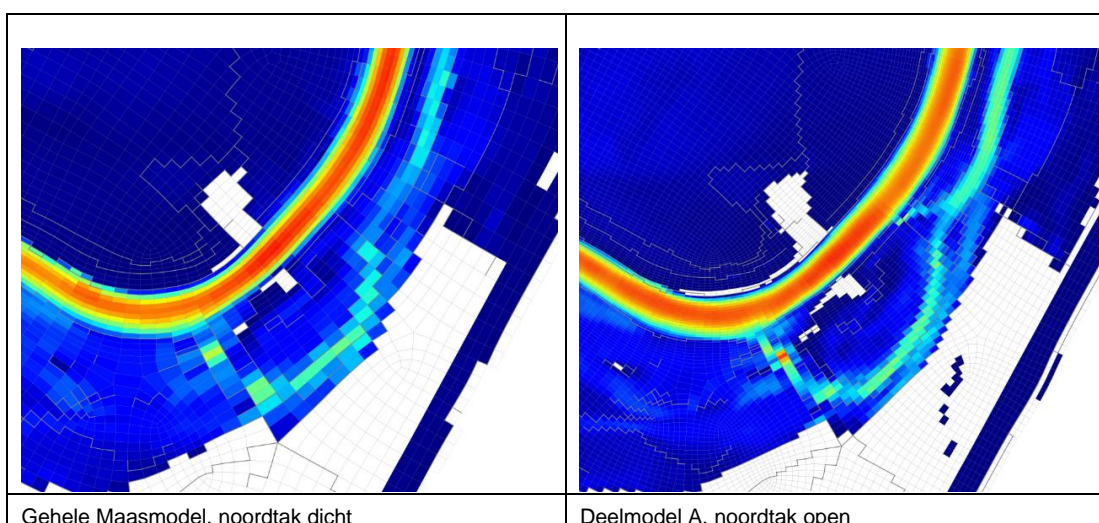
Tegenover Roosteren bevindt zich een inlaatwerk op de Vlaamse oever, inlaatwerk Heerenlaak. De oriëntatie van de wanden van het inlaatwerk in het deelmodel wijkt af van de oriëntatie in het gehele Maasmodel (Figuur 64), en daardoor zal ook de afvoer door het inlaatwerk in beide modellen anders zijn.



Gehele Maasmodel, stroming noordelijk gericht Deelmodel A, stroming noordoostelijk gericht

Figuur 64 Stroombeeld bij Heerenlaak, simulaties 3.200 m³/s, stroomsnelheden en overlaten.

Iets stroomafwaarts van Heerenlaak ligt bij Aasterberg de rivierkundige maatregel Contelmo, een ingreep waarmee Maaswater naar het Oude Maasje wordt geleid. Voor Contelmo Zuid geldt dat deze in deelmodel A meer afvoer trekt dan in het gehele Maasmodel. De oorzaak hiervan is dat het aanvoerkanaal van Contelmo Zuid in deelmodel A in meer detail terugkomt dan in het 40 m gehele Maasmodel (Figuur 65). Door middel van een modelmaatregel is ervoor gezorgd dat het noordelijke afvoerkanaal ook in het gehele Maasmodel open is. Echter wordt de drempel van het kunstwerk in zowel het gehele model als het deelmodel niet overstroomt, omdat de waterstanden daarvoor te laag zijn. In Figuur 65 (rechts) is echter te zien dat er in deelmodel A alsnog water door het aanvoerkanaal stroomt. Nader onderzoek laat zien dat dit wordt veroorzaakt doordat het kunstwerk niet goed aansluit bij hoge grond of een hoge kade. In het 40 m model van de gehele Maas is de aansluiting wel goed. Daardoor stroomt er in deelmodel A ongeveer 35 m³/s meer afvoer door dit aanvoerkanaal. Er is in overleg met RWS besloten dit nu niet te corrigeren.

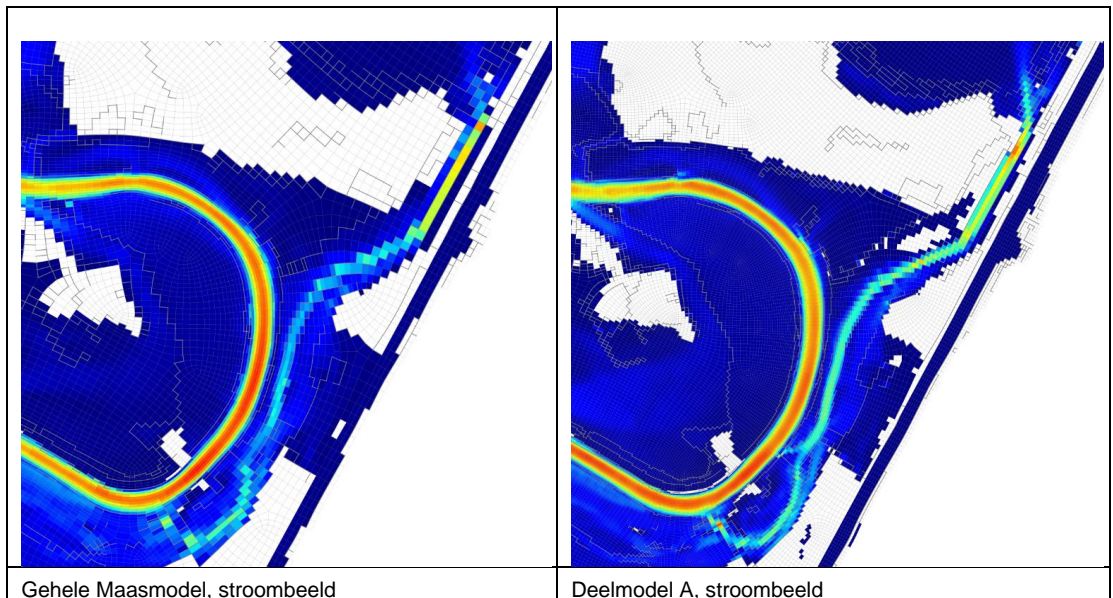


Gehele Maasmodel, noordtak dicht

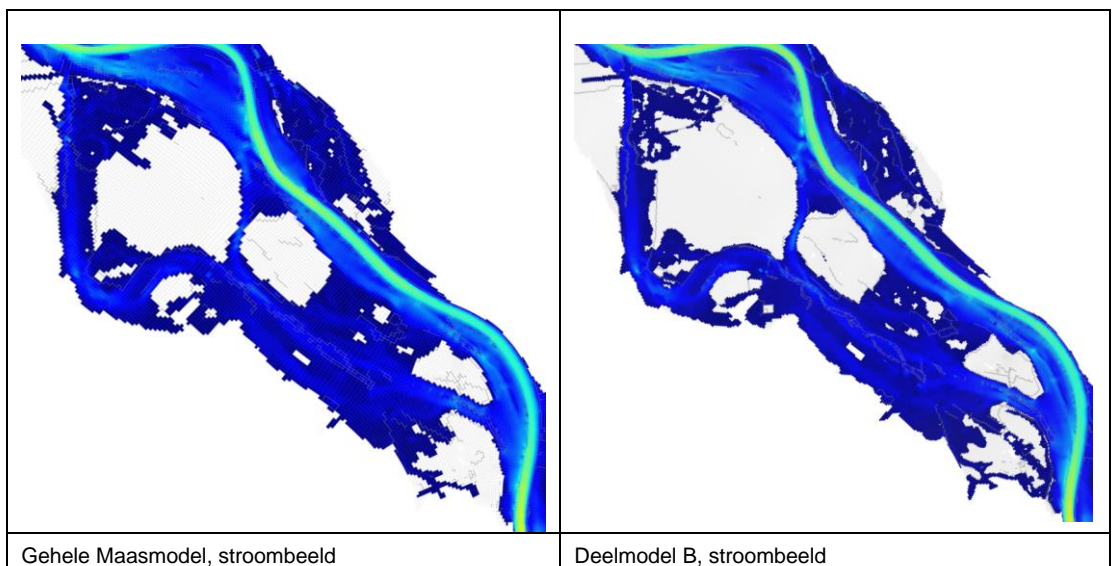
Deelmodel A, noordtak open

Figuur 65 Stroombeeld bij Contelmo, simulaties 3.200 m³/s, stroomsnelheden en overlaten.

Bij het Oude Maasje was er in het 40 m model van de gehele Maas sprake van een deels afgesloten geul in het 40 m model doordat de oevers van de geul elkaar raakten. Dit is gecorrigeerd met een modelmaatregel, waardoor er nu ook in het 40 m model water door het Oude Maasje kan stromen (Figuur 66). Iets vergelijkbaars speelde bij Ooijen-Wanssum, waar de haven niet meer aangetakt was aan de Maas maar deels afgesloten was doordat de oevers elkaar raken in het gehele Maasmodel. Ook dit is gecorrigeerd met de modelmaatregel (Figuur 67).



Figuur 66 Stroombeeld in Oude Maasje, simulaties $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$, stroomsnelheden en lijnelementen.

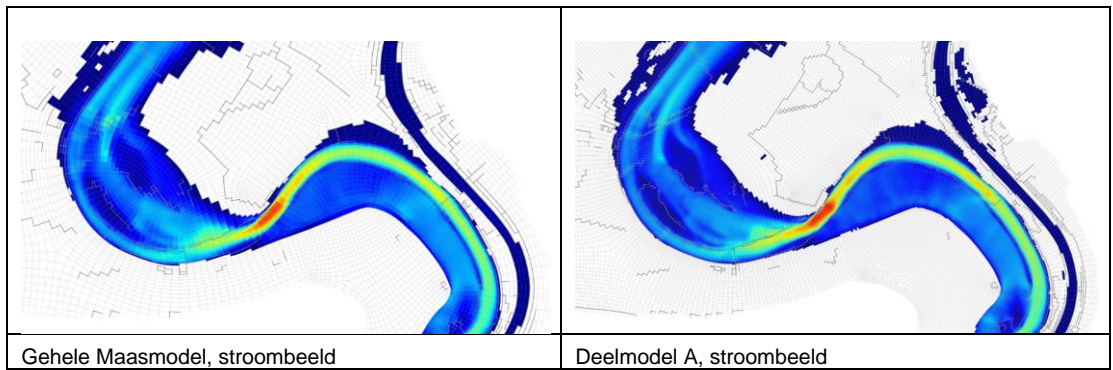


Figuur 67 Stroombeeld Ooijen - Wanssum, simulaties $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$, stroomsnelheden en lijnelementen.

7.3.2

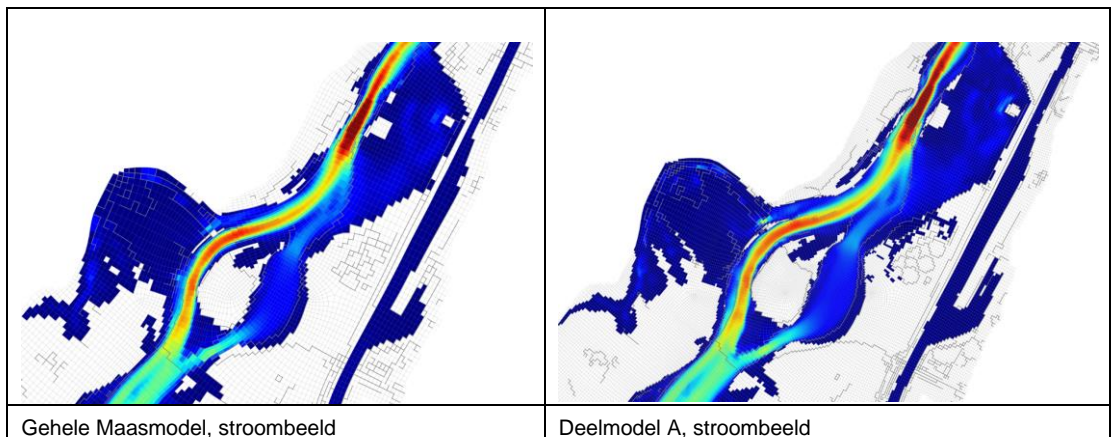
Overeenkomsten in stroombeeld

Een positief punt is de grote overeenkomst in stroombeelden, ook op plekken waar sprake is van zeer hoge stroomsnelheden. Een voorbeeld van zo'n plek is de bocht bij Meers waar stroomsnelheden worden berekend in de orde van 6 m/s . Beide modellen laten hier een vergelijkbaar stroombeeld zien (Figuur 68).

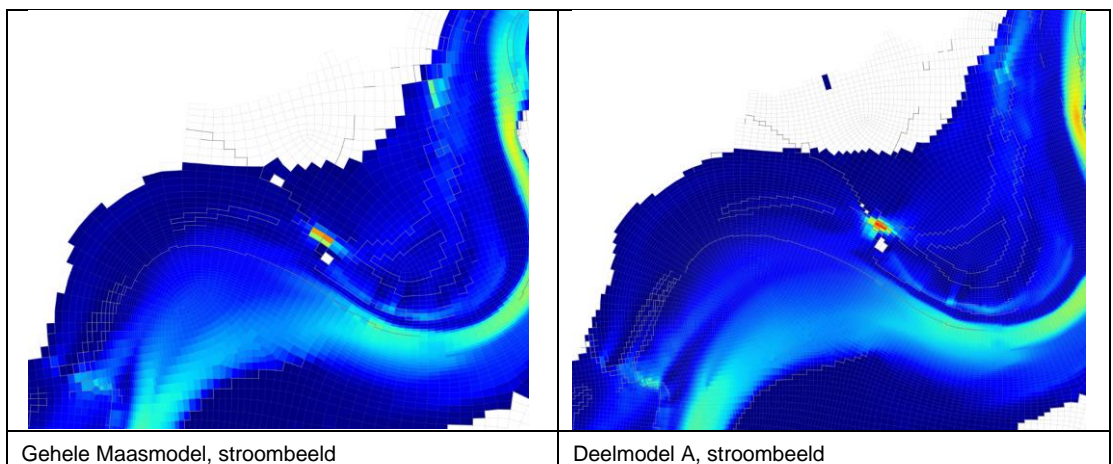


Figuur 68 Stroombeeld bij Meers, simulaties 3200 m³/s, stroomsnelheden en lijnelementen.

Ook op andere plekken in de Grensmaas is de overeenkomst in het algemeen goed te noemen, zie bijvoorbeeld bij Maasband – Urmond (Figuur 69) en Visserweert (Figuur 70).



Figuur 69 Stroombeeld bij Maasband, simulaties 3.200 m³/s, stroomsnelheden en lijnelementen.

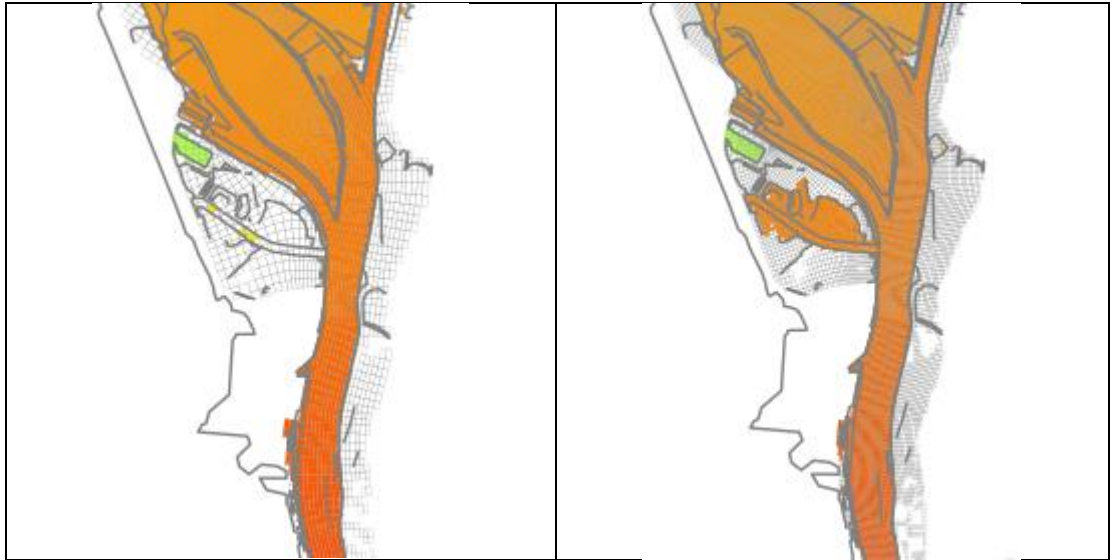


Figuur 70 Stroombeeld bij Visserweert, simulaties 3.200 m³/s, stroomsnelheden en lijnelementen.

7.3.3 Verschillen in inundatie

Een laatste vergelijking betreft de geïnundeerde gebieden in het gehele Maasmodel en de deelmodellen. Deze vergelijking wordt gemaakt voor een afvoer van 4.100 m³/s. Dan zijn de waterstandsverschillen het kleinst, en zou er dus een grote overeenkomst in inundatiegebieden moeten zijn. De volgende figuren tonen links het inundatiegebied van het gehele Maasmodel en rechts het inundatie-gebied van het corresponderende deelmodel.

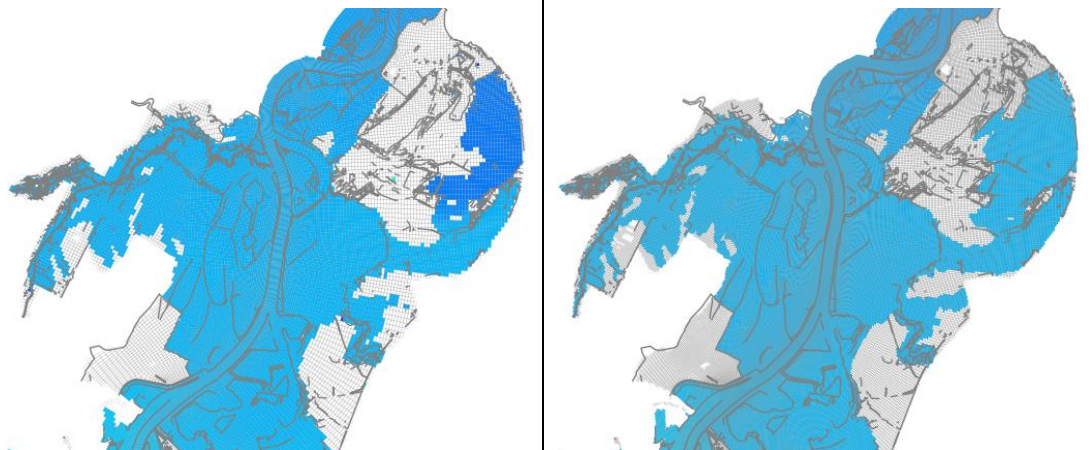
Het gebied tussen Gennep en Mook komt in twee deelmodellen voor en de vergelijking wordt ook voor beide deelmodellen gemaakt.



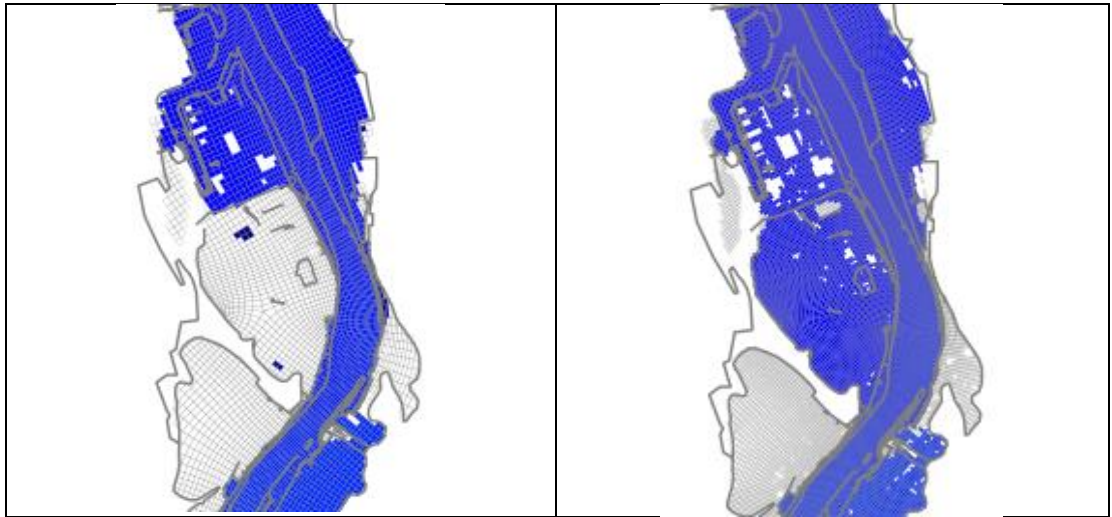
Boschpoort, inundatie in deelmodel A vanuit het Voedingskanaal



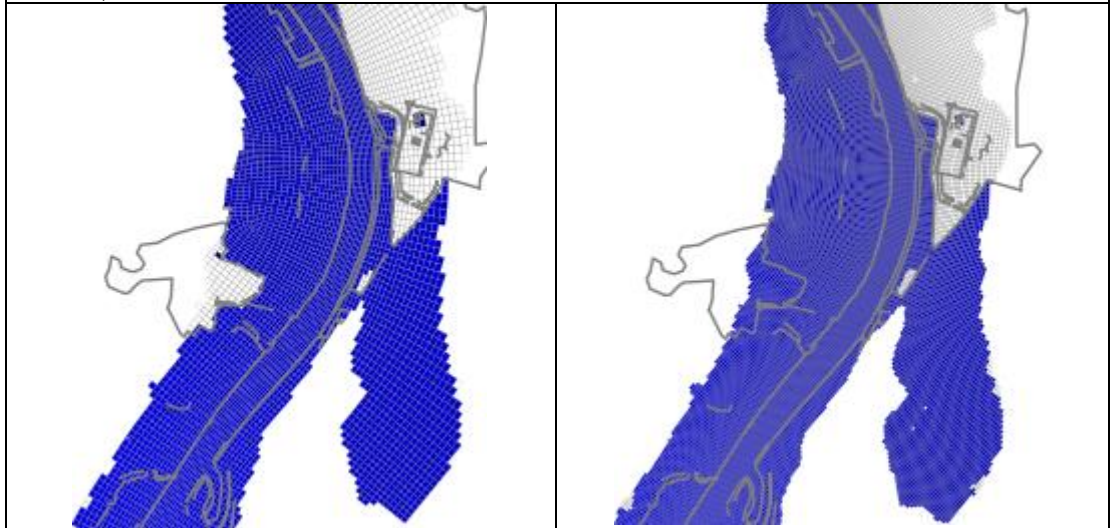
Haven Maasbracht, meer inundatie in gehele Maasmodel¹ dan in deelmodel A



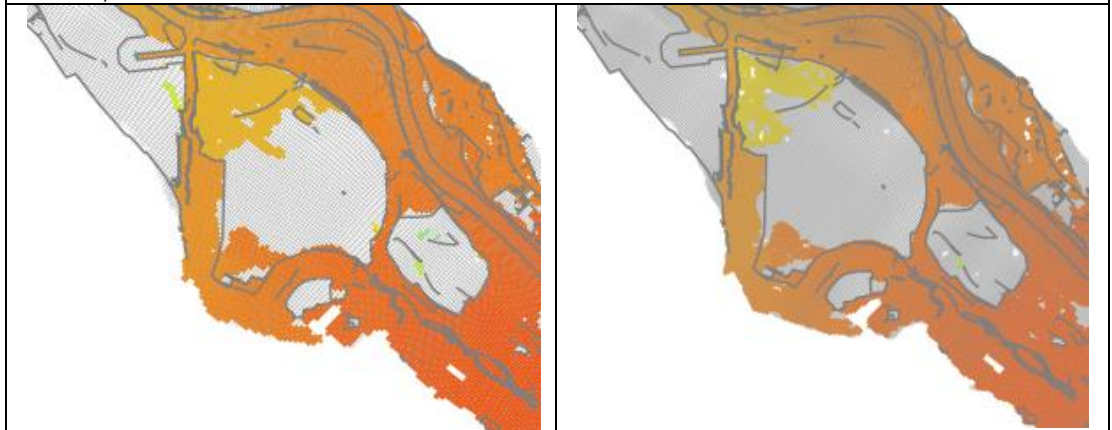
Beesels Broek, meer inundatie in deelmodel B²



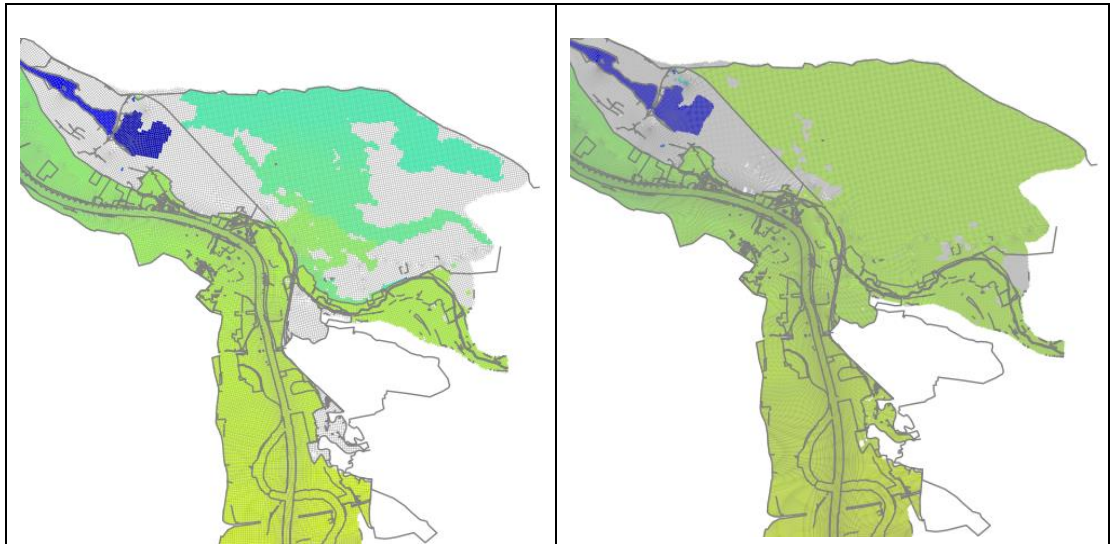
Blerick, inundatie in deelmodel B²



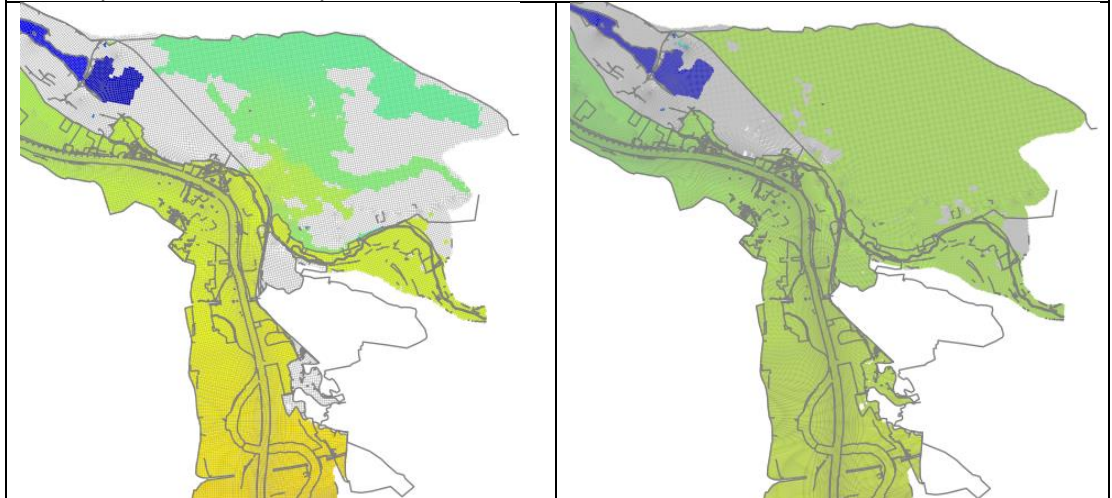
Lottum, inundatie in deelmodel B



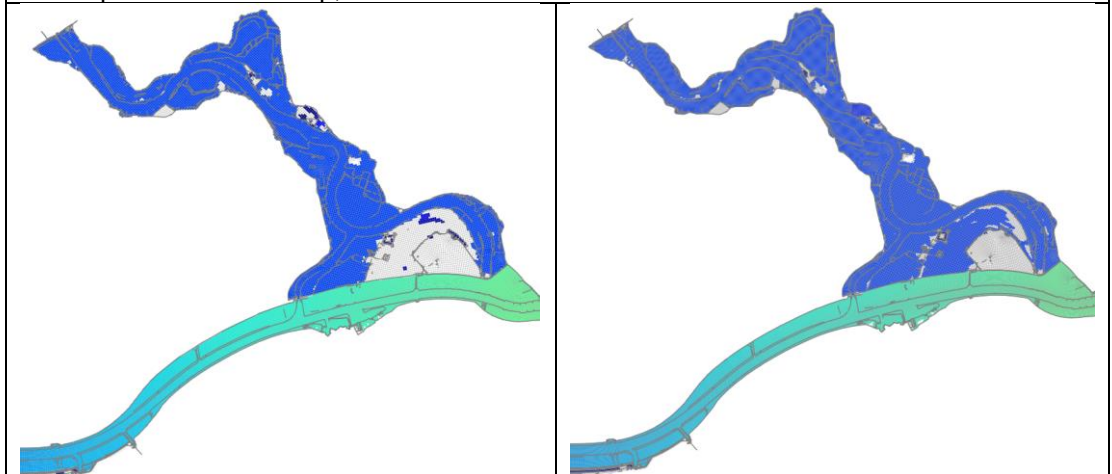
Inundatie Ooijen-Wanssum en Geijsteren in gehele Maasmodel groter dan in deelmodel B



Gennepep / Lob van Gennepep, inundatie in deelmodel B²



Gennepep / Lob van Gennepep, inundatie in deelmodel C²



Verskil in Afgedamde Maas, hogere waterstand in deelmodel C²

¹ Door de hogere waterstanden in het gehele Maasmodel is de waterstand binnen de waterkering hoger dan in het deelmodel met de stationaire simulatie.

² Hier is in het gehele Maasmodel sprake van een kortdurende en daardoor beperkte inundatie, als gevolg van de stationaire situatie in het deelmodel krijgt een gebied wel de tijd om geheel te vullen.

Figuur 71 Inundatie gehele Maasmodel (links) en deelmodel (rechts), afvoer 4100 m³/s.

Er zijn een paar constatering naast de twee hierboven genoemde. Bij Boschpoort is het voedingskanaal in het deelmodel open waardoor het achterliggende gebied kan vullen. In het gehele Maasmodel is het voedingskanaal afgesloten door twee overlaten.

De inundatie van Lottum in deelmodel B is opvallend. De waterstand is in het deelmodel iets lager dan in het gehele Maasmodel, terwijl Lottum in het gehele Maasmodel droog blijft. De oorzaak ligt in een deel van het kadetracé in het zuiden. In het deelmodel heeft de kering een hoogte van 17,91 m+NAP gekregen, terwijl de hoogte in het gehele Maasmodel circa 18,2 m+NAP is. Bij een waterstand van 18,08 m+NAP raakt Lottum dus overstroomd in het deelmodel.

In aanvulling op de ² bij de Afgedamde Maas nog één toelichting. In het gehele Maasmodel is de waterstand 3,56 m+NAP, in het deelmodel is dit 3,50 m+NAP. Het verschil van 6 cm komt doordat het water heel langzaam de uiterwaard heeft gevuld, iets wat beperkt zichtbaar is in het resultaat van het gehele Maasmodel.

7.4 Rekentijden

Tabel 14 presenteert de rekestijden voor de deelmodellen bij gebruik van vier partities op het Deltares rekencluster. Deelmodel A heeft de meeste rekestijd nodig, omdat de stroomsnelheden het hoogst zijn en daarom de tijdstap het kleinst. Toch is het ook voor dit deelmodel nog mogelijk om berekeningen in één nacht uit te voeren.

Omdat het gebruik van samples (in plaats van een *restart*-bestand) geen perfecte herstart is (zie ook paragraaf 2.3), duurt het 1-2 dagen (rekenperiode) om met de initiële condities weer tot een stationaire toestand te komen. Dit geldt ook als er grotere ingrepen worden toegevoegd. Een rekenperiode van 5 d lijkt daarom ook voor berekeningen met ingrepen voldoende.

Tabel 14 Rekestijd deelmodellen.

	deelmodel A (uur)	deelmodel B (uur)	deelmodel C (uur)	h6 cluster type	aantal partities	simulatieperiode (dagen)
SD3200	16,4	14,7	8,8	normal- e3-c7	4	5
SD4100	20,1	14,5	9,5	normal- e3-c7	4	5

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

8.1.1 Beno-model

Het model maas-beno22_6-v1a is – als eerste beno-model van de Maas – opgebouwd vanuit Baseline-NL. Ten opzichte van de voorloper, het beno19-model, is een aantal verbeteringen doorgevoerd. Zo zijn de kunstwerken bij de in- en uitlaatkanalen van maatregelen Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo opgenomen in de D-HYDRO-schematisatie en is de doorstroming bij deze maatregelen en bij de haven van Wanssum verbeterd met modelmaatregelen. Voor de stationaire berekeningen zijn er initiële condities gemaakt die beter passen bij de gewenste eindtoestand, waardoor de benodigde rekentijd aanzienlijk verkort kon worden. En er zijn verbeteringen doorgevoerd in zowel Baseline als D-RTC om handmatige aanpassingen aan de schematisatie na projectie met Baseline overbodig te maken.

De berekende waterstanden liggen over het algemeen lager dan in beno19. Benedenstreams van de Grensmaas gaat het om een verschil van enkele cm, dat veroorzaakt wordt door een structureel verschil in de hoogte van de zomerbedbodem en enkele lokale ingrepen in de uiterwaarden. Op de Grensmaas zijn de waterstandsverschillen groter, tot maximaal 70 cm. Op dit traject is, onder andere door het hoogwater van juli 2021, de bodemligging in het zomerbed sterk veranderd. Daarnaast zijn op enkele locaties maatregelen in de uiterwaard genomen. Bij Roosteren (rkm 50-55) worden de waterstanden significant hoger (tot 63 cm) vanwege het toevoegen van de kunstwerken bij Elerweerd, Heerenlaak en Contelmo.

De verschillen in berekende waterstanden zorgen, samen met enkele veranderingen in kadehoogtes, voor verschillen in inundatiegebieden op enkele locaties. De verschillen zijn het grootst voor de afvoerniveaus van 3.200 m³/s en 4.100 m³/s.

De PID-controllers van alle stuwen behalve Linne en Roermond worden instabiel bij lage afvoeren. Dit komt door de instellingen voor de PID-parameters. In de dynamische berekeningen wordt de sturing van de benedenstroomse stuwen Grave en Lith instabiel bij de overgang van het ene naar het volgende streefpeil.

In de dynamische berekening D1300 is de hoogste berekende waterstand over een groot traject (rkm 145 (net bovenstreams van stuw Sambeek) tot rkm 202 (Lith dorp)) niet representatief voor de passage van de hoogwaterpiek (afvoerpiek), omdat de stuwen dan nog actief zijn. Door de sturing op wisselende streefpeilen ligt de waterstand in de aan- en afloop naar/van het hoogwater hoger dan tijdens de piekafvoer.

Een bug in D-HYDRO, die voor een fout in de afvoerbalans zorgt rond bruggen en kunstwerken die partitiegrenzen kruisen, is omzeild door te werken met vaste partitiegrenzen die handmatig zijn aangepast om kruisingen met stuwen of bruggen te vermijden. Bij de uitlevering van het model wordt een set van partitiegrenzen meegeleverd.

Alle standaardberekeningen met beno22 kunnen over nacht worden gedraaid. De rekentijden liggen, afhankelijk van de situatie (afvoerniveau en stationair/dynamisch) tussen 5 en 17 uur.

8.1.2 Deelmodellen

Er zijn drie deelmodellen van telkens 80-100 km lengte en met onderlinge overlap van 20 km gemaakt met een rooster dat met een factor vier verfijnd is ten opzichte van het beno22-model. Voor alle deelmodellen zijn randvoorwaarden afgeleid voor stationaire berekeningen van de hoogwaterreferenties, SD3200 en SD4100. Om de resultaten (waterstanden en inundatiegebieden) zo veel mogelijk te laten lijken op dynamische berekeningen met het 40 m model van de gehele Maas, is daarbij rekening gehouden met topvervlakking. Daarnaast zijn er randvoorwaarden voor stationaire berekeningen van aanvullende afvoeren (S1300 – S1700 – S2100 – S2500) afgeleid. Deze zijn bedoeld voor de toetsen volgens RBK voor morfologie en scheepvaart. Hierbij was het niet nodig om rekening te houden met topvervlakking.

Ook voor de deelmodellen zijn initiële condities afgeleid. De constante achtergrondwaarde voor de viscositeitsberekening is aangepast aan de hogere roosterresolutie. En de sturing van stuw Sambeek en keersluis Mook in D-RTC zijn aangepast omdat invoerlocaties voor de sturing buiten de grens van het betreffende deelmodel vielen.

In het algemeen is sprake van een goede overeenkomst tussen de waterstanden van het gehele Maasmodel en de deelmodellen. Deelmodel A geeft de minst goede overeenkomst met het gehele Maasmodel. De twee oorzaken die het meeste bijdragen aan de verschillen zijn:

- 1 een betere weergave van de ingrepen Heerenlaak en Contelmo dan op het 40-m-rooster, waardoor deze meer afvoer trekken in het deelmodel;
- 2 een gedetailleerdere weergave van de oevers, wat met name in Maastricht zorgt voor een modelmatig breder zomerbed.

Alle twee genoemde oorzaken zorgen voor een lagere waterstand in het deelmodel dan in het gehele Maasmodel, en dragen hierdoor bij aan het relatief grote verschil.

Ook alle standaardberekeningen met de deelmodellen kunnen over nacht worden gedraaid. De rekentijden liggen, afhankelijk van het afvoerniveau, tussen 9 en 20 uur. Deelmodel A rekent langer dan deelmodellen B en C, omdat de stroomsnelheden in dat gebied hoger zijn en dus kleinere tijdstappen nodig zijn.

8.1.3 Extra aanvulling

Vanwege de vraag voor het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) om één extra stationaire randvoorwaarde toe te voegen aan de standaardrandvoorwaarden voor de beno22_6-beheer-en-onderhoud-modellen is deze rapportage in 2024 geüpdatet naar v2.0. Doordat het slechts een toevoeging van een extra stationaire randvoorwaarde van 750 m³/s betreft, heeft dit geen gevolgen voor de resultaten van de simulaties van versie v1b van de modelschematisaties zoals beschreven in onderliggende rapportage.

Tevens is een fout in randvoorwaarde Maas_SD4100_bnd.bc voor deelmodel dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a aangepast. Tijdstap 2880 is verwijderd en de waarde die hierbij stond is bij tijdstap nul gezet, zodat een lange inspeelperiode vermeden wordt. Dit verkort alleen de inspeeltijd en heeft geen invloed op de uiteindelijke resultaten.

Vanwege de toevoeging van de extra randvoorwaarden aan de eerdere oplevering zijn de namen van de nieuw opgeleverde modelschematisaties gewijzigd naar:

- dflowfm2d-maas-beno22_6-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km002_085-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km067_165-v2b
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2b

8.2 Aanbevelingen

8.2.1 Beno-model

Er wordt aanbevolen om de PID-parameters verder af te regelen voor de lage afvoeren. Als dat niet mogelijk is met één set van parameters kunnen meerdere losse PID-controllers met verschillende parametersets worden gedefinieerd voor verschillende afvoerbereiken.

Daarnaast wordt aanbevolen om in de sturing van de benedenstroomse stuwen Sambeek, Grave en Lith de overgang van het ene naar het volgende streefpeil te optimaliseren om instabiliteit te voorkomen. De uitgebreide sturing uit het 5^e generatie WAQUA-model kan een startpunt hiervoor zijn.

Bij gebruik van dynamische berekeningen met afvoeren waarvoor de stuwen nog actief zijn moet bij de interpretatie van berekende waterstanden opgelet worden of de max13-waterstanden op het traject van bovenstrooms van stuw Sambeek (ongeveer rkm 145) tot aan benedenstrooms van stuw Lith (rkm 202) representatief zijn voor de passage van de piek.

Om problemen met kades of hoogteverschillijnen, die over de modelrand (de *clip-contour*) heen lopen, te voorkomen wordt daarnaast aanbevolen om Baseline te verbeteren zodat nieuwe hoogtepunten, die worden toegevoegd bij het afknippen van de lijnen door de modelrand, altijd de correcte hoogte toegewezen krijgen. Dit zorgde in de eerste versie van het beno22-model voor problemen bij de kade bij de ingang van de Boschmolenplas. Inmiddels zijn daar aanvullende hoogtepunten toegevoegd in de Baseline-schematisatie, waardoor het probleem voor beno-modellen van de Maas is opgelost.

Ter verbetering van het proces van de modelbouw wordt aanbevolen dat RWS-ZN bij het aanleveren van de Baseline-database ook een lijst maakt van de nieuwe kunstwerken die voor het eerst worden toegevoegd. Op die lijst moet dan ook worden aangegeven wat de dimensies van de nieuwe kunstwerken zijn, of ze sturing nodig hebben, en zo ja welke. Op die manier wordt voorkomen de kunstwerklijnen uit Baseline niet aangeropen worden door het D-HYDRO-model.

8.2.2 Deelmodellen

Er wordt aanbevolen om het nieuwe kunstwerk Contelmo noord ook in het deelmodel (deelmodel A) goed aan te laten sluiten op de hoge kade.

Er wordt aanbevolen om de schematisatie van het Julianakanaal voor het pand tussen sluis Born en sluis Maasbracht te controleren. Bij de update van de modelschematisaties is bij de toevoeging van het extra afvoerniveau voor S_750 geconstateerd dat in het deelmodel dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km002_085-v2b de waterstand in het Julianakanaal tussen JK_21.00 en JK_34.00 blijft oplopen tot boven het stuwpeil. Deze stijging vindt niet plaats in het totaalmodel en impliceert dat er waarschijnlijk extra water naar dit pand lekt via sluis Born.

9 Literatuur

- Agtersloot, R.C. (2012): Implementatie toekomstig stuwbeheer Maas in WAQUA. Eindrapport. Versie 2.0, 5 november 2012.
- Agtersloot, R.C. (2014): Hydraulische uitgangspunten voor de deelmodellen van de Maas in WAQUA.
- De Goede, E. en R. Plieger (2023): Verschilanalyse voor D-HYDRO release 2023.01. Deltares-memo, v0.9, 8 mei 2023.
- De Jong, J. (2021): Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares-rapport 11200569-003, oktober 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. 15 november 2021
- De Jong, J. en N. Asselman (2019): Topvervlakking Maas. Het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming. Deltares-rapport 11203684-003-ZWS-0002, december 2019.
- De Jong, J. en T. Visser (2018): Jaarlijkse Actualisatie B&O-Modellen Maas 2017. Baseline & WAQUA maas-beno17_5-v1 incl. deelmodellen maas-beno_mknov17_5-v1. Deltares-rapport 11202220-002-ZWS-0012, december 2018.
- De Jong, J. (2022): Randvoorwaarden dynamische afvoergolven Maas-model voor toepassing in BOI. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0019, 16 maart 2022
- Kusters, A. (2022): Zesde generatie beno deelmodellen Rijn. Baseline en D-HYDRO beno19_6. Deltares-rapport 11208053-003-ZWS-0011, december 2022.
- Kusters, A. en T. Visser (2022): Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijn 2022. Baseline en D-HYDRO j22_6. Deltares-rapport 11208053-003-ZWS-0007, augustus 2022.
- Laan, S. (2020): Automatische roosterverfijning. Deltares-memo 11205259-013-ZKS-0001, september 2020.
- Minns, T, A. Spruyt, D. Kerkhoven (2022): Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO. Generieke technische en functionele specificaties (v1-2022). Deltares-rapport 1208053-012-ZWS-0002.
- Van der Deijl, E., J. de Jong en T. Visser (2022): Actualisatie zesde-generatie Maasmodellen. Schematisaties j19_6, beno19_6, beno_mknov19_6. Deltares-rapport 11206813-002-ZWS-0021, 19 april 2022.
- Van der Deijl, E. (2023): Update van de standaardsommen JAMM2022 naar JAMM2023. Deltares-memo 11209233-002-ZWS-0003_v1.0, juli 2023.
- Van der Wijk (2022) Afleiden QH-relatie Rijn-Maasmonding voor Rijntakken en Maas. Deltares memo 11206813-006-ZWS-0008 v4.0 d.d. 1 maart 2022.

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