

Pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Maas

Toepassing FM2PROF



Pilot zesde generatie 1D SOBEM model voor de Maas
Toepassing FM2PROF

Auteur(s)

Koen Berends

Asako Fujisaki

Boyan Domhof

Pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Maas

Toepassing FM2PROF




Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	-
Trefwoorden	Maas, zesde generatie, 6 ^e generatie, FM, FM2PROF, SOBEK3

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	04-02-2021
Projectnummer	11205258-003
Document ID	-
Pagina's	74
Status	definitief

Auteur(s)

	Koen Berends	
	Asako Fujisaki	
	Boyan Domhof	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0 (concept)	Koen Berends	Jurjen de Jong	Johan Boon	
1.1 (definitief)	Koen Berends 	Jurjen de Jong 	Gerard Blom 	

Samenvatting

Binnen KPP Hydraulica Schematisaties worden 1D en 2D modellen gebouwd en onderhouden ten behoeve van de primaire processen van Rijkswaterstaat. Met de overgang naar de zesde generatie van modellen, moeten nieuwe 1D riviermodellen opgezet worden, die deels afgeleid zijn van de zesde generatie 2D D-HYDRO modellen en nieuwe Baseline 6 gebiedschematisaties. Omdat de bestaande methodes om 1D modellen op te zetten niet zijn ontwikkeld voor D-HYDRO of Baseline 6, is een nieuwe aanpak nodig.

Dit rapport beschrijft de werkzaamheden die in 2020 zijn uitgevoerd in het kader van het maken van een pilot zesde generatie 1D SOBEK model voor de Maas. Dit is het eerste model binnen de 1D modellenlijn voor de zesde generatie. De werkwijzen zoals beschreven in dit rapport moeten de basis vormen voor het bouwen van de operationele modellen voor de Maas, Rijn, Rijn-Maasmonding en overige gebieden, vanaf 2021.

In deze pilot wordt een nieuwe werkwijze onderzocht. De grootste verschillen met de aanpak voor de bouw van vorige (vijfde) generatie 1D modellen zijn: (i) het gebruik van FM2PROF voor het afleiden van profielen en ruwheden (in plaats van WAQ2PROF), en (ii) het kalibreren op modeluitvoer van het 2D model (in plaats van metingen). Het doel van deze vernieuwingen is om het proces van het afleiden van 1D modellen voor de zesde generatie Rijkswaterstaat modellen eenvoudiger, sneller en transparanter te maken.

In deze pilot zijn drie fasen doorlopen. In de eerste twee fasen is de methode getoetst door een 1D model af te leiden van het meest recente zesde generatie 2D model (dflowm2d-maas-j19_6). In de derde fase is de hele aanpak herhaald voor het afleiden van het j11 model, waardoor het historisch hoogwater van 2010/2011 doorgerekend kon worden.

Resultaten laten zien dat de berekende dwarsprofielen, ruwheden en gekalibreerde ruwheden plausibel zijn en binnen de verwachte fysische grenzen vallen. Validatie op de synthetische WBI golven laat verschillen zien tussen 1D en 2D die vergelijkbaar zijn met de kalibratieresultaten. In deze eerste twee fasen is zonder actieve stuwsturing gerekend. In de derde fase laat de validatie op het hoogwater van 2011 echter zien dat bij de validatie op een historische situatie, waarbij wel operationele stuwsturing aanwezig was, de verschillen tussen 1D en 2D niet vergelijkbaar zijn met de resultaten die tijdens kalibratie zijn gevonden. Daarnaast blijkt in alle fasen dat er enkele lokale afwijkingen met het 2D model zijn, die waarschijnlijk veroorzaakt worden door beperkingen in de huidige schematisatie (takkenstructuur). Hierdoor wordt de beoogde nauwkeurigheid voor operationeel gebruik (nog) niet gehaald.

Ten aanzien van het proces van het afleiden van de nieuwe 1D modellen concluderen we dat de nieuwe aanpak sneller, inzichtelijker en eenvoudiger is in gebruik dan de vijfde generatie.

Voor toekomstig gebruik wordt aangeraden om de takkenstructuur van het 1D model op een aantal plekken te herzien, de kalibratie en validatie uit te voeren inclusief een actieve stuwsturing, en kalibratie op historische sommen te overwegen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Doelomschrijving	8
1.2	Software	8
1.3	Team	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Methode	10
2.1	Algemene aanpak	10
2.1.1	Modelbouw	10
2.1.2	Kalibratie en validatie	11
2.1.3	Toepassing op het hoogwater van 2011	11
2.2	Inventarisatie van eisen en verbeterpunten vanuit vijfde generatie	12
2.2.1	Nevengeulen	12
2.2.2	Grinddrempels	12
2.2.3	Resolutie van het numerieke rekenrooster	12
2.2.4	Kunstwerken	13
2.2.5	Takkenstructuur	13
2.2.6	Morfologie en sedimenttransport	13
2.3	Status van de onderliggende modellen en software	13
2.3.1	SOBEK-maas-j19_5	13
2.3.2	dflowm2d-maas-j19	13
2.3.3	Baseline-maas-j19	13
2.3.4	FM2PROF	14
3	Modelbouw	15
3.1	Het opzetten van de 2D afleidingssom	15
3.1.1	Kunstwerken	15
3.1.2	Initiële conditie	15
3.1.3	Randvoorwaarden	16
3.2	De schematisatie van het 1D model	17
3.2.1	1D Netwerk	18
3.2.2	Randvoorwaarden	19
3.2.3	Kunstwerken	19
3.2.4	Retentiegebieden	19
3.2.5	Extra ruwheden	19
3.2.6	Initiële conditie	19
3.3	Het klaarzetten van invoerbestanden voor FM2PROF	19
3.3.1	Sectievakken (SectionPolygonFile)	20
3.3.2	Gebiedsvakken (RegionPolygonFile)	20
3.3.3	Dwarsprofiellocaties (CrossSectionLocationFile)	20
3.3.4	Conversie van geojson naar netcdf bestanden	21
3.4	Visuele inspectie van FM2PROF uitvoer	22

3.4.1	Zomerdijk	22
3.4.2	Splitsing tussen 'waterstandsafhankelijk' en 'waterstandsonafhankelijk' profiel	23
3.4.3	Ruwheid	23
3.4.4	Toewijzen van 2D uitvoer aan dwarsprofielen	24
3.5	Gevoeligheidsanalyse van FM2PROF parameters	24
3.5.1	Instellingen	25
3.5.2	Resultaten	27
3.6	Ongekalibreerde vergelijking met 2D	30
3.6.1	Waarom een ongekalibreerde vergelijking wordt uitgevoerd	30
3.6.2	Resultaten pilot	30
4	Kalibratie en validatie	32
4.1	Kalibratiemethodiek	32
4.2	Kalibratieresultaten	33
4.2.1	Gekalibreerde ruwheden	33
4.2.2	Gekalibreerde waterstanden	35
4.3	Validatieresultaat	37
4.3.1	WBI17-golf, piek 1971 m ³ /s	37
4.3.2	WBI17-golf, piek 4118 m ³ /s	38
5	Toepassing op het hoogwater van 2011	41
5.1	Doelstelling	41
5.2	Methode	41
5.2.1	Het implementeren van stuwsturing	42
5.2.2	Historische afvoergolf en modellen	42
5.3	Resultaat	42
5.3.1	Modelbouw	42
5.3.2	Kalibratie	44
5.3.3	Validatie	46
5.3.3.1	Analyse Maaseik	48
5.3.3.2	Analyse Linne	49
5.3.3.3	Algemeen beeld uit de overige stations	50
6	Conclusie en aanbevelingen	53
6.1	Conclusies per onderdeel	53
6.1.1	Conclusies modelbouw	53
6.1.2	Conclusies kalibratie en validatie	53
6.1.3	Conclusies toepassing op hoogwater 2011	54
6.2	Aanbevelingen	55
6.2.1	Aanbevelingen modelbouw	55
6.2.2	Aanbevelingen kalibratie & validatie	55
Referenties		56
A	Appendix bij Hoofdstuk 3	57
A.1	Visuele inspectie van FM2PROF uitvoer	57
A.1.1	Met utils.Visualiseoutput	57
A.1.2	Met GIS software	57

A.2	Gevoeligheidsanalyse	59
A.2.1	Effect van aanpassing parameters	59
A.3	Python script voor het aanmaken van initiële waterstanden	65
B	Appendix bij Hoofdstuk 4	67
C	Appendix bij Hoofdstuk 5	68
C.1	Modelbouw: vergelijking tussen FM2PROF uitvoer	68
C.1.1	j11 en j19	68
C.1.2	j11 (G6) en j11 (G5)	69
C.2	Kalibratie & validatie figuren	71

1 Inleiding

1.1 Doelomschrijving

Dit rapport beschrijft de werkzaamheden die in 2020 zijn uitgevoerd in het kader van het maken van een pilot zesde generatie 1D SOBEKSOBEK model voor de Maas. De werkzaamheden beschreven in dit plan omvatten de (deel)projecten KPP Hydraulica Maas G6 en KPP Hydraulica Software, FM2PROF.

Dit is het eerste model binnen de 1D modellenlijn voor de zesde generatie. De werkwijzen zoals beschreven in dit rapport moeten de basis vormen voor het bouwen van de operationele modellen voor de Maas, Rijn, Rijn-Maasmonding en overige gebieden, vanaf 2021.

In deze pilot wordt een nieuwe werkwijze onderzocht. Deze werkwijze verschilt op veel punten, van de aanpak voor de bouw van vijfde generatie modellen:

Tabel 1.1 Beknopt overzicht van de verschillen tussen de werkwijze voor het bouwen van vijfde generatie 1D modellen, en in deze pilot voor de zesde generatie.

Onderdeel	Vijfde generatie	Zesde generatie pilot
Basis 2D model	WAQUA	D-HYDRO (dflowfm2d)
Afleiden van dwarsprofielen	WAQ2PROF (profielen)	FM2PROF
Afleiden van ruwheden	WAQ2PROF (ruwheden)	
Kalibratie	Op meerdere historische afvoergolven	Op 2D modelresultaat

Het doel van deze pilotstudie is om deze nieuwe werkwijze te testen en te documenteren, en om advies te geven voor de bouw van operationele modellen in 2021. Deze pilot bestaat uit drie fases:

- 1 **Modelbouw:** het opzetten van een 1D modelschematisatie en het afleiden van dwarsprofielen en ruwheden met FM2PROF.
- 2 **Kalibratie en validatie:** het kalibreren van zomerbedruwheden, en het valideren van het gekalibreerde model op twee synthetische WBI afvoergolven
- 3 **Toepassing op 2011:** Een toepassing van de volledige werkwijze op een historische situatie.

De gedetailleerde doelstelling per onderdeel staat beschreven in hoofdstuk 2.

1.2 Software

Software	Versie
OpenDA	2.4.5.-1 June 15 2020 (Deltares branch)
SOBEK	3.17.17.45036
D-HYDRO	2020-03 (2.10.10_65673)
Baseline 6	1.0.11
FM2PROF	1.4.1 – 1.4.3

1.3 Team

Het team bij Deltares bestond uit de volgende leden:

Naam	Rol
Dr. ir. Koen Berends	Projectleider
Asako Fujisaki MSc	Projectmedewerker modelbouw (hoofdstuk 3)
Ir. Boyan Domhof	Projectmedewerker kalibratie (hoofdstuk 4)
Ing. Ton Visser	Projectmedewerker modelbouw (hoofdstuk 3)
Ir. Jurjen de Jong	Reviewer
Dr. Aukje Spruyt	Projectleider KPP Modelschematisaties Zoet (MA07a)

De opdrachtgever was vertegenwoordigd door dhr. Martin Scholten.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een algemeen overzicht gegeven van de nieuwe methodiek, die in deze pilot wordt getoetst. Deze nieuwe methodiek wordt in drie fases getest: een nieuwe manier van 1D modellen opzetten met de FM2PROF software (hoofdstuk 3) en een nieuwe manier om modellen te kalibreren (hoofdstuk 4). In hoofdstuk 5 wordt de methode toegepast op een model van 2011 waarvoor ook vijfde generatie (G5) modellen beschikbaar zijn, en wordt de vergelijking gemaakt tussen de G5 modellen, metingen, en de resultaten van de pilot zesde generatie (G6) modellen.

2 Methode

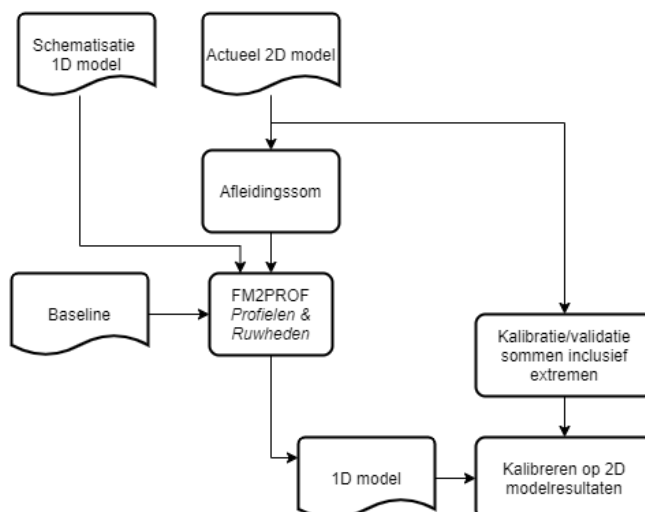
2.1 Algemene aanpak

In deze paragraaf wordt beschreven, hoe een 1D model wordt afgeleid met FM2PROF, gekalibreerd en hoe de resultaten worden gevalideerd. Deze aanpak wordt in deze pilot onderzocht als alternatief voor de huidige methodiek wordt gebruikt voor het opzetten van 1D modellen.

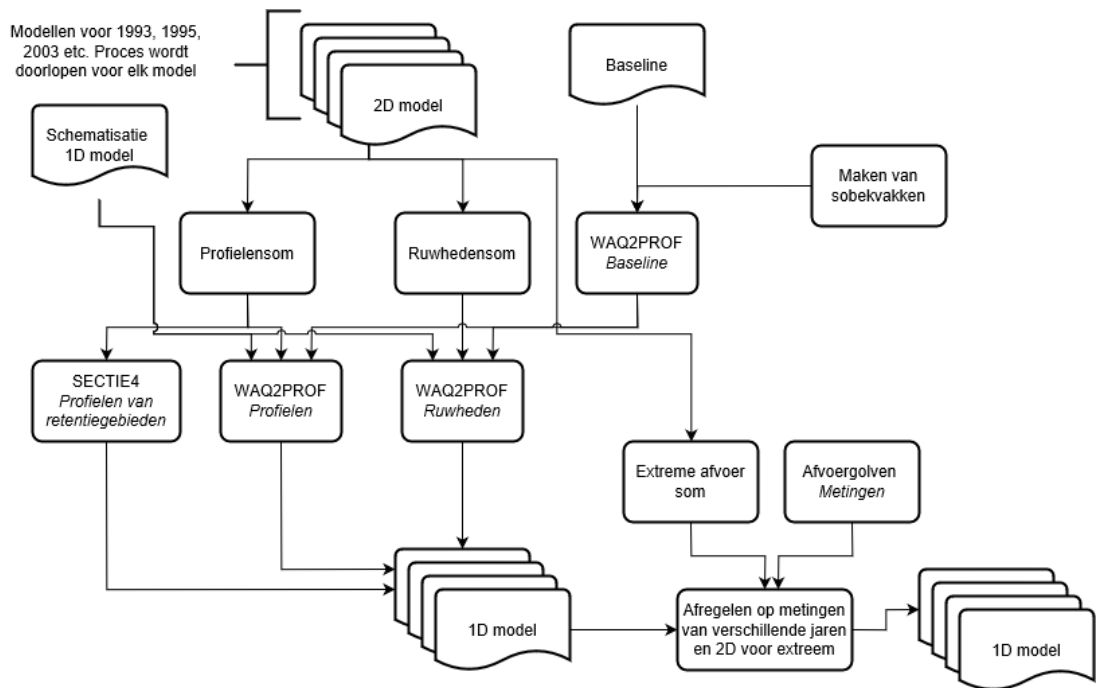
2.1.1 Modelbouw

De belangrijkste aanpassing met de vijfde generatie is dat het 1D model een afgeleid model (*surrogate model*) is van het 2D (dflowfm2d) model. In zowel de data (profielen, ruwheden) als het testen en optimaliseren van de nauwkeurigheid wordt de vergelijking gezocht met het 2D model. Met deze aanpassing wordt gekozen voor een vereenvoudigde werkwijze, die moet resulteren in lagere inspanning tijdens de jaarlijkse actualisatie van de modellen. Ter illustratie is in Figuur 2.2 de werkwijze weergegeven die moest worden doorlopen in de vijfde generatie, vergeleken met de beoogde werkwijze voor de zesde generatie in Figuur 2.1.

De modelbouw wordt beschreven in hoofdstuk 3. Doel van dit onderdeel is om te onderzoeken of de dwarsprofielen, die door FM2PROF worden aangemaakt plausibel zijn, en om de ervaring met het gebruik van FM2PROF te beschrijven.



Figuur 2.1 Beoogd proces voor het afleiden van 6^e generatie 1D modellen + kalibratie/validatie inclusief extremen.



Figuur 2.2 Proces voor het afleiden van 5^e generatie 1D modellen.

2.1.2 Kalibratie en validatie

In de 5^e generatie werden zowel het 1D als het 2D model gekalibreerd op piekwaterstanden (d.w.z. de periode rondom de afvoerpiek), waarbij de piekwaterstanden uit hoogwatergolven werd gebruikt om afvoerafhankelijk te kalibreren.

In deze pilot experimenteren we met een nieuwe kalibratieaanpak, waarbij het 1D model wordt gekalibreerd op het 2D model – dus niet op metingen. Hierdoor zijn er geen aanvullende 1D modellen nodig (om bijvoorbeeld te kalibreren op het hoogwater van 1995), die enkel tijdens kalibratie worden gebruikt. Dit past binnen het grondbeginsel van FM2PROF – nl. dat het 1D model een surrogaat model is van het 2D model, en vereenvoudigd de kalibratie aanzienlijk.

De kalibratie en validatie wordt beschreven in hoofdstuk 4. Het doel van dit onderdeel is om te onderzoeken of het technisch mogelijk is om de 1D ruwheden in één keer te kalibreren, of deze ruwheden plausible waarden geven die leiden tot goede waterstandsresultaten bij validatie, en om ervaring met deze kalibratieaanpak te beschrijven.

2.1.3 Toepassing op het hoogwater van 2011

In dit onderdeel, wordt de methode die onderzocht is in hoofdstukken 3 en 4 toegepast op het hoogwater van 2011. Voor dit scenario zijn reeds G5 modellen beschikbaar, zowel 1D als 2D, als ook een G6 2D model. Hierdoor is het mogelijk om een vergelijking uit te voeren.

Het doel van dit onderdeel, is om te onderzoeken of het pilot G6 1D model een nauwkeurigheid heeft die vergelijkbaar is, of beter dan, G5 1D, of dat er redelijkerwijs kan worden verwacht dat dit niveau van nauwkeurigheid in 2021 kan worden gehaald? Deelvragen zijn:

- Wat is de nauwkeurigheid van het G5 1D over de hele afvoergolf en in hoeverre zijn afwijkingen in 1D gecorreleerd met afwijkingen van het G5 2D model?
- Wat is de nauwkeurigheid van het G6 1D over de hele afvoergolf en in hoeverre zijn afwijkingen in 1D gecorreleerd met afwijkingen van het G6 2D model?
- Verwachten wij dat verbetering aan onderdelen van G6 1D kan leiden tot een grotere nauwkeurigheid?

2.2 Inventarisatie van eisen en verbeterpunten vanuit vijfde generatie

In de nieuwe generatie kunnen verbeteringen worden meegenomen die voortkomen uit ervaringen met de vorige generatie. In dit project wordt in beginsel vastgehouden aan de takkenstructuur en modelkeuzes van de vijfde generatie. Mogelijke discussiepunten voor verandering in het zesde generatie model ten opzicht van het vijfde generatie model worden hieronder besproken.

Daarnaast worden mogelijke verbeterpunten genoemd ten opzichte van (toekomstig) gebruik voor morfologische berekeningen en omzetting naar D-HYDRO het 1D rekenhart van D-HYDRO. Deze punten zijn niet van direct belang voor het beoogde primaire gebruik van het model (waterbeweging in SOBEK).

2.2.1 Nevengeulen

De Maas heeft flinke nevengeulen, die soms dominant zijn over de hoofdgeul. Sommige ingrepen (binnen de Maaswerken) zijn hierop zelfs gericht. Het huidig 5^e generatiemodel is niet helemaal consistent. Over het algemeen zijn nevengeulen niet opgenomen als aparte tak. Uitzonderingen op deze regel zijn het Oude Maasje (Limburg) en het Lateraalkanaal. Deze uitzonderingen introduceren in G5 veel complexiteit; zo kunnen de dwarsprofielen niet afgeleid worden met WAQ2PROF maar wordt de tool SECTIE4 gebruikt. Enkele andere locaties waar het water een kortere route dan de hoofdgeul neemt zijn geschematiseerd met 'kortsluitingen' waar middels een QH-relatie lokaal water wordt onttrokken en verderop weer wordt geloosd.

Voor eventueel toekomstig (her)gebruik van de SOBEK modellen voor morfologische toepassingen (waarvoor niet het SOBEK rekenhart, maar het in ontwikkeling zijnde dflow1d rekenhart gebruikt wordt, zie Berends et al., 2020), kan men aanvullende wensen benoemen. Zo zijn kortsluitingen niet wenselijk voor morfodynamische toepassingen doordat lokaal de afvoer (en stroomsnelheid) in de rivier opeens af neemt, wat leidt tot onrealistische sedimentatiepatronen. QH lateralen worden bovendien niet ondersteund door dflow1d.

Voor de zesde generatie wordt een bewuste keuze gemaakt voor een versimpeling van de takkenstructuur t.o.v. de vijfde generatie:

- Verwijdering van kortsluitingen;
- Verwijdering van lateraalkanaal, oude maasje.

Het verwijderen van deze complexe eigenschappen kan leiden tot verschillen met het tweedimensionale model ter hoogte van de Maasplassen. De uiterwaardstroming die leidt tot een korte route bij hogere afvoeren kan niet op dezelfde manier in 1D gesimuleerd worden als in 2D.

2.2.2 Grinddrempels

Grinddrempels zijn lokale sedimentdammen die zijn opgeworpen om bij lage afvoer water vast te houden. In de 5^e generatie worden grinddrempels gemodelleerd als lokale ruwheden (*extra resistance*). Deze oplossing is niet wenselijk met het oog op morfologie (zie volgende paragraaf). Daarnaast wordt deze functionaliteit nog niet ondersteund door dflow1d.

Voor de zesde generatie is ervoor gekozen om extra ruwheden te verwijderen uit het model. Enkel indien de extra ruwheden absoluut noodzakelijk blijken wordt in overleg besloten ze te herintroduceren.

2.2.3 Resolutie van het numerieke rekenrooster

In 5^e generatiemodellen wordt een uniforme rekenroosterresolutie gebruikt van 500 m. Omdat aanpassing van deze resolutie veel handmatig werk vereist (herdefiniëren van zgn. sobekvakken) was het niet eenvoudig om te experimenteren met andere resoluties.

Met de nieuwe aanpak is de invloed van variatie in de rekenroosterafstand eenvoudiger te onderzoeken. Dit is met name interessant op de Grensmaas, waar de variatie per 500 m het grootste is. Vooralsnog wordt de rekenafstand op 500 meter gehouden.

2.2.4 Kunstwerken

Het SOBEK model van de Maas maakt veel gebruik van zgn. 'river weirs'. Dit stuwtype wordt niet ondersteund door D-HYDRO. Aanpassing naar 'simple weirs' of 'general structures' zou nodig zijn. De invloed op hydraulica is vermoedelijk klein. Vooralsnog blijven we de 'river weir' formule gebruiken.

2.2.5 Takkenstructuur

Het vijfde generatiemodel begint bij Eijsden en eindigt bij Keizersveer. In de zesde generatie wordt het 2D model leidend. Het zesde generatie 2D model begint (vanaf het j19-model) bij stuw Lixhe. De takkenstructuur wordt daarom uitgebreid tot Lixhe, zodat de randvoorwaarden in 1D en 2D op dezelfde locatie kan worden opgelegd.

2.2.6 Morfologie en sedimenttransport

Deze paragraaf noemt aanvullende eisen vanuit potentieel gebruik van de 1D modellen voor morfologische vraagstukken. Doel hiervan is om waar mogelijk, de wensen vanuit hydraulica en morfologie op elkaar af te stemmen. De morfologische wensen zijn:

- Geen ruwheidstrajecten met plotselinge (kunstmatige) overgangen;
- Geen gebruik van onrealistische ruwheidswaarden;
- Het gebruik van aparte ruwheidssecties voor (1) kribvakken en oevers, en (2) uiterwaarden;
- Geen korte ruwheidstrajecten bij stuwen en splitsingspunten (relevant voor de Rijn). Voor het afregelen van splitsingen heeft een grotere afstand (>10 km) de voorkeur boven een klein traject.
- Een goede definitie van de breedte van het zomerbed (main channel width), omdat die breedte in de modelsoftware gelijk is aan de sedimenttransporterende breedte.

N.a.v. bovenstaande wensen vooralsnog geen aanvullende veranderingen ten opzichte van de vijfde generatie doorgevoerd.

2.3 Status van de onderliggende modellen en software

2.3.1 SOBEK-maas-j19_5

Het meest recente vijfde generatie model is SOBEK-maas-j19_5-v2. Dit is gebaseerd op het model SOBEK-maas-j19_5-v1. Het verschil tussen het v1 en v2 model zit in de te-gebruiken SOBEK-versie en een aanpassingen ten gevolge hiervan in de kortsluitingen. Omdat de kortsluitingen niet worden overgenomen in de 6^e generatie, is dit verschil niet relevant voor dit project. In dit project wordt SOBEK-maas-j19_5-v2 gebruikt als basis voor SOBEK-maas-j19_6.

2.3.2 dflowm2d-maas-j19

Er was bij de start van dit project nog geen definitief gekalibreerd zesde generatie 2D model voor de Maas. Omdat het voorliggende rapport slechts een pilot beschrijft zonder operationele toepassingen, wordt het meest recent beschikbare dflowm2d model gebruikt dat bij de start van dit project beschikbaar is, in de staat waar die op dat moment in verkeerd. In dit project wordt daarom gewerkt met dflowm2d-maas-j19_6-w2.

2.3.3 Baseline-maas-j19

De Baseline database van j19 was bij aanvang van het project nog niet af. Er wordt momenteel gewerkt aan Baseline-nl, dat dit jaar baseline-maas moet gaan vervangen. In dit project wordt gewerkt met de baseline-maas-j19_6-w2.

2.3.4

FM2PROF

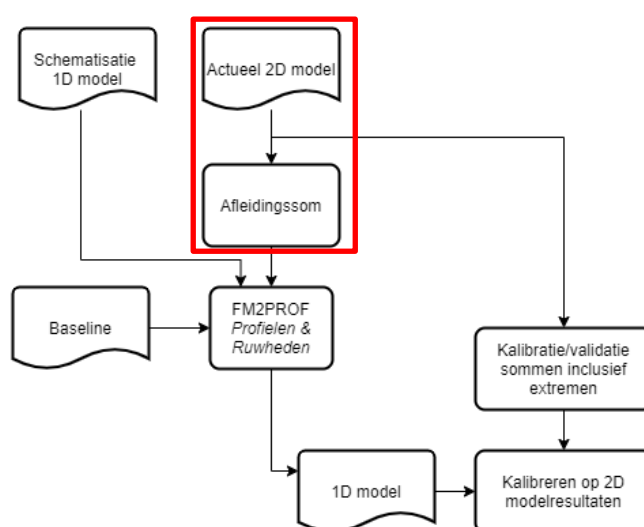
FM2PROF is software om profielen en ruwheden voor 1D modellen af te leiden uit 2D modellen. De meest recente versie is 1.3, opgeleverd in december 2019 (Berends et al., 2019 en Berends, 2020). Omdat in dit project ook verdere ontwikkeling plaats vindt, worden de werkzaamheden uitgevoerd met versie 1.4.1 tot en met versie 1.4.3. De verschillen die tussen deze versie hebben plaatsgevonden zijn:

- Versie 1.4.2:
 - Verbeterde documentatie
 - Nieuwe API (gebruikersinterface) voor Python gebruikers
 - Bugfixes aan de CLI (Command Line Interface) voor gebruik via een terminal
- Versie 1.4.3:
 - Support toegevoegd voor mesh2d_czu uitvoer van dflowfm2d. Dit is een nieuwe variabele in map-uitvoer van dflowfm2d, die de Chézy waarde geeft op flow links. Deze uitvoer is beschikbaar in versies van dflowfm2d hoger dan 2.15.01.

3 Modelbouw

Dit hoofdstuk beschrijft hoe met FM2PROF een 1D model wordt afgeleid van een 2D model. Hiervoor worden enkele stappen genomen. Ter voorbereiding wordt een speciale som (de 'afleidingsom') met het 2D model gedraaid (paragraaf 3.1) en wordt een 1D schematisatie (takkenstructuur, kunstwerken, etc.) opgezet (paragraaf 3.2). De volgende drie paragrafen beschrijven het gebruik van FM2PROF. Paragrafen 3.3 en 3.4 beschrijven achtereenvolgens de invoer en de controle op de uitvoer van FM2PROF, en in paragraaf 3.5 wordt een korte gevoeligheidsstudie uitgevoerd op een paar configuratieparameters van FM2PROF. Tot slot wordt een vergelijking van het 1D model, met de uit FM2PROF verkregen profielen en ruwheden, met het 2D model uitgevoerd in paragraaf 3.5. Na deze laatste paragraaf, is een ongekalibreerd 1D model opgezet, dat als basis dient voor de werkzaamheden die in hoofdstuk 4 beschreven staan.

3.1 Het opzetten van de 2D afleidingsom



Figuur 3.1 Stroomschema van de werkwijze op een 1D model op te zetten. Het deel van de methode beschreven in deze paragraaf staat rood omrand.

Het dflowfm2d model is op een aantal punten aangepast om het klaar te maken voor de afleidingsom. In onderstaande paragrafen staat beschreven welke stappen zijn genomen.

3.1.1 Kunstwerken

Het RealTimeControl (RTC) model is uitgeschakeld en alle stuwen zijn gezet op de minimale hoogte (gestreken/open situatie).

3.1.2 Initiële conditie

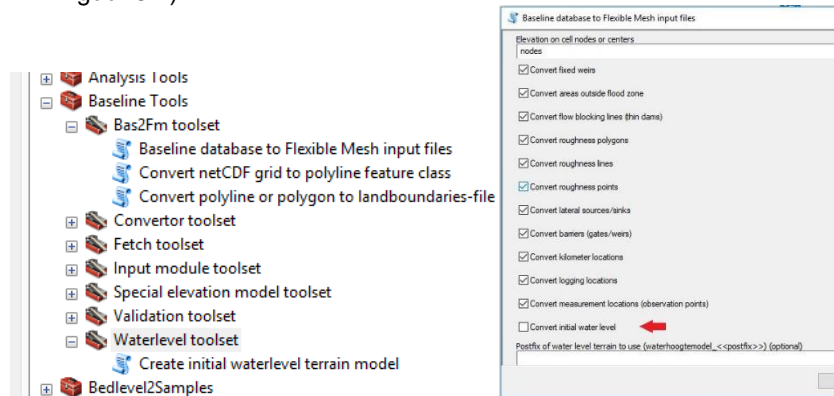
De initiële conditie wordt beschreven door waterstanden in de *cell centres* en snelheidscomponenten (d.w.z. in x en y richting) op de *cell edges*. Het is belangrijk dat de afleidingsom begint van een evenwichtssituatie bij de laagste afvoer in de som.

De randvoorwaarden voor de sommen om de initiële conditie te maken zijn:

- Een stationaire afvoer van $50\text{m}^3/\text{s}$ bij Lixhe
- Een QH relatie op de benedenstroomse modelrand Keizersveer.

Baseline 6 (BAS2FM) beschikt over een functie waarmee een initieel waterstandsveld kan worden aangemaakt. Dit waterstandsveld zorgt er echter voor dat niet alleen het zomerbed en de plassen, maar ook een deel van de uiterwaarden onder water staan bij de start van de simulatie. Dit heeft een klein effect op de mogelijke berging van een afvoergolf in modelsimulaties, maar heeft ook nadelige gevolgen voor FM2PROF doordat gebieden onterecht als plas worden toegewezen. Dit is een bekend probleem in ook andere schematisaties en moet opgelost worden in Bas2FM. Daarom is een nabewerking nodig. De stappen om een initiële conditie te maken zijn als volgt:

- 1 Maak een waterstandsveld (xyz bestand) aan met Bas2FM in Baseline.
! Voordat de *Bas2Fm toolset* gebruikt wordt, moeten gebruikers de *Waterlevel toolset* draaien. Anders is de optie om de initiële waterstand te genereren met Bas2FM niet beschikbaar. (Zie Figuur 3.2)



Figuur 3.2 Bas2FM in Arctoolbox (links) en Bas2FM user input window (rechts).

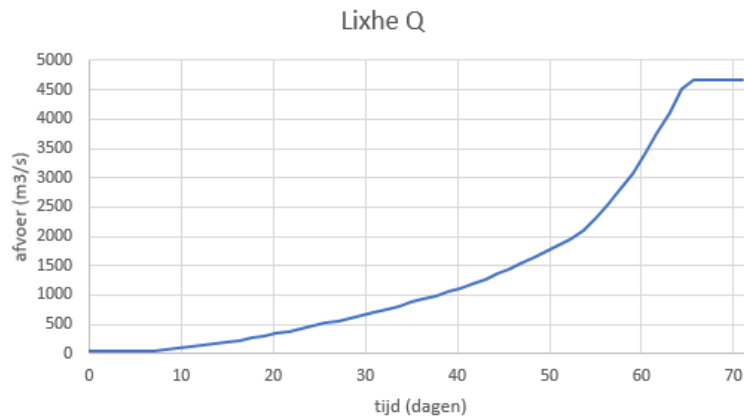
- 2 Draai een 7-daagse simulatie met dflowfm2d met het initiële waterstandsveld uit Bas2Fm
- 3 Exporteer sectie1 (section 1) en plassen (landuse polygons met code 104, 105, 106, 1804 of 1807) shapefile vanuit Baseline en voeg ze samen (merge) in een enkele shapefile
- 4 Maak een nieuwe initiële conditie van de 7-daagse som en de shapefile bij stap (3). Deze stap is nodig om ervoor te zorgen dat de uiterwaarden droog zijn. De shapefile van stap (3) bepaalt welke cellen nat mogen zijn.
- 5 Draai dflowfm2d opnieuw met de nieuwe initiële condities voor 7 dagen
- 6 Maak opnieuw initiële condities van de som bij stap (5).

Het resultaat is een initieel waterstandsveld waarin de mainchannel en plassen (lakes) nat zijn en waar plassen in open verbinding met mainchannel dezelfde waterstand hebben als mainchannel ter plekke van de open verbinding.

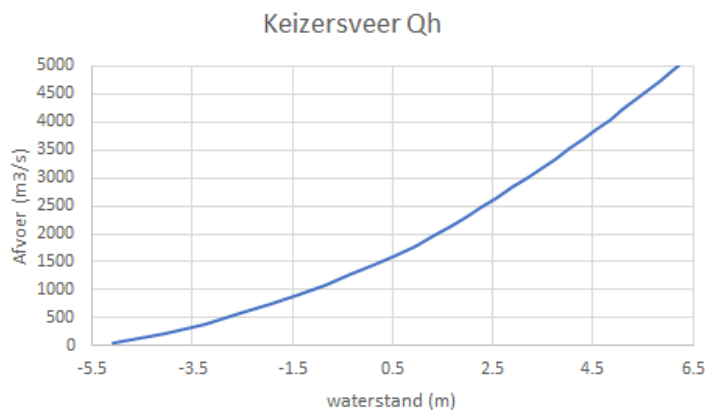
Voor stappen (4) en (6) is een python script gebruikt (bijlage B).

3.1.3 Randvoorwaarden

Voor de randvoorwaarden is gebruikt gemaakt van de 'WAQ2PROF' som conform de vijfde generatie SOBEK-modellen. Dit bestaat uit een langzaam stijgende afvoer bij Lixhe zodat de modelresultaten lokaal een stationair karakter hebben. De afvoer is stationair in de eerste zeven dagen ($50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) en de laatste 6.5 dagen ($4680 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), zie Figuur 3.3. De benedenstroomse randvoorwaarde bij Keizersveer is een fictieve QH relatie (zie Figuur 3.4) waarmee het zomerbed vrijwel droog beginnend en bij toenemende afvoer langzaam opvult. Dit is anders dan de werkelijke QH-relatie (gebruikt in modelstudies) waarin door de opstuwning vanaf zee de laagste waterstand rond $0 \text{ m} + \text{NAP}$ zit. Deze fictieve QH relatie werd in de vijfde generatie ook gebruikt voor het afleiden van profielen met WAQ2PROF. Er zijn geen laterale onttrekkingen en lozingen.

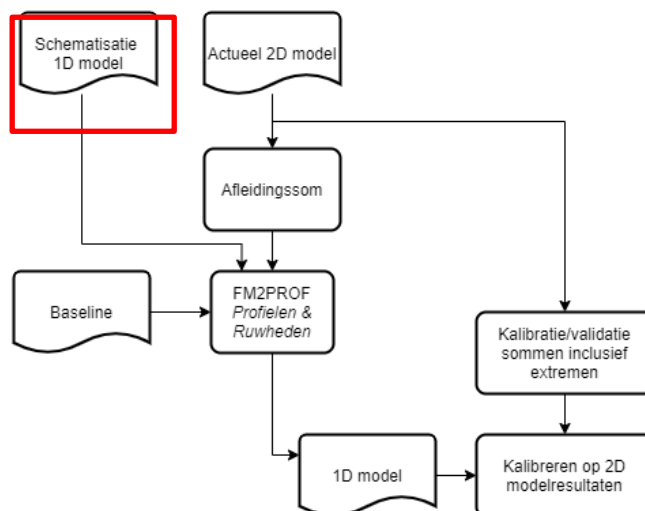


Figuur 3.3 Bovenstroomse randvoorwaarde bij Lixhe.



Figuur 3.4 Benedenstroomse QH randvoorwaarde bij Keizersveer. Let op dat de afvoer in het invoerbestand positief is in 2D, maar negatief in 1D. In 2D is de randvoorwaarden geschematiseerd als een polyline met een richting. Het teken van de afvoer hangt samen met de richting van die polyline. In 1D is de rand een knoop (node), en is wordt teken bepaald door de vraag of de afvoer het model in gaat (positief) of eruit (negatief).

3.2 De schematisatie van het 1D model



Figuur 3.5 Stroomschema van de werkwijze op een 1D model op te zetten. Het deel van de methode beschreven in deze paragraaf staat rood omrand.

Deze paragraaf beschrijft de schematisatie van het SOBEK3 model waarin de profielen en ruwheden uit FM2PROF worden opgenomen. In dit project wordt in beginsel vastgehouden aan de takkenstructuur en modelkeuzes van de vijfde generatie (zie paragraaf 2.2).

3.2.1 1D Netwerk

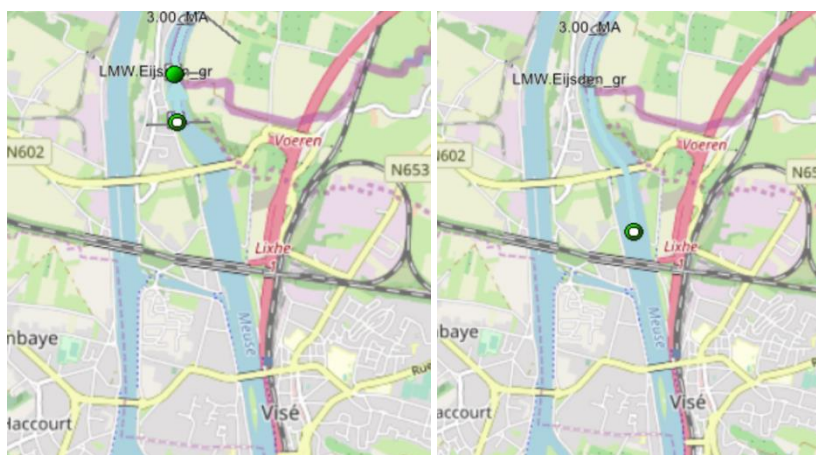
De volgende takken zijn verwijderd uit het 1D model:

- Julianakanaal
- OudeMaas_SVW1
- OudeMaas_SVW2
- Lateraalkanaal1
- Lateraalkanaal2
- Roer_retentie
- Roer1
- Roer2
- Aa
- Dieze
- Dommel
- BosscheBroek
- BenedenDommel
- Vug_gem_eng
- DrongelsKanaal1_A
- DrongelsKanaal1_B
- DrongelsKanaal2
- DrongelsKanaal3

De dwarsprofielen voor deze takken werden niet aangemaakt met WAQ2PROF, en vele van deze takken vielen buiten het gebied van het 2D model. Zie ook paragraaf 2.2 voor de motivatie voor deze aanpassingen.

Omdat het 2D model begint bij stuw Lixhe, is de knoop 'Eijsden' verwijderd en zijn de takken 'BovenEijsden' en 'Kalkmaas1' samengevoegd in een nieuwe tak ('BovenEijsden'). Deze tak is uitgebreid tot 500 m bovenstrooms van stuw Lixhe (N602, zie Figuur 3.6) (vanwege numerieke argumenten, zie de motivatie in paragraaf 3.2.2). De naam van het bovenstroomse punt is hernoemd naar BovenLixhe.

De bovenstroomse 500 m valt buiten het 2D model. Het is echter niet nodig voor dit segment een (uniek) dwarsprofiel te definiëren.



Figuur 3.6 Bovenstroomse rand in het G5 SOBEK model bij BovenEijsden (links) en het pilot G6 SOBEK model bij BovenLixhe (rechts).

3.2.2 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden van het 1D model zijn identiek aan die van het 2D model. De bovenstroomse randvoorwaarde 'Lixhe' in 2D is in het 1D model toegepast op de 1D knoop BovenLixhe¹.

3.2.3 Kunstwerken

RealTimeControl (RTC) is uitgeschakeld, en de stuwhoogtes zijn op eenzelfde hoogte gezet als die in het 2D model (gestreken/open toestand).

3.2.4 Retentiegebieden

Enkel eenzijdige retentiegebieden zijn behouden. Zie paragraaf 2.2 voor de motivatie voor deze aanpassingen.

3.2.5 Extra ruwheden

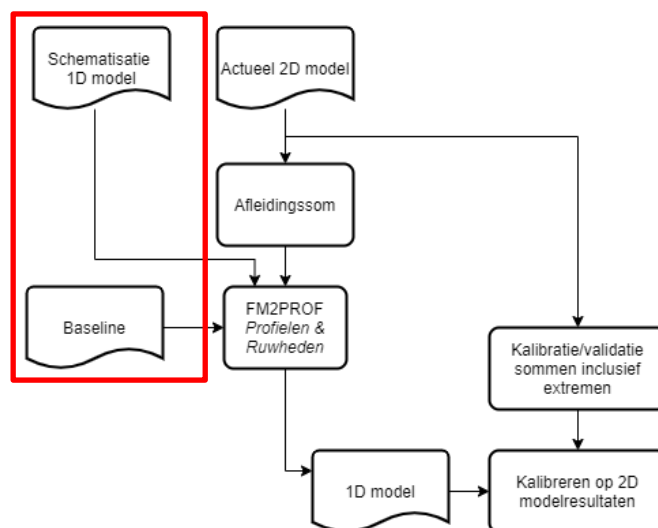
Alle lokale ruwhedsverhogingen (extra ruwheden) zoals bij bruggen zijn verwijderd. Zie paragraaf 2.2 voor de motivatie voor deze aanpassingen.

3.2.6 Initiële conditie

De initiële condities zijn op een vergelijkbare manier aangemaakt als in het 2D model met de stappen:

- 1 Voor de eerste som gebruiken we een stationaire randvoorwaarde van $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ bovenstrooms, een initiële waterdiepte van 2 m en een initiële afvoer van $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.
- 2 Draai een simulatie voor 68 dagen.
- 3 Gebruik de eindsituatie van deze simulatie als initiële conditie.

3.3 Het klaarzetten van invoerbestanden voor FM2PROF



Figuur 3.7 Stroomschema van de werkwijze op een 1D model op te zetten. Het deel van de methode beschreven in deze paragraaf staat rood omrand.

¹ Door het 'staggered grid' en de wijze dat randvoorwaarden in het rekenhart zijn opgenomen van SOBEK3, is in de vijfde generatie de fictieve locatie 'BovenEijsden' toegevoegd om ervoor te zorgen dat bij het eerstvolgende rekenpunt 'Eijsden' de correcte afvoer wordt gemodelleerd. Deze werkwijze is in deze pilot herhaald voor het punt Lixhe.

3.3.1 Sectievakken (SectionPolygonFile)

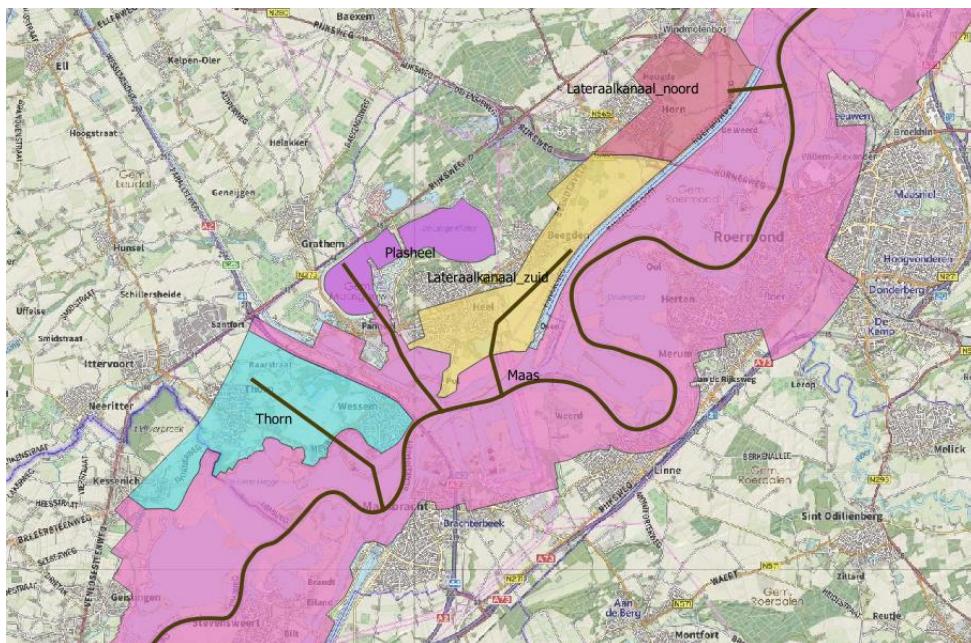
Een sectievak wordt alleen gebruikt om onderscheid te maken tussen winterbed en zomerbed. Dit polygoon wordt geëxporteerd uit Baseline. In Baseline bestaan er drie sectietypen: zomerbed, kribvakken (oevers) en winterbed. Voor gebruik in FM2PROF worden deze typen teruggebracht tot type 1 (zomerbed) en type 2 (samenvoeging van kribvak en winterbed). Het onderscheid tussen winterbed en zomerbed wordt door FM2PROF gebruikt voor het toekennen van de ruwheden.

3.3.2 Gebiedsvakken (RegionPolygonFile)

In tegenstelling tot WAQ2PROF, maakt FM2PROF geen gebruik van zgn. 'SOBEKvakken' om 2D punten toe te wijzen aan dwarsprofielen. In sommige gevallen is het echter nog steeds noodzakelijk om handmatig gebieden te onderscheiden om te voorkomen dat een deel van het zomerbed wordt toegekend aan een retentiegebied of bij samenstromingen en vertakkingen. Hiervoor maken we gebruik van gebiedsvakken.

In G5 was het nodig om het SECTIE4 programma te gebruiken om dwarsprofielen te maken voor retentiegebieden. Hiervoor werd buiten Baseline om een vierde sectie (retentiegebied) toegevoegd aan het Baseline sectiebestand. Dit is niet meer nodig in FM2PROF, maar we hebben wel gebruik gemaakt van deze 'sectie4' vakken om een onderscheid te maken tussen de hoofdgeul en retentiegebieden.

Er is een gebiedsvakkenbestand gemaakt waarin de Maas is onderverdeeld in 15 gebieden, nl. de rivier zelf en 14 retentiegebieden (Figuur 3.8).

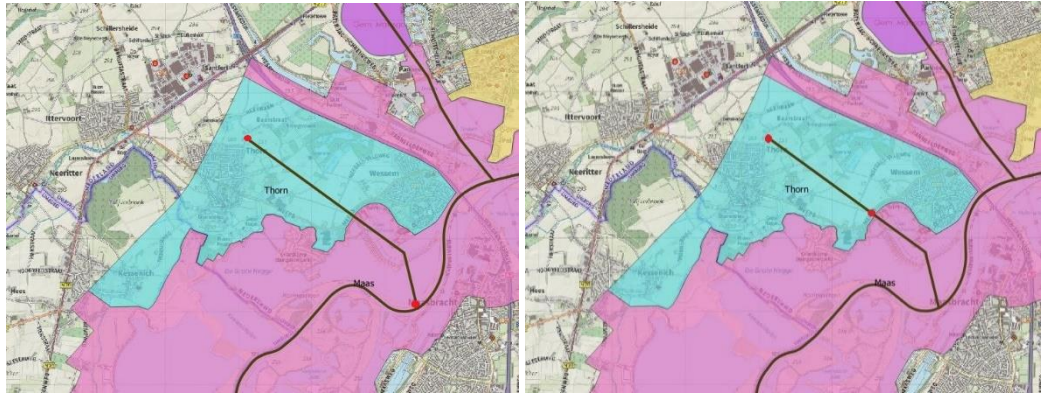


Figuur 3.8 Gebiedsvakken rond Roermond. Te zien is het Maas gebied en vier retentiegebieden. De donkere lijnen laat de SOBEK takkenstructuur zien.

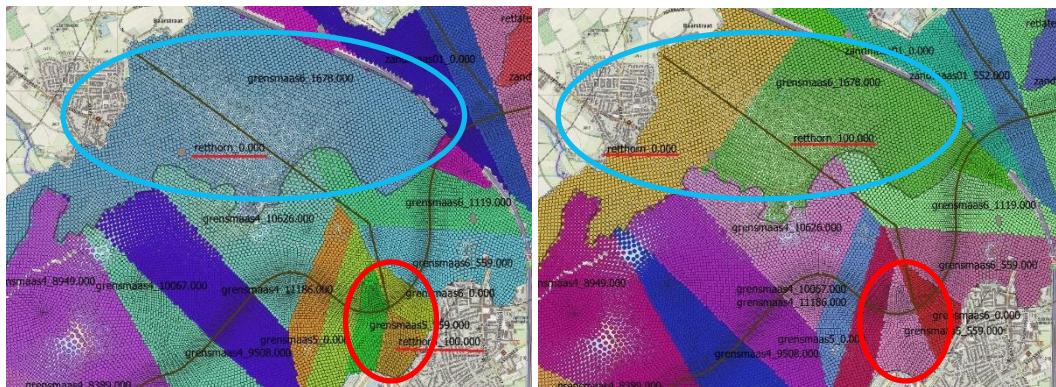
3.3.3 Dwarsprofiellocaties (CrossSectionLocationFile)

Het dwarsprofiellocatiebestand definieert de coördinaten waar een profiel moet worden gegenereerd. Dit bestand bevat ook informatie over lengte van elk dwarsprofiel, de tak waarop het dwarsprofiel moet liggen. Gebruikers kunnen een eerste versie van dit bestand maken door de functie `fm2prof.utils.networkdeffile_to_input` te gebruiken, dat onderdeel is van FM2PROF. Dit bestand moet hierna op een aantal punten worden aangepast.

Het script genereert een dwarsprofielpunt voor elk rekenpunt in het 1D model, ook op knopen. Bij vertakkingen leidt dit tot drie dwarsprofielpunten die dicht bij elkaar liggen. Waar retentiegebieden aantakken op de hoofdgeul, leidt dit ertoe dat het beschikbare oppervlakte wordt verdeeld over drie dwarsprofielen, terwijl het retentiegebied in werkelijkheid pas ver van de vertakking ligt. Om te voorkomen dat hierdoor de hoofdtak lokaal veel te kleine dwarsprofielen krijgt, moet dit bestand handmatig worden aangepast zodat alle profielen op de retentietak in het gebiedsvak voor het retentiegebied liggen (zie Figuur 3.9 en Figuur 3.10).



Figuur 3.9 Het eerste en laatste dwarsprofielpunt voor RetThorn. Links het automatisch gegenereerde bestand, rechts de handmatige aanpassing.



Figuur 3.10 De verdeling van 2D punten over dwarsprofielen (kleuren links en rechts komen niet overeen). Zie dat in de figuur links het gebied rondom de aantakking van retentiegebied Thorn (rode cirkel) is verdeeld over drie dwarsprofielen en rechts (na handmatige aanpassing) over twee. Na deze aanpassing wordt het retentiegebied zelf (blauwe cirkel), conform de gewenste schematisatie, opgesplitst in twee deelgebieden.

3.3.4 Conversie van geojson naar netcdf bestanden

De toewijzing van 2D punten aan specifieke gebieden en secties voor een model zo groot als de Maas duurt te lang om door FM2PROF uit te laten voeren. Daarom is gebruik gemaakt van de DeltaShell om dit te doen. Hiervoor zijn de volgende stappen genomen:

- 1 Het 2D map uitvoerbestand is ingeladen in de DeltaShell.
- 2 Met het python script 'FM2PROF.py' (zie bijlage B) wordt het gebieds- of sectiebestand ingeladen en wordt classificatie uitgevoerd. Deze informatie wordt opgeslagen in de bodemhoogteinformatie van het ingeladen map bestand.
- 3 De map uitvoer wordt geëxporteerd als een nieuw NetCDF bestand:
 - a <naam>_SECTIONBATHY.nc voor sectievakken
 - b <naam>_REGIONBATHY.nc voor gebiedsvakken.
- 4 FM2PROF herkent deze NetCDF bestanden en zal ze inlezen.

3.4 Visuele inspectie van FM2PROF uitvoer

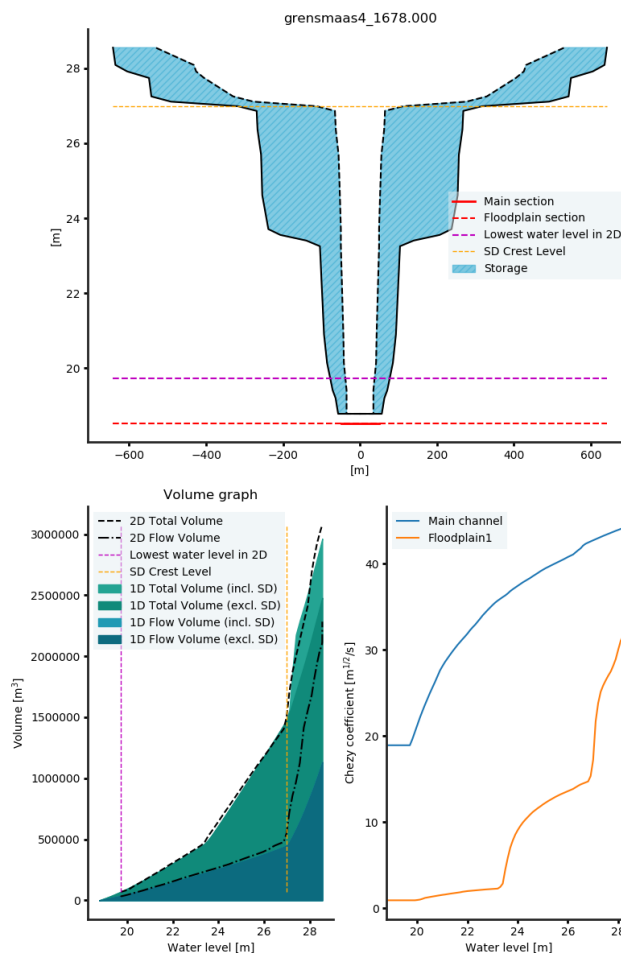
De uitvoer die met FM2PROF is aangemaakt, is visueel geïnspecteerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de daarvoor beschikbare functie in FM2PROF (*fm2prof.utils.VisualiseOutput*). Een voorbeeld van deze visualisatie is gegeven in Figuur 3.11.

We inspecteren deze uitvoer op enkele punten. In Figuur 3.11 zien we dat de algemene vorm overeenkomt met wat op basis van ervaring met WAQ2PROF kan worden verwacht, op basis waarvan de uitkomst 'plausibel' is. Maar er zijn meer punten, waarop het profiel gecontroleerd kan worden. Hier beschrijven we enkel van de belangrijkste punten, aan de hand van Figuur 3.11. In appendix A.1 is de begeleidende figuur overgenomen uit de (Engelstalige) handleiding. Op basis van deze inspectie zijn enkele correcties uitgevoerd, waarna de algemene indruk was dat de profielen en ruwheden zijn aangemaakt volgens verwachting.

3.4.1 Zomerdijk

Bij het overstromen van de zomerdijk ontstaat plotseling een grote toename in het (stroomvoerend en bergend) volume. Doordat deze plotselinge toename niet kan worden opgenomen in een dwarsprofiel is in het SOBEK-model de optie aanwezig het volume te vergroten met de optie 'zomerdijk'. Door FM2PROF wordt de grootste plotselinge sprong in volume die gevonden wordt in het 2D model, toegekend aan een dwarsprofiel met deze zomerdijk-optie. Voor meer gedetailleerde beschrijving, zie kader 1 (hoofdstuk 3.5.2).

In Figuur 3.11 is te zien dat de hoogte van de zomerdijk (oranje lijn) samenvalt met een plotseling verbreding van het winterbed. Dit is de verwachting, als er inderdaad een zomerdijk is. Dit kunnen we verder nagaan in de volumegrafiek (links onder). Hier zien we ter hoogte van de zomerdijkruin (gele lijn) een plotselinge toename in het 2D volume. Dit is typisch voor een 'zomerdijkeffect' – een plotselinge toename in volume bij geringe toename in waterstand duidt op het vollopen van gebied achter een zomerdijk.



Figuur 3.11 Visualisatie van FM2PROF uitvoer voor profiel 'Grensmaas4_1678.000, inclusief de zomerdijk (SD).

3.4.2 Splitsing tussen 'waterstandsafhankelijk' en 'waterstandsonafhankelijk' profiel

FM2PROF berekent profielen en ruwheden vanaf de laagste waterstand in de 2D afleidingssom. Het profiel onder deze waterstand wordt 'waterstandsonafhankelijk' berekend (ten opzichte van de waterstandsafhankelijke berekening voor het profiel uit de voorgaande paragraaf). Voor het afleiden van het waterstandsonafhankelijke deel van het dwarsprofiel wordt van het water in het zomerbed het totale volume en de verdeling in waterdiepte bepaald. In enkele stappen (geconfigureerd op 10) wordt hiermee het onderste deel van het dwarsprofiel opgebouwd. De paarse lijn geeft aan waar de scheiding tussen deze twee berekeningen ligt. De overgang tussen deze twee profielen is idealiter geleidelijk. Bij een plotselinge toename in volume of profielbreedte ter hoogte van de paarse lijn, is nadere analyse van GIS uitvoer aan te raden (zie appendix A.1.2). Figuur 3.11 geeft geen aanleiding voor verdere inspectie.

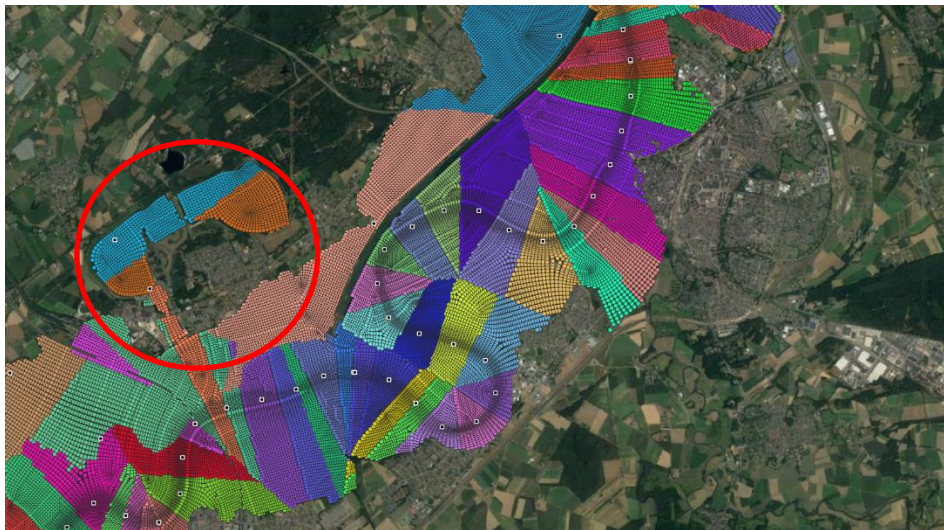
3.4.3 Ruwheid

Bij het inspecteren van de ruwheidsgrafiek (Figuur 3.11) verwachten we te zien, dat de Chézy coëfficiënt van de hoofdgeul (blauwe lijn) hoger ligt dan die van de uiterwaarden (oranje lijn). Verder verwachten we waarden in de orde grootte van 20 tot 50 $m^{1/2}/s$, hoewel dit kan verschillen als het 2D model sterk afwijkende of gekalibreerde ruwheden heeft. De Chézy coëfficiënt van het winterbed begint veel later met stijgen, wat samenvalt met het volstromen van het winterbed. Omdat de kribvakken in de pilot zijn meegenomen met het winterbed, kan het zijn dat de Chézy coëfficiënt hier al eerder stijgt. Vanwege de geringe waterdieptes in de uiterwaard in vergelijking met die in de hoofdgeul, zijn de verwachte Chézy waarden veel lager.

3.4.4 Toewijzen van 2D uitvoer aan dwarsprofielen

In WAQ2PROF moet 2D modeluitvoer handmatig worden toegewezen aan dwarsprofielen door middel van *sobekvakken*. In FM2PROF gebeurt deze toewijzing automatisch op basis van k-Nearest Neighbour, met inachtneming van de gebiedsvakken (*RegionPolygons*) (zie sectie 3.3.2). Deze automatische toewijzing kan visueel gecontroleerd worden. Hier visualiseren wij de optionele uitvoer die wordt aangemaakt als `ExportMapFiles` in het configuratiebestand op `True` staat.

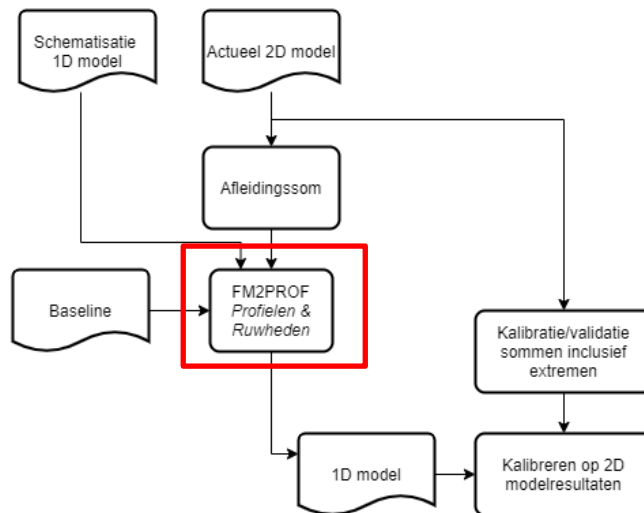
In Figuur 3.12 is te zien dat deze toewijzing niet goed is gegaan rondom het retentiegebied bij Heel. Hier is te zien dat een te groot gebied is toegewezen aan het retentiegebied, waardoor een deel van de hoofdriever ten onrecht wordt toegewezen aan het retentiegebied. Dit kan gebeuren als een dwarsprofiellocatie op een retentietak net buiten het gebiedsvak ligt, en daardoor als een hoofdtak wordt gezien (zie verdere uitleg in sectie 3.3.2). In dit geval bleek het geen fout te zijn – de kleuren van het dwarsprofiel in het retentiegebied en in de riviertak lijken simpelweg sterk op elkaar. Desalniettemin wordt het aangeraden om op deze manier de FM2PROF invoerbestanden te controleren.



Figuur 3.12 Visuele inspectie van de dwarsprofieltoewijzing, met het potentiële probleemgebied rood omcirkeld.

3.5 Gevoeligheidsanalyse van FM2PROF parameters

FM2PROF beschikt over enkele parameters die door gebruikers gevarieerd kan worden. In deze paragraaf onderzoeken we de instellingen van enkele van deze parameters om het effect op de aangemaakte dwarsprofielen te bestuderen.



Figuur 3.13 Het deel van de methode beschreven in deze paragraaf.

3.5.1 Instellingen

In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van alle parameters in het configuratiebestand. Een selectie van deze parameters zijn één voor één gevarieerd om het effect te onderzoeken op de gesimuleerde waterstanden. Het doel van deze analyse is om te zien in hoeverre aanpassingen hiervoor het gekalibreerde verschil tussen 1D en 2D waterstanden verbeterd. In Tabel 3.2 staat welke combinaties van parameterwaarden zijn doorgerekend. Voor deze selectie van parameters staat hieronder uitgelegd, wat ze doen.

AbsoluteVelocityThreshold [m/s] en RelativeVelocityThreshold [-]

Deze twee parameters worden gebruikt om stroomvoerende gebieden te onderscheiden van bergende gebieden. De onderdelen van een dwarsprofiel die niet bijdragen aan de stroming worden aangewezen als 'berging' in SOBEK. Een 2D gridcel wordt gerekend tot stroomvoering indien wordt voldaan aan alle van de volgende eisen:

- De waterdiepte is groter dan 0.
- De (dieptegemiddelde) stroomsnelheid is groter dan *AbsoluteVelocityThreshold*.
- De (dieptegemiddelde) stroomsnelheid is groter dan de *RelativeVelocityThreshold* maal de dwarsprofielgemiddelde stroomsnelheid van alle gridcellen die aan het dwarsprofiel zijn toegewezen.

LakeTimeSteps

Deze parameter bepaalt de hoeveelheid tijdstappen in de 2D modeluitvoer die worden gebruikt om vast te stellen of een gridcel hydraulisch verbonden is met de hoofdgeul (ook wel 'aangetakt'). Als de waterstand in de eerste LakeTimeSteps niet stijgt, maar wel nat is, wordt de gridcel aangemerkt als (niet-aangetakte) 'plas'. Zie ook de toelichting in kader in hoofdstuk 3.5.2.

Omdat de 2D-simulatie wordt uitgevoerd met gestreken stuwen, wordt in dit geval door FM2PROF dus gezocht naar de niet-aangetakte bij (fictieve) lage waterstanden. Mogelijk beïnvloedt dit de toekenning van plassen als aangetakt of niet-aangetakt.

SDOptimisationMethod

SOBEK profielen beschikken over de optie om een 'zomerdijk' toe te voegen. Dit is een extra hoeveelheid stroomvoerend of bergend volume dat vrij komt, zodra een bepaalde waterstand is bereikt. De instellingen van deze zomerdijk worden bepaald door middel van een optimalisatie algoritme. Dit algoritme kiest de instellingen zo, dat het volume in het 1D profiel zo goed mogelijk het volume in het 2D oppervlakte benaderd. FM2PROF beschikt over drie opties. Bij 0 wordt geoptimaliseerd om het totale volume te benaderen, bij 1 wordt geoptimaliseerd op het stroomvoerend volume, en bij 2 wordt geprobeerd, om op beide te optimaliseren. Uit gevoeligheidsanalyse (zie Bijlage A.2.1) is optie 0 als standaard voorgesteld.

FrictionWeighingMethod

De ruwheid in 2D is ruimtelijk verspreid – iedere gridcel kan een andere ruwheid hebben. In 1D moet echter een tabel worden gegeven, waarbij voor iedere waterstand maar één ruwheidswaarde voor het hele winterbed kan worden gedefinieerd. Hiervoor moeten alle 2D punten worden samengevoegd tot één waarde. De wijze waarop dit gebeurt, wordt bepaald door de *FrictionWeighingMethod*. Er zijn twee opties: bij 0, wordt het gewone gemiddelde genomen, bij 1 het oppervlaktegewogen gemiddelde. Deze tweede optie neemt de variatie tussen grote en kleine gridcellen mee, maar vraagt iets meer rekenwerk. Het effect bij toepassing op de Maas is vermoedelijk klein vanwege de grote mate van uniformiteit in de gridcellen in het winterbed.

Tabel 3.1 Overzicht van parameters en hun standaardwaarde. De gekleurde waarden zijn gevarieerd in de gevoeligheidsanalyse.

Parameter	Standaardwaarde (default)
CaseName	TestName
MaximumPointsInProfile	20
AbsoluteVelocityThreshold	0.05 m/s
RelativeVelocityThreshold	0.03
MinimumDepthThreshold	0.02 m
BedlevelCriterium	0.05
LakeTimesteps	10
ExtrapolateStorage	TRUE
SDCorrection	TRUE
SDFloodplainBase	0.5 m
SDTransitionHeight	0.5 m
SDOptimisationMethod	0 (= zomerdijkbepaling op totaal volume)
FrictionWeighingMethod	0 (= simpel gemiddelde)
ExportMapFiles	TRUE
CssSelection	-
SkipMaps	1
ClassificationMethod	1 (= DeltaShell)
MinimumTotalWidth	0.5 m

Tabel 3.2 De parameterinstellingen voor de referentie en de acht scenario's die zijn doorgekend.

Scenario	Omschrijving	absolute velocity threshold	relative velocity threshold	SD optimisation method	friction weighing method	lake timestep
def	Standaard/Default instellingen	0.05	0.03	0	0	10
abs_low	Lage absolute snelheidsgrens	0.025	0.03	0	0	10
abs_high	Hoge absolute snelheidsgrens	0.075	0.03	0	0	10
rel_low	Lage relatieve snelheidsgrens	0.05	0.01	0	0	10
rel_high	Hoge relatieve snelheidsgrens	0.05	0.05	0	0	10
opt1	Zomerdijkbepaling op stromend volume	0.05	0.03	1	0	10
opt2	Zomerdijkbepaling op totaal & stromend volume	0.05	0.03	2	0	10
fric1	Ruwheidsmiddeling methode 1	0.05	0.03	0	1	10
lake20	Plassendetectie op 20 tijdstappen	0.05	0.03	0	0	20

3.5.2 Resultaten

Als eerste vergelijking is gekeken naar het effect van ieder scenario ten opzichte van het scenario 'def' op elke rivierkilometer, voor elke 7 dagen vanaf dag 15 tot dag 64 van de afleidingssom (Figuur 3.3). De afvoer bij Lixhe op deze dag is ongeveer:

- Dag 15: 203 m³/s
- Dag 22: 439 m³/s
- Dag 29: 686 m³/s
- Dag 36: 975 m³/s
- Dag 43: 1272 m³/s
- Dag 50: 1872 m³/s
- Dag 57: 2914 m³/s
- Dag 64: 4824 m³/s

De volledige resultaten staan in appendix A.1. Over het algemeen zien we:

- Het verlagen van *AbsoluteVelocityThreshold* (standaard: 5 cm/s) met 2.5 cm/s leidt tot kleine bergende breedte, hogere stroomvoerende breedte en tot zo'n 10 cm lagere waterstanden. Het verhogen van *AbsoluteVelocityThreshold* met 2.5 m/s heeft het omgekeerde effect, met tot 10 cm hogere waterstanden.
- De *RelativeVelocityThreshold* (standaard: 3%) heeft weinig effect. Dat is te verwachten: deze parameter is bedoeld om in situaties waarbij de gemiddelde snelheid laag is, niet het hele profiel als bergend aan te merken. Dat is in de Maas niet het geval.
- De parameter *SDOptimisationMethod* (standaard: optimaliseren op totaal volume) heeft zeer veel invloed. Optimaliseren op stromend volume leidt tot lagere waterstanden – lokaal tot wel 3 m. Dit is goed te verklaren, zie hiervoor Kader 1.
- Het gewone of gewogen middelen van de ruwheid heeft weinig invloed, hoewel het zeer lokaal op de Grensmaas tot grote verschillen kan leiden.

- Het verhogen van *LakeTimeSteps* kan vooral lokaal veel effect hebben. Het wordt aangeraden om een visuele controle uit te voeren op de plassen als er twijfel is dat plassen niet goed worden herkend. Een verhoging naar 20 tijdstappen leidt tot minder plasherkenning, en daardoor een groter bergend volume. Bij een goede initialisatie moet de waarde van deze parameter zo klein mogelijk zijn: nl. op een waarde dat redelijk kan worden aangenomen dat de waterstanden in de hoofdgeul zijn gestegen. Zie Kader 2 voor meer uitleg.

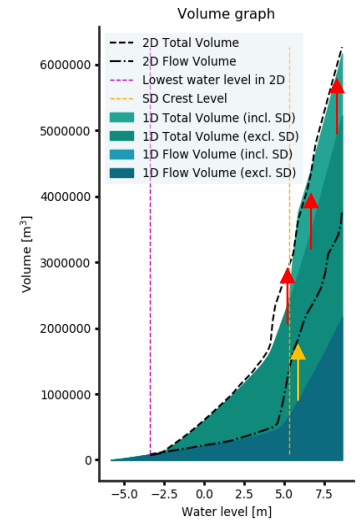
Op basis van de deze gevoeligheidsanalyse wordt besloten de vergelijking met 2D en verdere kalibratie voort te zetten met de standaardinstellingen.

Kader 1

Zomerdijkoptimalisatie

In nevenstaande figuur is de volumegrafiek van een profiel op de Getijmaas getoond. Het doel van de zomerdijk is om plotselinge toename van volume bij langzaam toenemende waterstand, wat niet met een normaal 1D profiel kan worden gereproduceerd, toch in het model te brengen. In dit profiel zien we niet 1, maar 3 van dit soort effecten optreden (rode pijlen), en we zien bovendien dat het tweede effect het grootst was en wordt gecompenseerd (SOBEK ondersteunt maar één zomerdijk).

We zien dit effect ook – en heviger – in de toename van het stromend volume (oranje pijl). Dit wordt niet gecompenseerd. Om dit te begrijpen moet men beseffen dat het stromend volume onderdeel is van het totaal volume. Wat dus verandert bij de oranje pijl is de verhouding tussen stroomvoering en berging – er komt niet opeens heel veel totaal volume bij. Dit specifieke dwarsprofiel ligt bij St. Andries, waar de uiterwaard bestaat uit veel (aangetakte) plassen (waaronder het kanaal van St. Andries). Onder normale omstandigheden is dit bergend volume, maar bij hogere afvoeren komen de stroomsnelheden boven de drempelwaarden uit en wordt de gehele cel stroomvoerend. De plotselinge toename in stromend volume kan dus beter worden gezien als een artefact van het wat kunstmatige onderscheid tussen stroomvoering en berging, en een fundamenteel verschil tussen 1D en 2D.



Plasherkenning

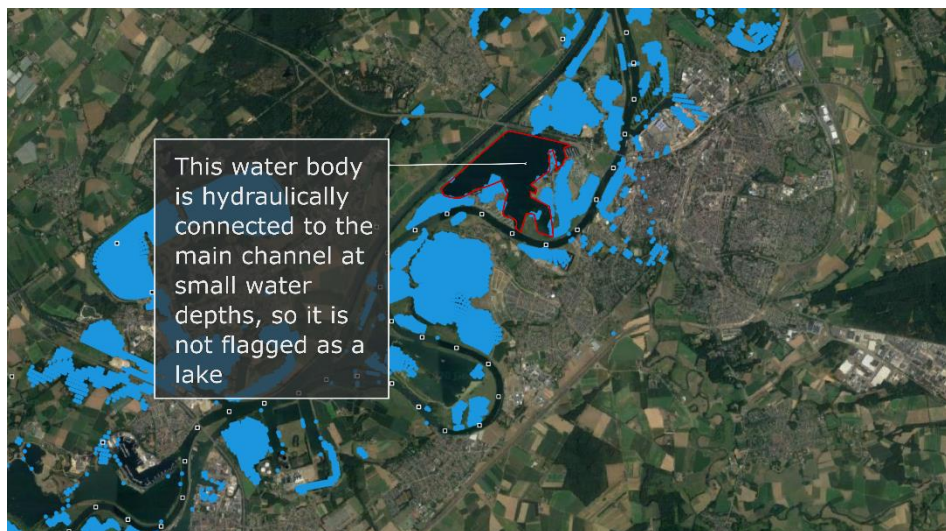
Plassen zijn waterlichamen in de uiterwaard. Ze zijn vaak niet hydraulisch verbonden ('niet-aangetakt') met de hoofdgeul en stijgen pas mee als de uiterwaarden instromen. Er zijn ook plassen die *wel* hydraulisch verbonden ('aangetakt') zijn aan de hoofdgeul en meestijgen – zoals veel (jacht)havens, maar ook die soms pas vanaf een bepaalde waterstand.

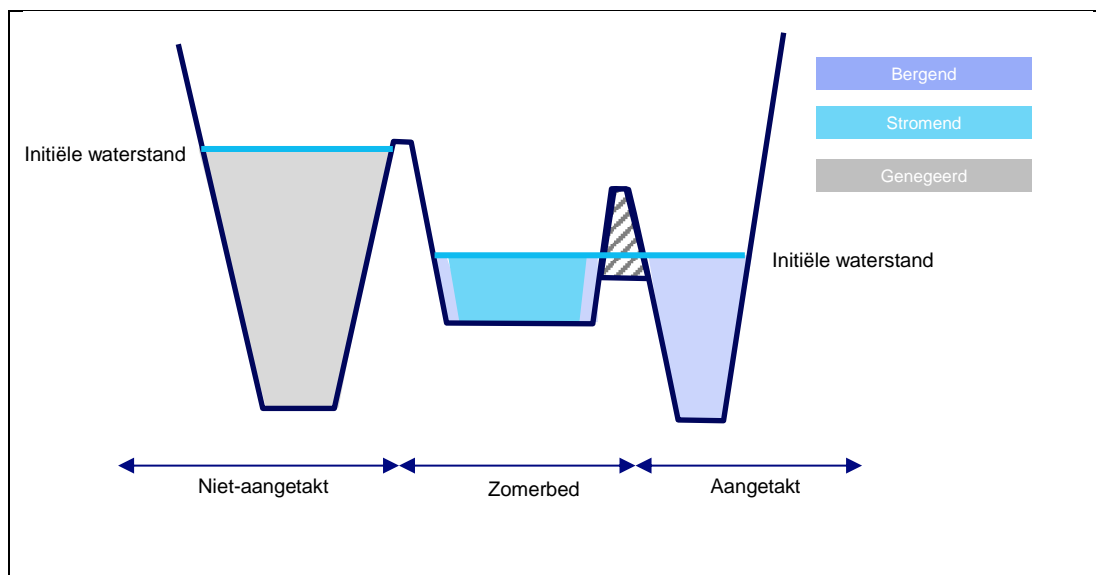
FM2PROF bepaalt wat een plas is door te kijken of de waterstand de eerste paar tijdstappen meestijgt met het zomerbed. Het onderscheidt tussen plas en 'geen plas' is alleen belangrijk bij de zgn. *waterstandsonafhankelijke berekening*. Als een plas op de eerste tijdstappen verbonden is met de hoofdgeul, wordt aangenomen dat hij verbonden blijft – FM2PROF heeft namelijk geen idee of de plas bij een nog lagere waterstand de aansluiting verliest, omdat die informatie niet aanwezig is in de 2D modelresultaten. Dat betekent dat het oppervlakte van een aangetakte plas op gelijke wijze wordt afgehandeld als het zomerbed, en tot op de bodem van het profiel wordt meegeteld (dat is meestal bergend, vanwege lage stroomsnelheden).

Als een plas niet verbonden (niet-aangetakt) is met de waterstanden in het zomerbed, dan wordt dit oppervlak in de waterstandsonafhankelijke berekening niet toegekend aan het SOBEEK dwarsprofiel. Dit oppervlak wordt genegeerd omdat het hydraulisch nog niets toegevoegd. Pas als de waterstanden toenemen boven de initiële waterstand wordt deze toename in volume toegekend aan het dwarsprofiel.

Men kan visueel controleren of FM2PROF iets als een (niet-aangetakte) plas aanmerkt. In onderstaande figuur zijn alle blauwe gebieden automatisch aangemerkt als plas. Die zijn dus nat op de eerste tijdstap, maar stijgen bij lage afvoeren niet mee het zomerbed. Het rode gebied stijgt wel mee vanaf het begin, en is dus hydraulisch verbonden ('aangetakt') in de 2D simulatie.

Een schets van de verdeling in oppervlakte tijdens de waterstandsonafhankelijke berekening is hieronder opgenomen.





3.6 Ongekalibreerde vergelijking met 2D

3.6.1 Waarom een ongekalibreerde vergelijking wordt uitgevoerd

Nadat de dwarsprofielen en ruwheden zijn aangemaakt, worden deze geïmporteerd in het 1D model, en wordt een berekening uitgevoerd met de 2D afleidingssom (zie paragraaf 3.1). De berekende waterstanden met het 1D model worden vergeleken met die van het 2D model. Dit noemen we een 'ongekalibreerde vergelijking', omdat we direct de zomer- en winterbedruwheden gebruiken uit FM2PROF.

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

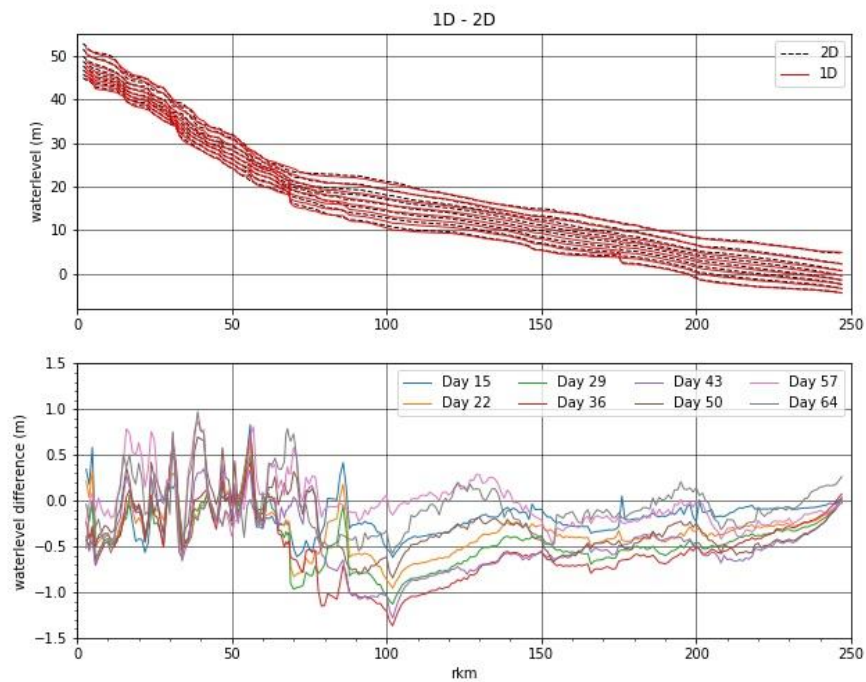
3.6.2 Resultaten pilot

De berekende waterstanden uit het 1D model (standaardinstellingen FM2PROF) zijn vergeleken met 2D resultaten (Figuur 3.14). Over het algemeen zien we een duidelijk verschil in het gedrag op de Grensmaas / Plassenmaas (rivierkilometer 3 tot 70) en de Zandmaas (benedenstrooms van rivierkilometer 80).

De Grensmaas heeft een relatief hoog verhang, hoge stroomsnelheden en een sterk meanderend karakter. De Plassenmaas heeft een sterk meanderend zomerbed en bevat daarnaast grote plassen die verdeeld moeten worden over meerdere dwarsprofielen. Op beide trajecten is er een grote verandering in het stroombeeld bij toenemende rivierafvoer, waarbij het water soms de kortste weg via de uiterwaarden neemt (een kortsluiting). Dit resulteert in verschillen tussen 1D en 2D met een sterk wisselend en lokaal karakter. Dit kan niet worden verminderd met globale oplossingen door andere instellingen in FM2PROF en wordt gezien als een eigenschap die samenhangt met de beperking van de 1D representatie van de stroming in dit deel van de rivier. Bovendien is het verhang groter, waardoor verschillen groter worden. Desalniettemin is het gemiddelde verschil op dit deel van de rivier kleiner. We zien dus een kleinere bias, maar een hogere spreiding. Het is onwaarschijnlijk dat dit met kalibratie kan worden verminderd.

De Zandmaas heeft in vergelijking veel meer het karakter van een gereguleerde laaglandrivier: lagere verhang en stroomsnelheden en een recht(getrokken) stroomgeul. We zien over het algemeen een lagere waterstand in 1D oplopend tot 1 meter verschil (Figuur 3.14). Dit verschil is het grootste op de middenafvoeren: het grootste verschil zien we op dag 36 (afvoer ca. 1050 m³/s). We zien hier dus een grote (afvoerafhankelijke) bias, maar een kleine spreiding. Deze bias kan waarschijnlijk worden verbeterd met kalibratie.

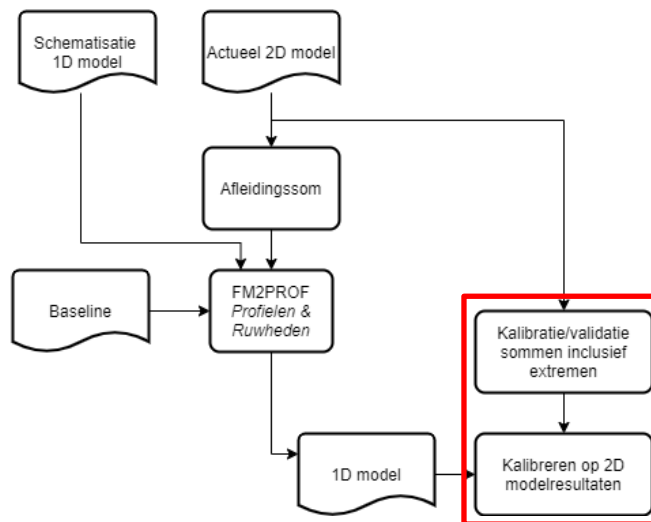
Omdat het verschil op de Grens- en Plassenmaas wordt gezien als een onoverkoombaar verschil tussen 1D en 2D, en het verschil op de Zandmaas uniform genoeg om te verwachten dat kalibratie het verschil voldoende kan reduceren, wordt op basis van deze resultaten besloten verder te gaan met de volgende stap.



Figuur 3.14 Het verschil tussen 1D (standaardinstellingen) en 2D waterstanden. De grootste afwijking bij rkm 101 is bij Stuw Belfeld.

4 Kalibratie en validatie

4.1 Kalibratiemethodiek



Figuur 4.1 Het deel van de methode beschreven in dit hoofdstuk.

In de 5^e generatie werden zowel het 1D als het 2D model gekalibreerd op piekwaterstanden (d.w.z. de periode rondom de afvoerpiek), waarbij de piekwaterstanden uit afvoergolven werd gebruikt om afvoerafhankelijk te kalibreren.

In deze pilot experimenteren we met een nieuwe kalibratieaanpak, waarbij het 1D model wordt gekalibreerd op het 2D model – dus niet op metingen. Hierdoor zijn er geen aanvullende 1D modellen nodig (om bijvoorbeeld te kalibreren op het hoogwater van 1995), die enkel tijdens kalibratie worden gebruikt. Dit past binnen het grondbeginsel van FM2PROF – nl. dat het 1D model een surrogaat is van het 2D model en vereenvoudigd het proces aanzienlijk.

Een tweede onderdeel van de vereenvoudiging van het kalibratieproces is de toepassing van de aanpak die is ontwikkeld door Domhof et al. (2018). Kern van de methode is dat alle kalibratieparameters (ruimtelijk en afvoerafhankelijk) tegelijk in één kalibratierun worden gekalibreerd. Hierbij wordt aangenomen dat het kalibratieprobleem redelijk convex² is (wat in de praktijk ook zo lijkt te zijn) waardoor een goede kalibratieresultaat (dus ruwheden) kan worden gevonden. De optimalisatiesoftware (OpenDA) wordt gevoed met de gehele tijdreeks van 2D modelresultaten. Omdat er niet met vensters wordt gerekend waardoor bijvoorbeeld wordt geoptimaliseerd op een kleine periode rond een piek, is het kalibratieresultaat niet nagenoeg perfect op de afvoerniveaus en minder goed er tussen in, maar wordt toegewerkt naar een zo klein mogelijke fout over alle afvoeren.

² Een zgn. convex optimalisatieprobleem heeft maar één oplossing. Een concaaf probleem heeft meerdere oplossingen.

Er is gekalibreerd op de zomerbedruwheid die is gespecificeerd met een afvoerafhankelijke Manning coëfficiënt, met een uniforme beginwaarde van $0.03 \text{ sm}^{-1/3}$. Hiervoor is de ruwheid van het zomerbed uit FM2PROF (waterstandsafhankelijke Chézy) dus niet gebruikt. Hoewel dit gezien kan worden als een enkele parameter, is deze coëfficiënt niet constant, maar afhankelijk van ruimte (rivierkilometer) en van afvoer. Hierdoor spreken we van een 'ruwheidsveld'. Het aantal punten in ruimte en afvoer in dit veld waarop de ruwheid via kalibratie bepaald moet worden is bepalend voor het totaal aantal parameters. De keuze voor het aantal punten is deels bepaald op ervaring, en deels op kalibratieresultaten (zie paragraaf 4.2).

Tijdens kalibratie zijn dezelfde randvoorwaarden als gepresenteerd in paragraaf 3.1 gebruikt (dus stijgende afvoer bij Lixhe/Eijsden) en zonder stuwsturing (stuwen zijn volledig gestreken).

4.2 Kalibratieresultaten

De initiële keuze voor het aantal ruwheidstrajecten (d.w.z. punten langs de rivier) en afvoerniveaus is gebaseerd op ervaring uit de 5^e generatie. Er zijn 25 ruwheidstrajecten gebruikt – gelijk aan de 6^e generatie en vier afvoerniveaus. Op basis van de resultaten van deze kalibratie zijn twee andere varianten doorgerekend. De drie kalibratievarianten zijn:

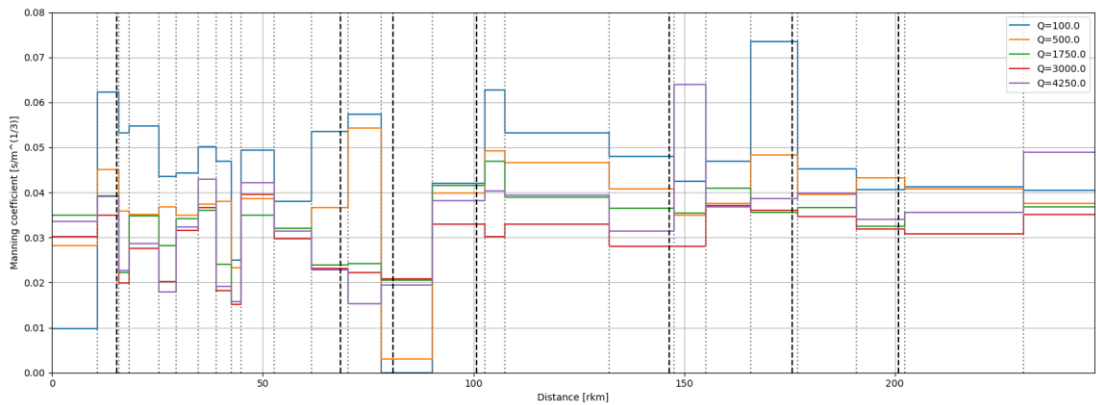
- 1 Initiële variant: Afvoerniveaus op 500, 1750, 3000 en $4250 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2 Vijf afvoerniveaus op 100, 500, 1750, 3000 en $4250 \text{ m}^3/\text{s}$
O.b.v. vier afvoerniveaus leek het beter om één extra afvoerniveau toe te voegen om afwijkingen bij hele lage afvoeren – waaronder operationeel gebruik de stuwen belangrijke invloed hebben – beter af te vangen.
- 3 5 afvoerniveaus op 100, 500, 1750, 3000 en $4250 \text{ m}^3/\text{s}$ waarbij de 25 'observatie' tijdreeksen niet op de LMW locaties maar op dichtstbijzijnde locatie op de rivier-as uit het 2D modelresultaat zijn gebruikt
O.b.v. 5 afvoerniveaus bleek het verschil bij lage afvoer tussen 1D en 2D grote invloed te hebben op voornamelijk de ruwheid van de laagste niveaus. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat bij lage afvoer en zonder stuwen meerdere LMW locaties in 2D droogvallen. Daarom zijn de locaties in 2D verplaatst naar de rivieras zodat de 2D initiële conditie overeenkomt met 1D.

Voor variant 3 zijn de resultaten in deze paragraaf gepresenteerd. Voor de andere varianten, zie bijlage B.

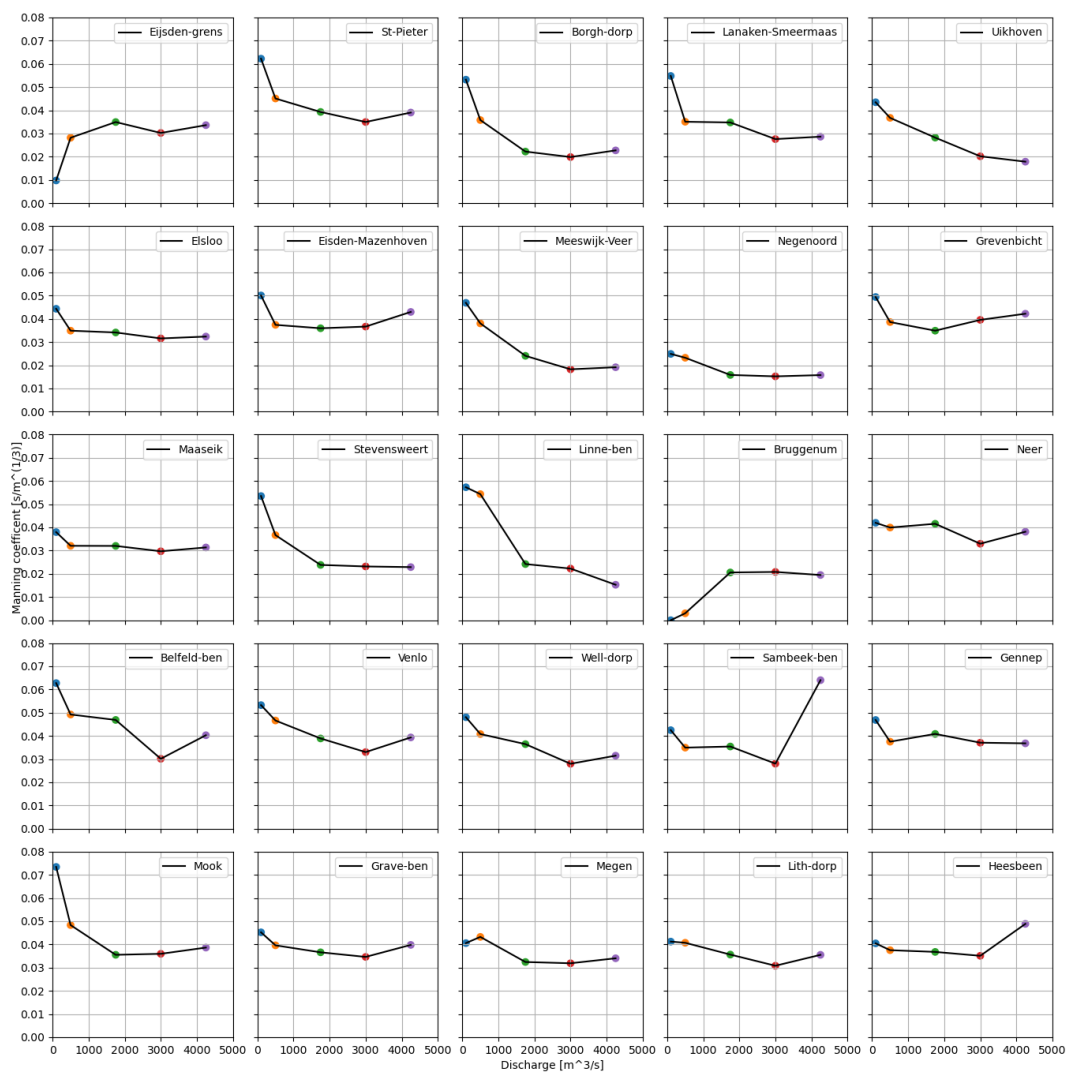
4.2.1 Gekalibreerde ruwheden

Figuur 4.2 toont het langspanprofiel van gekalibreerde zomerbed ruwheden voor 5 afvoerniveaus. Figuur 4.3 toont dezelfde ruwheden maar dan per ruwheidstraject als ruwheidsfunctie.

Over het algemeen zien we in zowel Figuur 4.2 als Figuur 4.3 dat de ruwheden niet veel afwijken van wat meestal wordt aangenomen als een fysisch realistische waarde voor slingerende/meanderende rivieren ($0.035 - 0.040 \text{ sm}^{-1/3}$). In Figuur 4.2 is te zien dat de ruwheid benedenstrooms wat hoger is dan die bovenstrooms. Daarnaast is bovenstrooms meer variatie te zien in de ruwheid dan benedenstrooms. Beide observaties zijn in lijn met de ongekalibreerde resultaten (zie sectie 3.6). In de afvoerafhankelijkheid (Figuur 4.3) zien we dat de ruwheid wat hoger is bij lage afvoeren, wat kan duiden op een compensatie voor beperkingen in de geometrie.



Figuur 4.2 Langsprofiel van gekalibreerde zomerbed ruwheden voor 5 afvoerniveaus (variant 3). Zwarte verticale gestreepte lijnen geven locaties van stuwen weer, grijze verticale stippellijnen grenzen tussen ruwheidstrajecten.

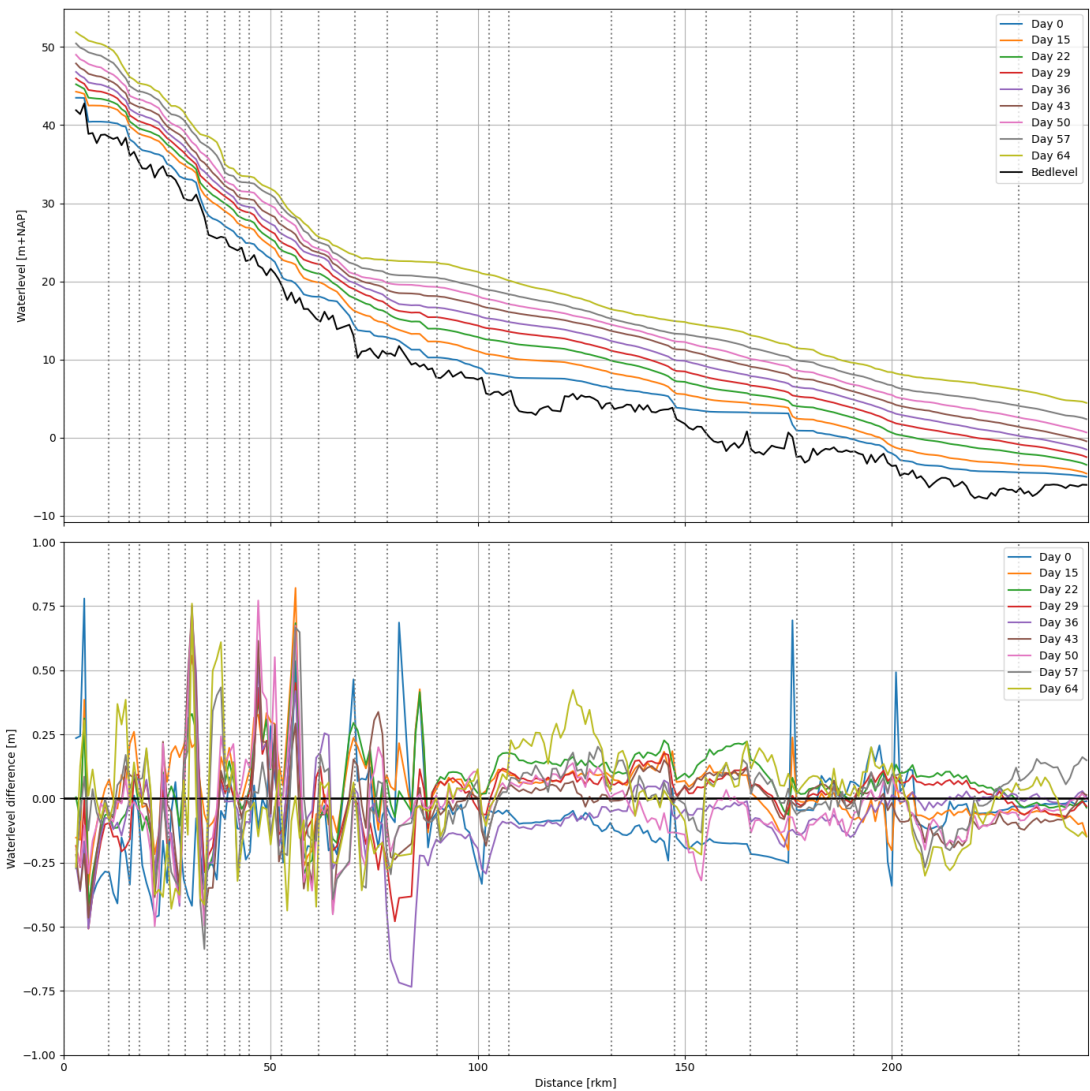


Figuur 4.3 Gekalibreerde zomerbed ruwheidsfuncties voor 5 afvoerniveaus (variant 3) per ruwheidstraject. Van linksboven naar rechtsonder trajecten bovenstrooms naar benedenstrooms.

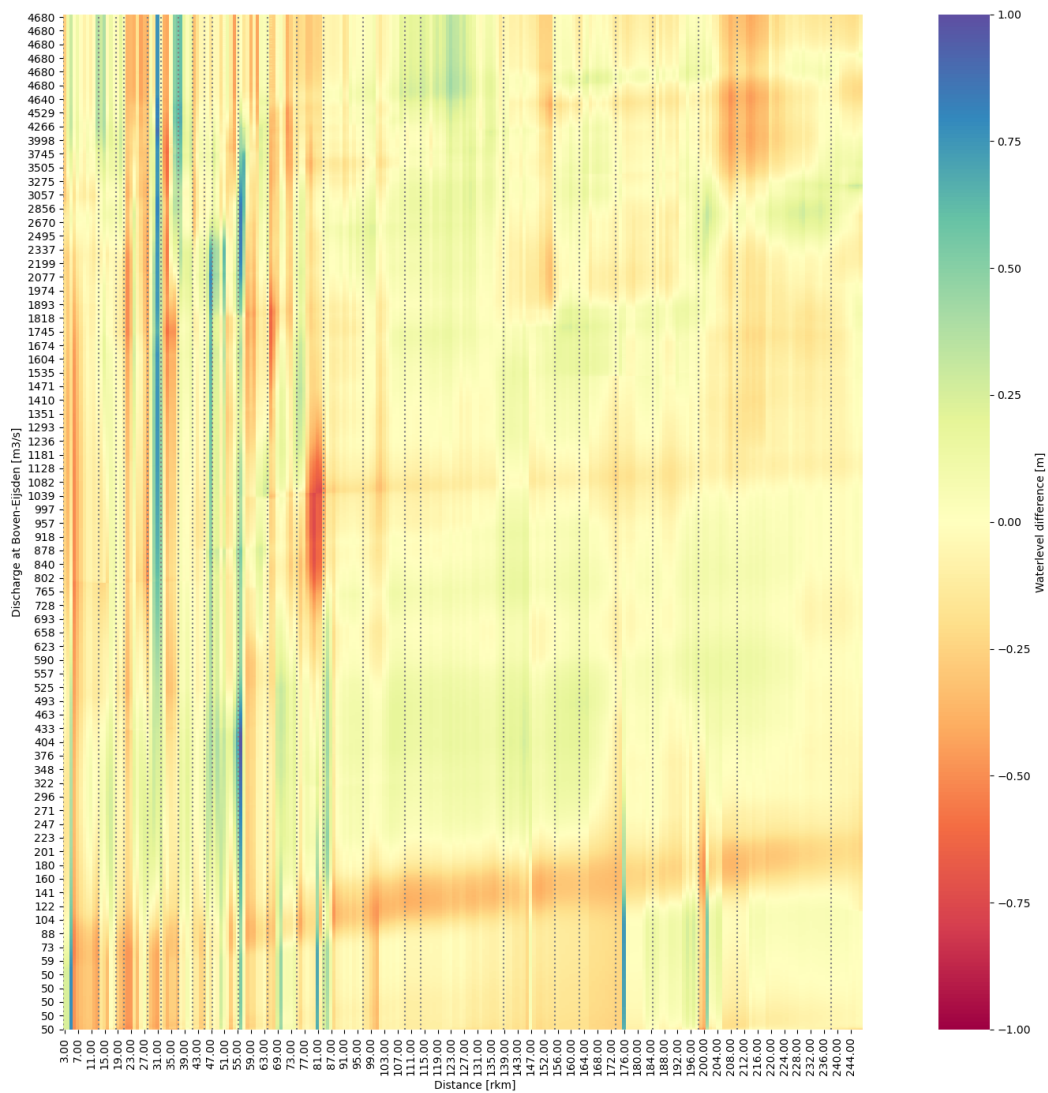
4.2.2 Gekalibreerde waterstanden

De resulterende waterstanden uit de kalibratie zijn in Figuur 4.4 en Figuur 4.5 gepresenteerd. Het doel van de kalibratie is om ter hoogte van grenzen van de ruwheidstrajecten, waar een observatie locatie is gesitueerd, de fout tussen observatie (het 2D model) en modelresultaat te minimaliseren. De fout wordt ook t.o.v. het ongekalibreerde resultaat (gepresenteerd in paragraaf 3.6) voornamelijk benedenstrooms sterk verkleind.

Omdat we vergelijken met 2D resultaat hebben we de mogelijkheid om de verschillen langs de hele rivier te bepalen, en voor elk tijdstip. Dit maakt veel meer informatie beschikbaar dan kalibratie op enkel meetstations, zoals gebruikelijk is bij het maken van 5^e generatie modellen. Een 'heatmap' figuur zoals Figuur 4.5, kan heel waardevol zijn om een voorselectie te maken van modelverbeteringen (zoals het toevoegen van een nevengeul), en achteraf te toetsen of verbeteringen de ongekalibreerde vergelijking met het 2D model verbeteren.



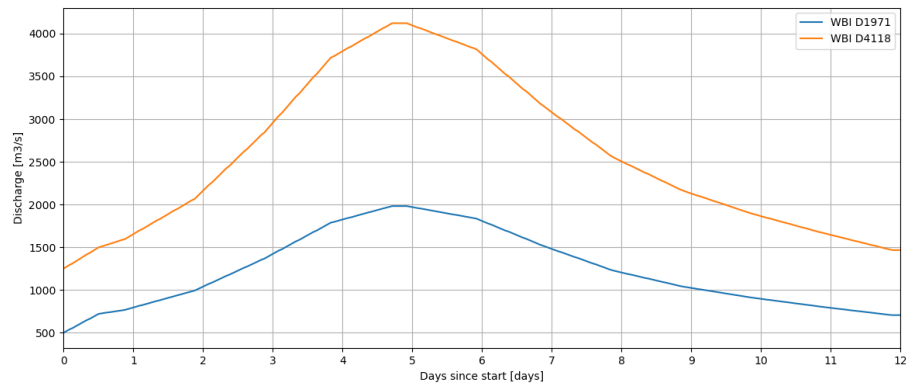
Figuur 4.4 Langsprofiel van waterstanden voor 1D kalibratieresultaat op verschillende momenten tijdens afvoergolf in bovenste plot. In onderste plot het verschil in waterstand t.o.v. 'observatie'/2D resultaat. Grijs verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.



Figuur 4.5 Verschil in waterstand van het gekalibreerde model (variant 3) t.o.v. 'observatie' (2D-model) gepresenteerd als heatmap. Op x-as rivierkilometers van boven- naar benedenstrooms en op y-as het tijdstip van de modelresultaat, vertaald naar de afvoer bij Eijsden op dat moment. Grijs verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

4.3 Validatieresultaat

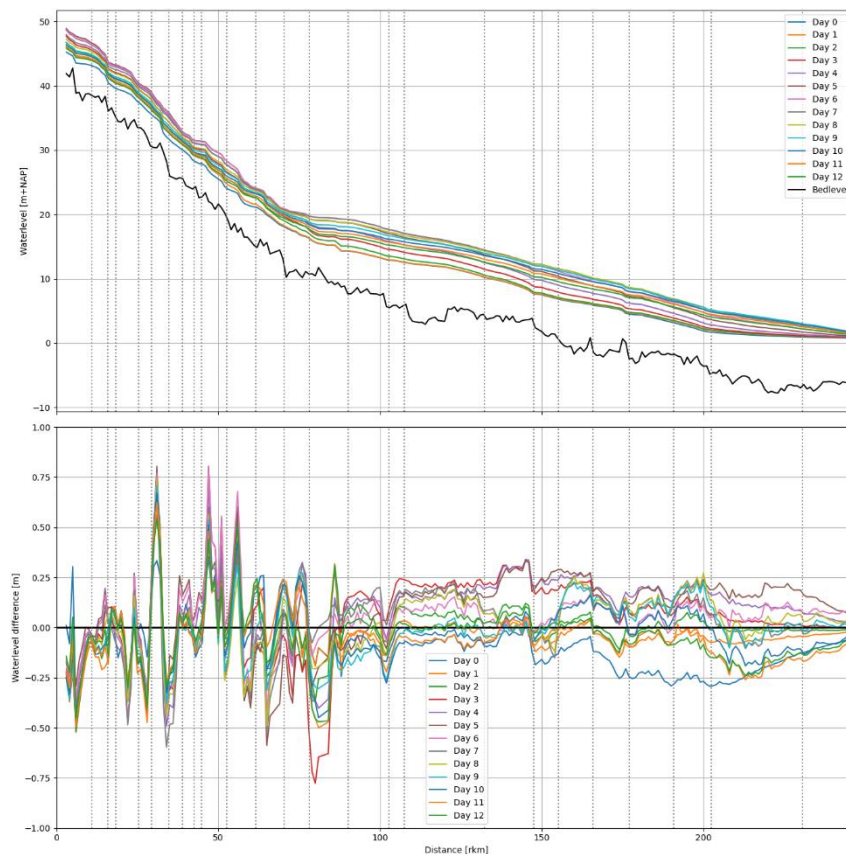
De validatie is uitgevoerd op twee golven. De randvoorwaarden voor deze scenario's is een selectie van de golven die zijn doorgerekend in het WBI17. Voor validatie zijn de WBI17-golven met pieken op 1971 m³/s en op 4118 m³/s gebruikt (zie Figuur 4.6).



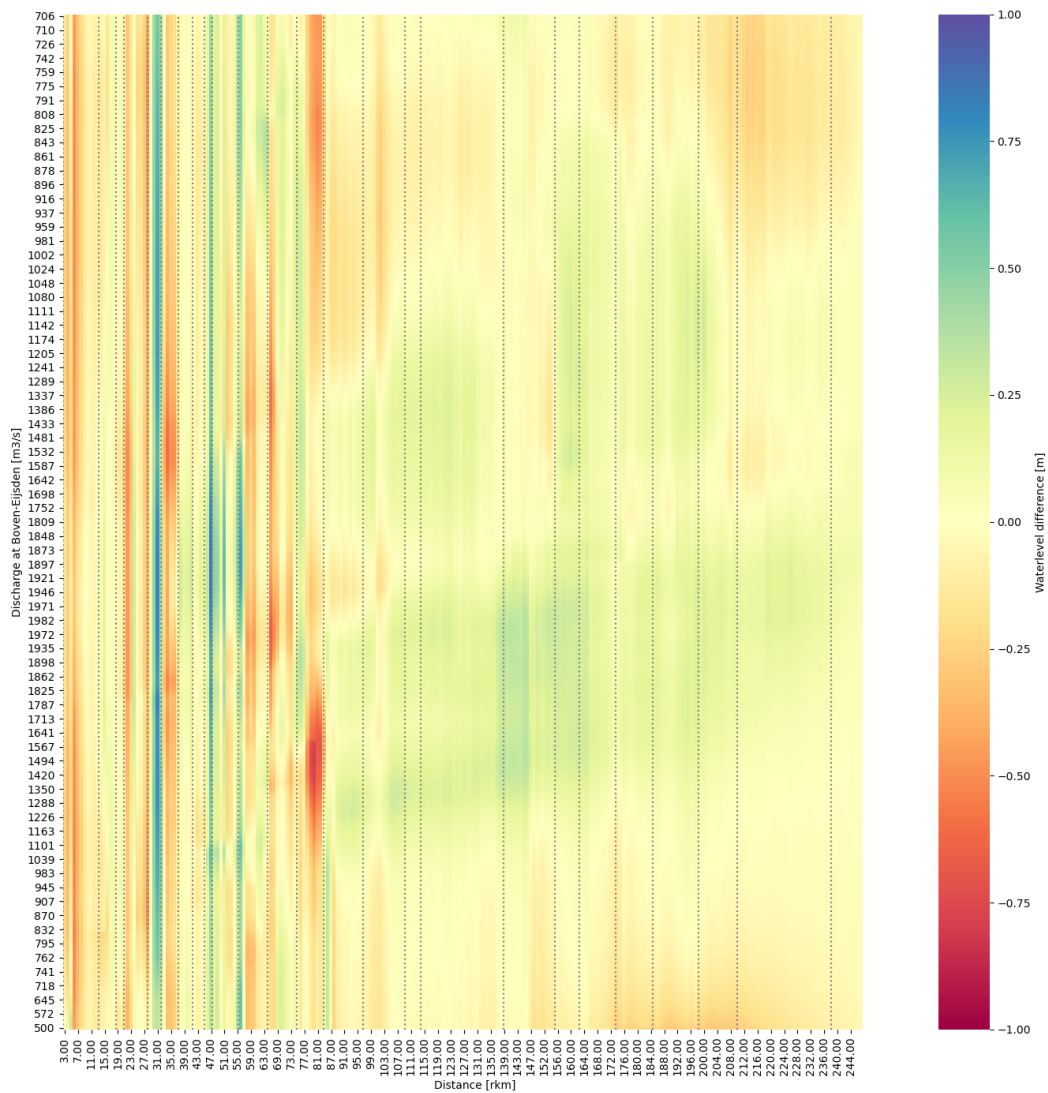
Figuur 4.6 WBI-golven met pieken op 1971 m³/s en 4118 m³/s gebruikt voor validatie.

4.3.1 WBI17-golf, piek 1971 m³/s

Figuur 4.7 toont het langspatief van de resulterende waterstanden inclusief verschil t.o.v. 2D resultaat voor de validatie met dynamische WBI17-golf, piek 1971 m³/s. Figuur 4.8 toont de verschillen in waterstand t.o.v. 2D resultaat voor dezelfde WBI17-golf in de vorm van een heatmap. De verschillen zijn in dezelfde orde grootte van de kalibratieresultaten, wat een indicatie is van robuustheid.



Figuur 4.7 Langspatief van waterstanden voor validatie met WBI17-golf, piek 1971 m³/s op verschillende momenten tijdens afvoergolf in bovenste plot. In onderste plot het verschil in waterstand t.o.v. het 2D resultaat. Grijsse verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

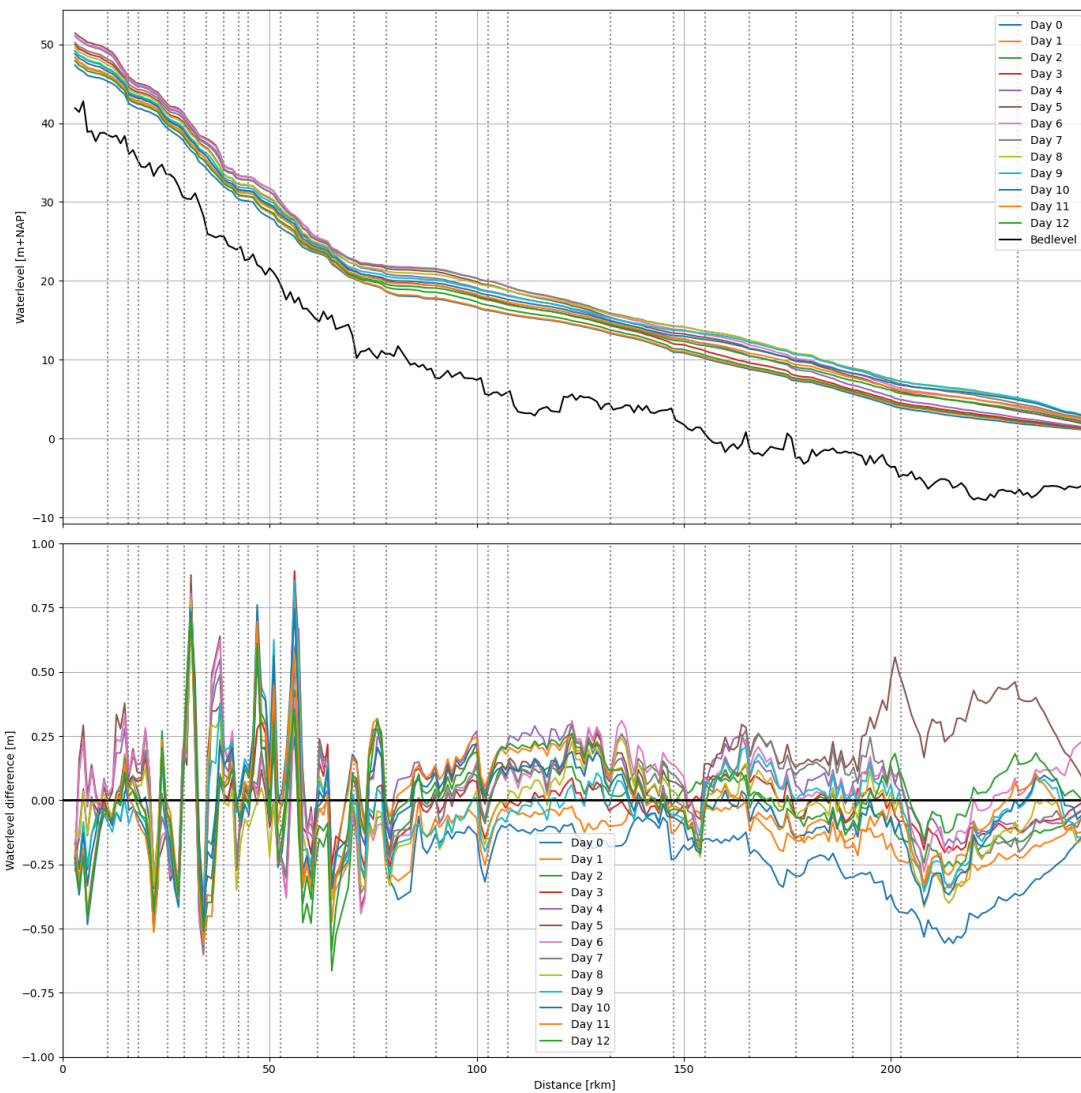


Figuur 4.8 Verskil in waterstand t.o.v. 2D resultaat gepresenteerd als heatmap voor validatie met WBI17-golf, piek 1971 m³/s. Op x-as rivierkilometers van boven- naar benedenstrooms en op y-as afvoergolf bij Eijsden. Grijsse verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

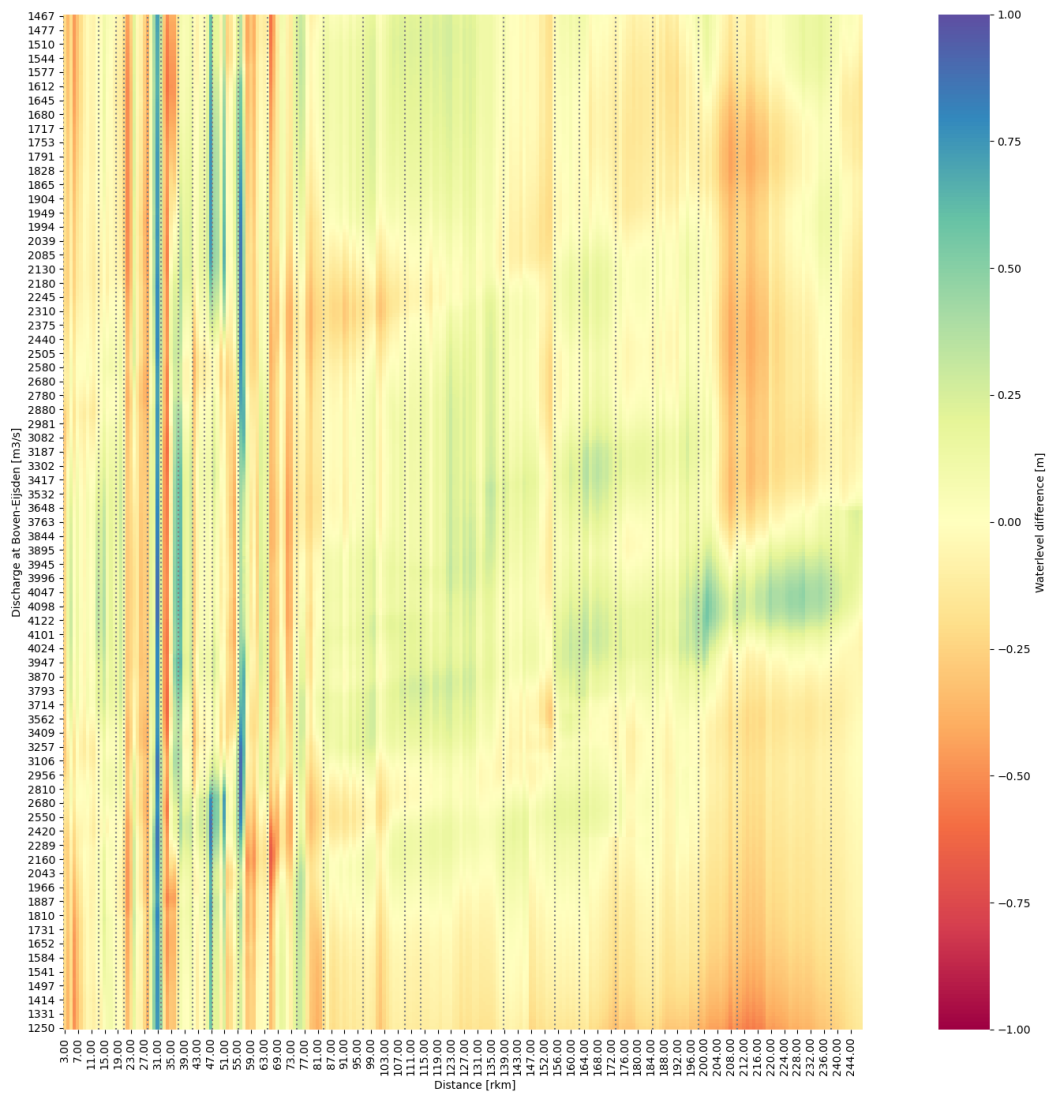
4.3.2 WBI17-golf, piek 4118 m³/s

Figuur 4.9 toont het langspoorprofiel van de resulterende waterstanden inclusief verschil t.o.v. het 2D resultaat voor de validatie met dynamische WBI17-golf, piek 4118 m³/s. Figuur 4.10 toont de verschillen in waterstand t.o.v. 2D resultaat voor dezelfde WBI17-golf in de vorm van een heatmap.

Ook hier zien we over het algemeen een afwijking die vergelijkbaar is met de kalibratie en met de validatie, hoewel de fout op de eerste dag (dag 0) wat meer afwijkt dan normaal. Dit kan een indicatie zijn van een matige initiële conditie. Rond Lith (rivierkilometer 200) zien we bij de piekafvoer (dag 5) een plotselinge overschatting van de waterstand ten opzichte van 2D.



Figuur 4.9 Langsprofiel van waterstanden voor validatie met WBI17-golf, piek 4118 m³/s op verschillende momenten tijdens afvoergolf in bovenste plot. In onderste plot het verschil in waterstand t.o.v. het 2D resultaat. Grijs verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.



Figuur 4.10 Langsprofiel van waterstanden voor 1D validatie met dynamische WBI17-golf, piek 4118 m³/s op verschillende momenten tijdens afvoergolf in bovenste plot. In onderste plot het verschil in waterstand t.o.v. de 'observatie'/2D resultaat. Grijsse verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

5 Toepassing op het hoogwater van 2011

5.1 Doelstelling

De nieuwe methode (FM2PROF i.c.m. kalibratie op 2D-modelresultaten) bevat veel procesmatige vernieuwingen die het proces van 1D modellen afleiden voor de zesde generatie Rijkswaterstaat-modellen eenvoudiger, sneller en transparanter moet maken. Voor operationeel gebruik is het daarnaast van belang dat de 1D-modelvoorspellingen nauwkeurig zijn over de verschillende afvoerbereiken.

In hoofdstuk 4 zijn de 1D modelresultaten gekalibreerd en gevalideerd tegen het ongekalibreerde 2D D-HYDRO model. Hoewel dit een inzicht geeft in de mate waarin het 1D model het 2D model benaderd, kan nog geen goede uitspraak worden gedaan over nauwkeurigheid ten opzichte van metingen ten behoeve van operationeel gebruik.

Daarom wordt in dit hoofdstuk de nieuwe methode getest op een historische situatie (2010-2011), met behulp van het inmiddels opgeleverde, gekalibreerd 2D D-HYDRO model van de Maas. De voorspellingen van de zesde generatie (G6) modellen zullen zowel worden vergeleken met metingen, als met de vijfde generatie (G5) modellen.

De vraagstelling van dit hoofdstuk is:

“Heeft G6 1D een nauwkeurigheid die vergelijkbaar is, of beter dan, G5 1D, of kan redelijkerwijs worden verwacht dat dit niveau van nauwkeurigheid in 2021 kan worden gehaald?”

Deelvragen zijn:

- Wat is de nauwkeurigheid van het G5 1D over de hele afvoergolf en in hoeverre zijn afwijkingen in 1D gecorreleerd met afwijkingen van het G5 2D model?
- Wat is de nauwkeurigheid van het G6 1D over de hele afvoergolf en in hoeverre zijn afwijkingen in 1D gecorreleerd met afwijkingen van het G6 2D model?
- Verwachten wij dat verbetering aan onderdelen van G6 1D kan leiden tot een grotere nauwkeurigheid?

5.2 Methode

We volgen dezelfde methodiek, die in voorgaande hoofdstukken in detail beschreven staat. In kort, nemen wij de volgende stappen:

- 1 Modelbouw: het afleiden van profielen en ruwheden
- 2 Kalibratie: het kalibreren op de 2D modelresultaten (zelfde methode als hoofdstuk 4)
- 3 Validatie, nieuw zijn de volgende stappen:
 - Toevoegen van stuwsturing in het 1D model (noodzakelijk voor vergelijking met werkelijke metingen, zie sectie 5.2.1)
 - Het draaien van som met een historische afvoergolf (sectie 5.2.2)
- 4 De analyse en documentatie van de verschillen en het beantwoorden van de hoofdvraag in de rapportage van de G6 1D pilot.

De nieuwe stappen in de validatie worden hieronder verder toegelicht.

5.2.1 Het implementeren van stuwsturing

Het afleiden van ruwheiden en profielen gebeurt met de vereenvoudigde 1D schematisatie zonder stuwsturing (zie sectie 3.2). Voor de meeste stuwen is het RTC model direct overgenomen uit SOBEK3 (G5). Omdat de modelschematisatie niet identiek is aan de vijfde generatie, kan de stuwsturing (het RTC model) niet direct worden overgenomen. Dit betreft de stuwen Borgharen en Linne. De stations waarop in deze stuwsturing gestuurd wordt (LMW.Borgh Julkan en LMW Heel boven) bestaan niet langer in het G6 1D model, omdat ze niet op de hoofdtak lagen. De zijtakken waarop ze wel lagen zijn in de nieuwe modelschematisatie verwijderd. Als nabij liggend alternatief zijn observatiestations 14.00_MA en 67.00_MA_N genomen. Alle parameters van de PID controllers zijn rechtstreeks overgenomen.

5.2.2 Historische afvoergolf en modellen

Voor deze analyse gebruiken we het historisch hoogwater van 2011. Voor deze periode zijn reeds randvoorwaarde beschikbaar.

Tabel 5.1 Overzicht van modellen, die in dit hoofdstuk worden gebruikt.

Model	Naam model	Referentie
G6 1D	n/a	<i>Dit rapport</i>
G6 2D	dflowfm2d-maas-j10_6-w8/v1	De Jong (2020)
G5 1D	SOBEK-maas-j11_5-v3	De Jong (2016b)
G5 2D	waqua-maas-j11_5-v2	De Jong (2016a)

5.3 Resultaat

5.3.1 Modelbouw

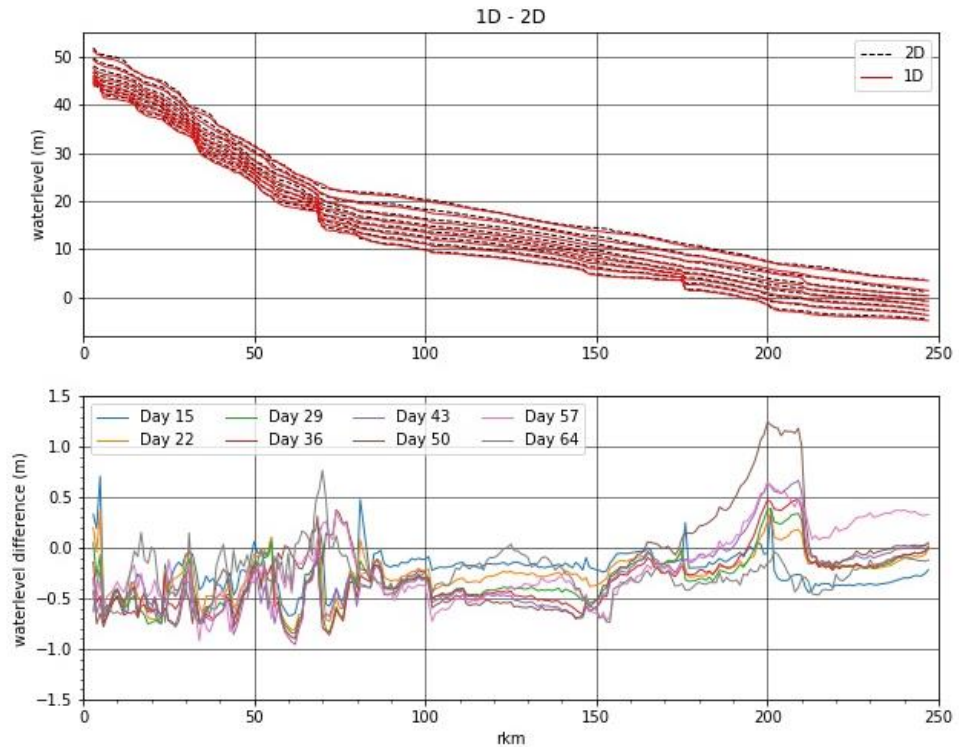
FM2PROF is opnieuw gedraaid met de default instellingen (zie Tabel 3.1, met toevoeging van SkipMaps=10), met het G6 2D model zonder RTC, waarin alle stuwen in gestreken (open) stand stonden. We gebruikten dezelfde langzaam stijgende randvoorwaarde als in hoofdstuk 3 (Figuur 3.3). Hiermee zijn nieuwe dwarsprofielen en ruwheidsvelden aangemaakt.

Om te controleren, of er geen grote fouten zitten in de aangemaakte profielen worden de waterstanden berekend met het ongekalibreerde 1D model vergeleken met het 2D model (Figuur 5.1), met dezelfde langzaam stijgende randvoorwaarden (Figuur 3.3) en worden de profielen vergeleken met de profielen van 2019 (Figuur 5.2). De resultaten laten zien dat de 1D waterstanden over het algemeen lager zijn dan de 2D waterstanden (met zo'n 25-50 cm), vooral tot rivierkilometer 150. Dit komt overeen met de resultaten uit hoofdstuk 3 (Figuur 3.14).

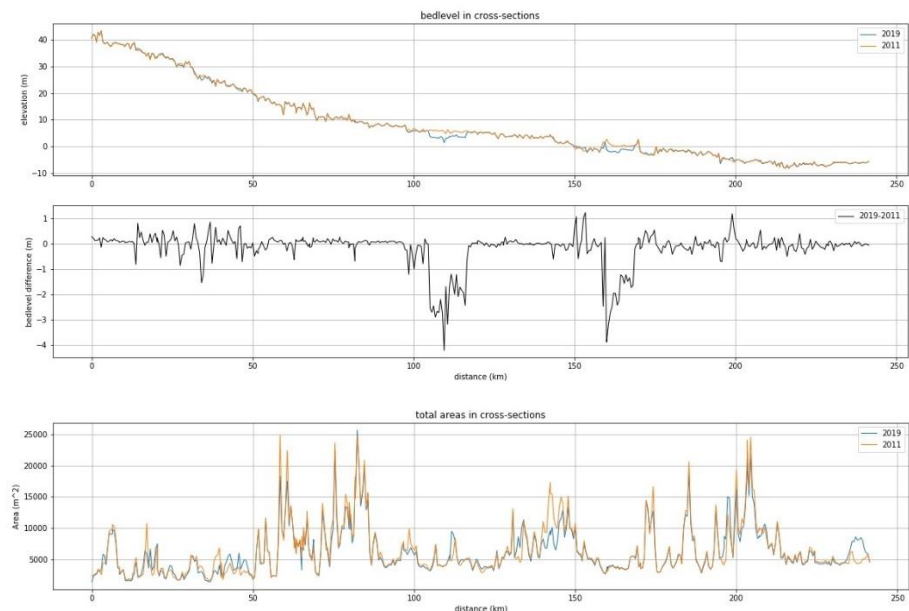
Opvallend in de vergelijking van de waterstanden, is de grote afwijking benedenstrooms van stuw Lith (rivierkilometer 211), waar het ongekalibreerde 1D model de waterstanden sterk overschat. We hebben hiervoor geen duidelijke verklaring voor kunnen vinden in het 1D model. Vergelijking van de profielen tussen het 2019 model, waarin deze plotseling toename niet aanwezig was, en het 2011 model, toont geen evidente verschillen die dit zouden kunnen verklaren (figuren bijlage C.1).

In de profielvergelijking zien we duidelijk het effect van de zomerbedverdiepingen van de Maaswerken (Figuur 5.2, boven). In het doorstroomoppervlak zien we grotendeels hetzelfde patroon, hoewel er rond Sambeek (rivierkilometer 147) een opvallende toename te zien is van het totale doorstroomoppervlakte. In de profielvergelijking met G5 1D valt vooral op, dat het bergend volume kleiner is in het G6 model (Figuur 5.3)

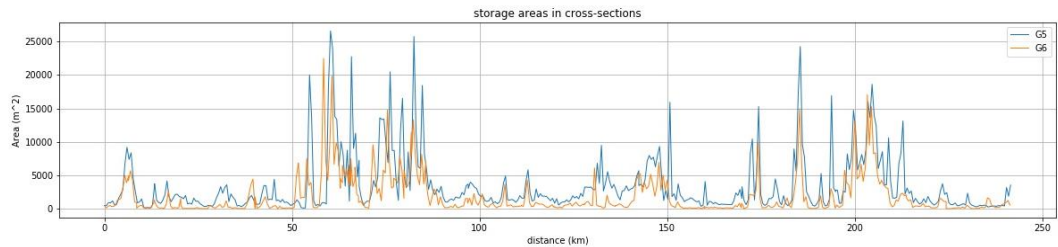
Het verschil dat optreedt bij rivierkilometer 211 zou redenen moeten zijn om zowel het 1D, als het 2D model rond dit punt nauwkeurig te bestuderen, om de oorzaak van dit plotselinge verschil te achterhalen – te meer omdat dit verschil niet optrad in 2019, en omdat er geen duidelijke oorzaak is in de dwarsprofielen. Vanwege de beperkte tijd die beschikbaar was voor de uitvoering van dit project, zijn we doorgeslagen met de rest van de stappen.



Figuur 5.1 De longitudinale waterstandsvergelijking tussen G6 2D en het ongekalibreerde G6 1D model. Het ongekalibreerde model onderschat de 2D waterstanden tot rivierkilometer 150 met zo'n 25-50 cm.



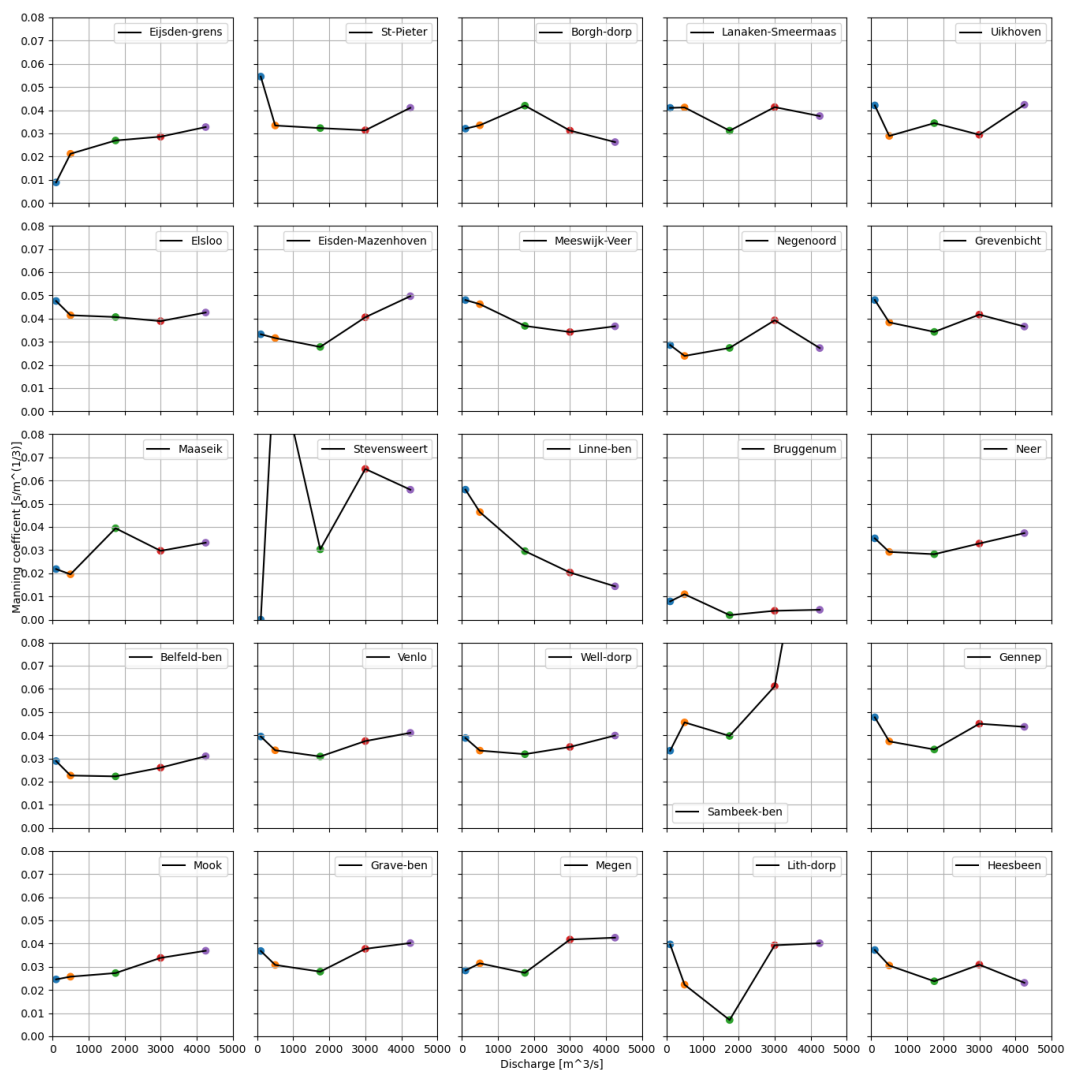
Figuur 5.2 De verschillen tussen de FM2PROF profielen van het 2019 model en het 2011 model voor de bodemligging (boven) en het totale doorstroomoppervlakte (beneden).



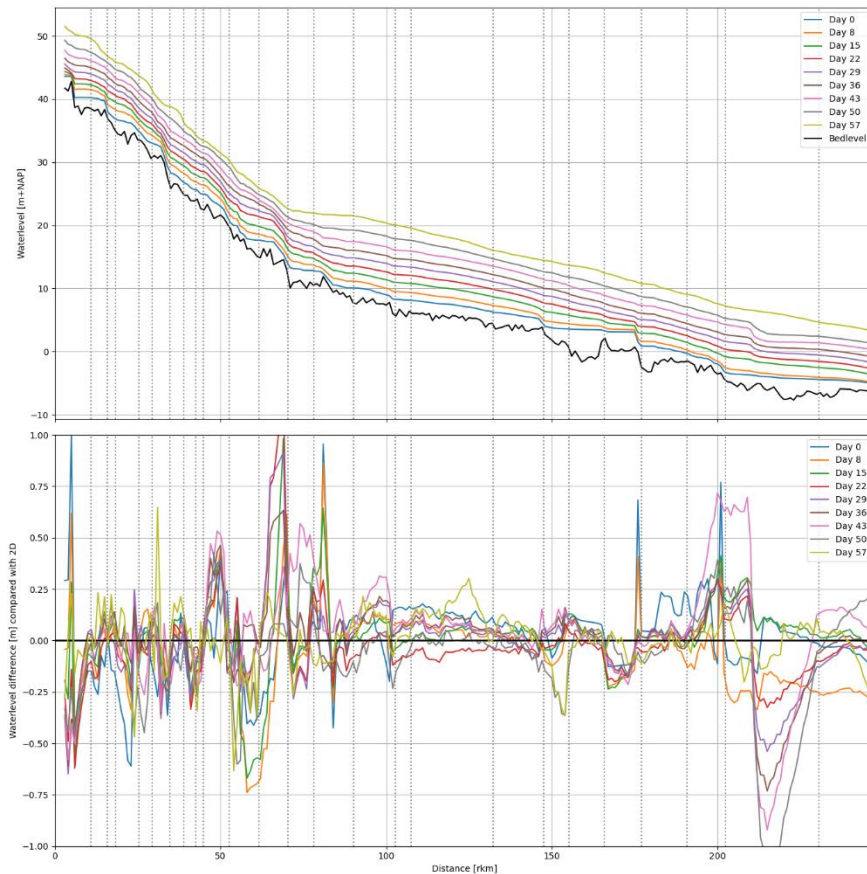
Figuur 5.3 Bergend oppervlakte in de 1D modellen G5 en G6. Uit vergelijking tussen de profielen van G5 1D en G6 1D valt vooral op, dat het bergend oppervlakte kleiner is in de G6 profielen.

5.3.2 Kalibratie

Het hele model is in één keer gekalibreerd op de resultaten uit G6 2D som met langzaam olopende afvoer (gelijk aan hoofdstuk 4.2 variatie 3). De resultaten zijn opgenomen in Figuur 5.4. Hoewel de meeste waarden binnen de grenzen liggen van wat verwacht zou worden (Manning waarden van $0.03-0.04 \text{ sm}^{-1/3}$), zien we hier een drie afwijkende stations, t.w. Stevensweert, Buggenum en Sambeek beneden. Bij deze drie stations zien we extreem hoge, en extreem lage waarden. Deze stations wijken af van de 2019 casus (Figuur 4.3).

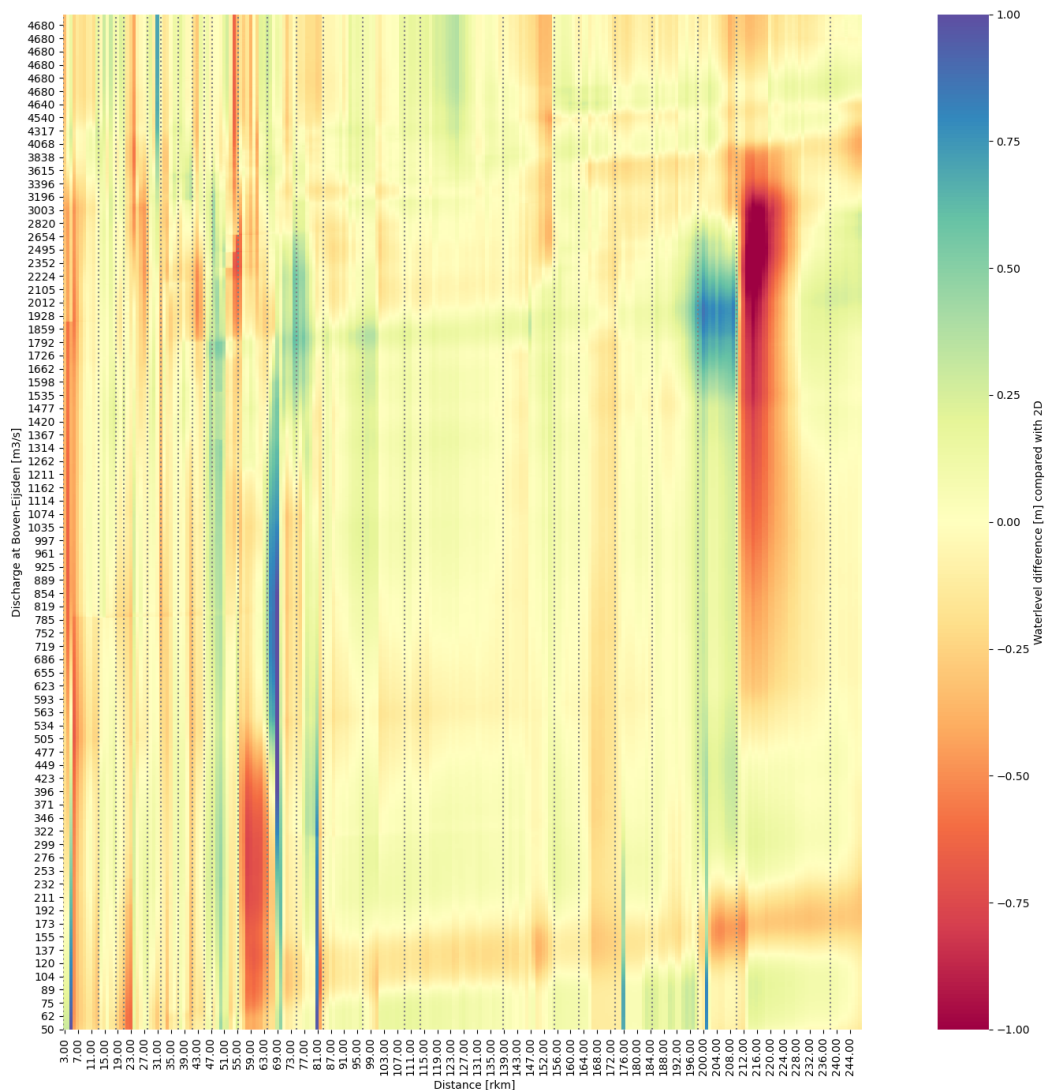


Figuur 5.4 De gekalibreerde Manning waarden voor elk traject.



Figuur 5.5 Langsprofiel van waterstanden voor 1D kalibratieresultaat op verschillende momenten tijdens afvoergolf in bovenste plot. In onderste plot het verschil in waterstand t.o.v. 'observatie'/2D resultaat. Grijs verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

De gekalibreerde waterstanden (Figuur 5.5) laten zien dat de initiële onderschatting (negatieve bias) van de waterstanden (Figuur 5.1) zijn verbeterd door de kalibratie. Echter, de afwijking die reeds bij ongekalibreerde model aanwezig waren rond kilometer 211 zijn niet gecorrigeerd, maar benedenstrooms verplaatst naar een grote negatieve bias. Tabel C.2 toont de RMSE-waarden van het ongekalibreerde en gekalibreerde model vergelijken met het 2D modelresultaat voor hoogwater 2011. Deze tabel toont ook de RMSE-waarden voor de vergelijking met het 2D modelresultaat (zonder stuwen).

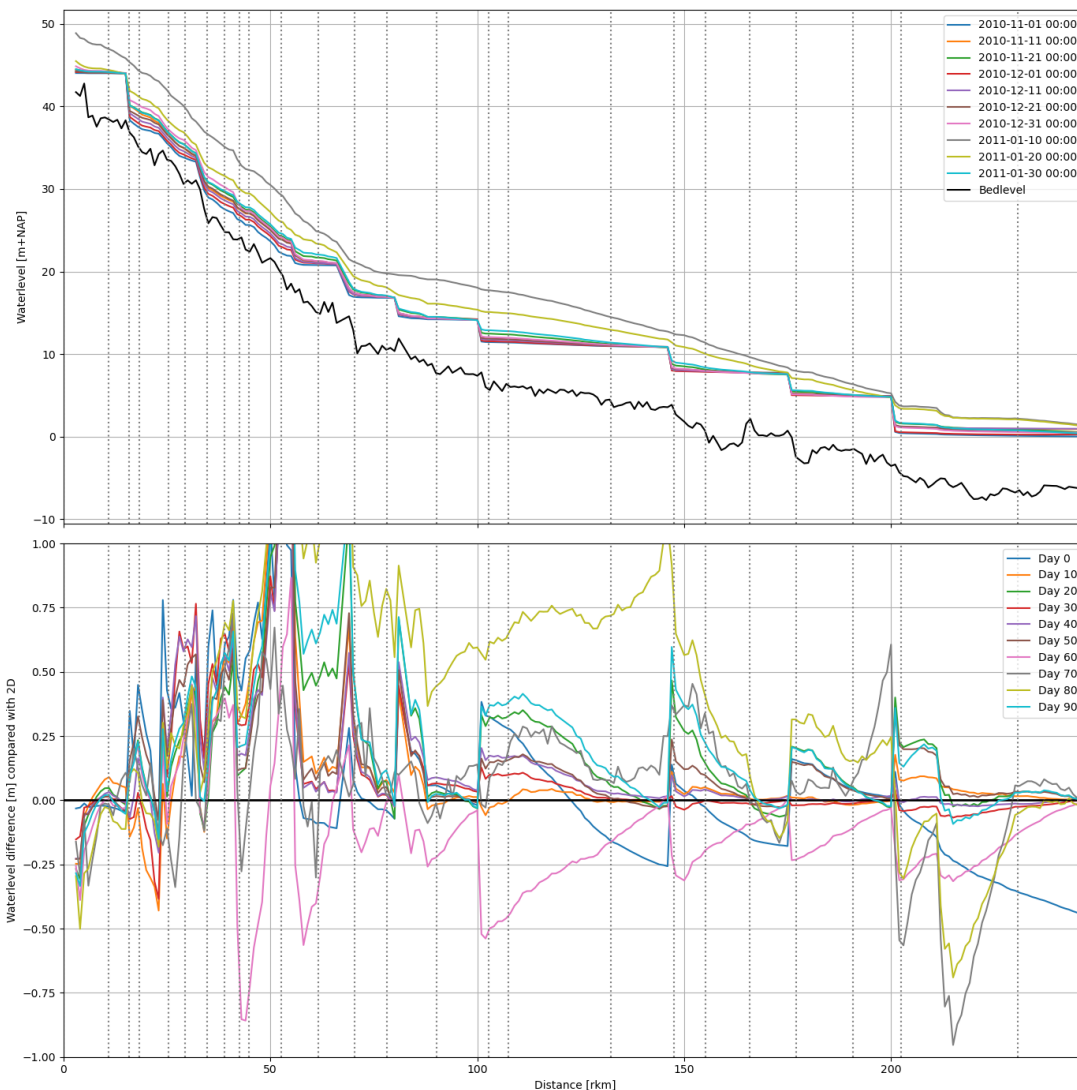


Figuur 5.6 Heatmap van de verschillen tussen G6 1D en G6 2D, kalibratiesom. De afwijking die initieel ook aanwezig was in de ongekalibreerde som (Figuur 5.1) is nog steeds zichtbaar.

5.3.3 Validatie

Waar het 2019 model werd gevalideerd met de WBI golven, wordt hier de validatie uitgevoerd met de (historische) afvoergolf van november 2010 tot januari 2011. Om deze som uit te voeren, is de stuwsturing geïmplementeerd (zie paragraaf 5.2.1) in G6 1D.

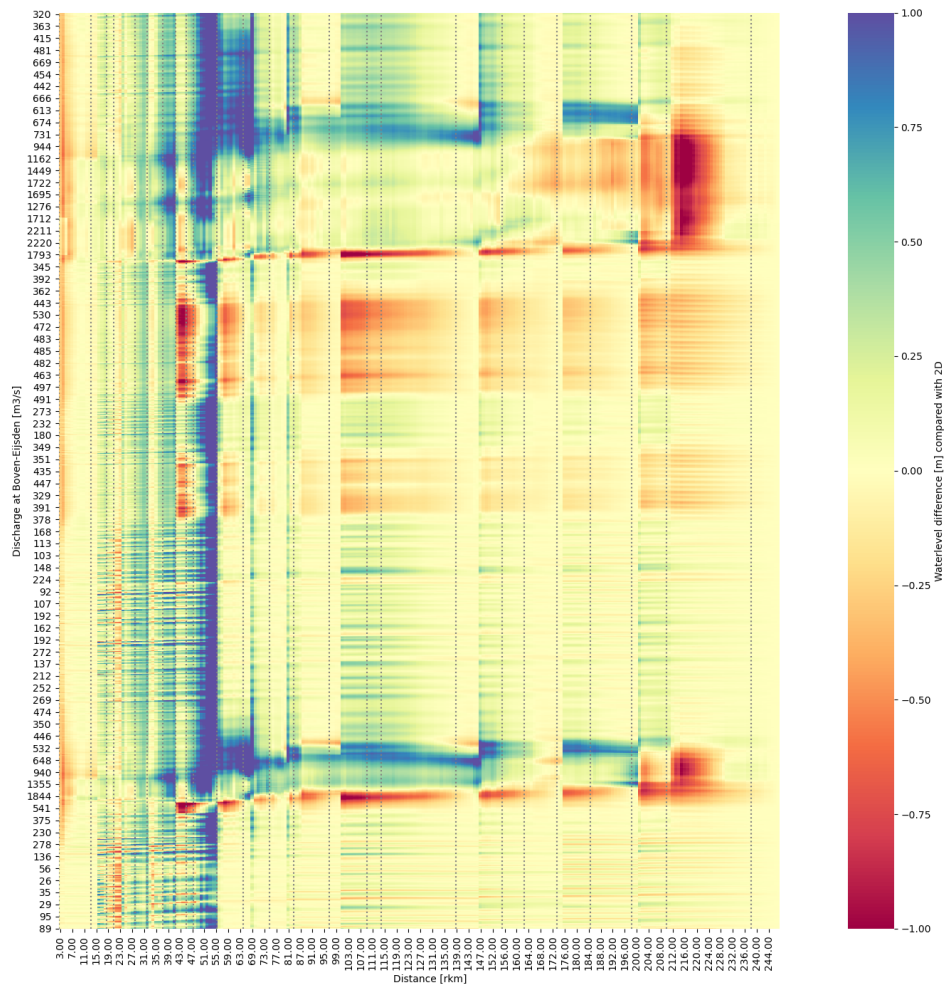
Het algemene beeld van de vergelijking met G6 2D (Figuur 5.7, Figuur 5.8) laat zien dat er een duidelijke invloed is van stuwen op de validatie. In voorgaande validatie (hoofdstuk 4.3) werd gerekend met een situatie zonder stuwen (zie bv. Figuur 4.10), en werd geconcludeerd dat de fout in validatie ongeveer gelijk is aan de fout in kalibratie. Hier zien we duidelijk dat de fout over een stuwpannd toeneemt en groter wordt dan tijdens kalibratie, terwijl het verschil met 2D vlak bovenstrooms van een stuw (het punt waarop gestuurd wordt in de stuwsturing) minimaal is. Hieruit blijkt dat een kalibratie op stroming in ongestuwde stuwpannden niet leidt tot ruwheden die onder gestuwde omstandigheden goede resultaten geeft.



Figuur 5.7 Langsprofiel van waterstanden voor validatie met het hoogwater van 2011 op verschillende momenten tijdens afvoergolf in de bovenste figuur. In onderste figuur het verschil in waterstand t.o.v. het G6 2D resultaat. Grijsse verticale stippellijnen geven grenzen ruwheidstrajecten weer.

De afwijking die we reeds zagen bij het ongekalibreerde model en bij de kalibratie, rond rivierkilometer 211 is ook hier zichtbaar. Lokaal onderschat het 1D model hier de 2D waterstand met bijna 1 meter. Ook rond LMW station Maaseik (rivierkilometer 52) zien we grote afwijkingen.

Als we enkel kijken naar de resultaten per station, is het gemiddeld verschil vergelijkbaar met G5 2D, maar aanzienlijk hoger dan G6 2D en G5 1D (Tabel 5.2).



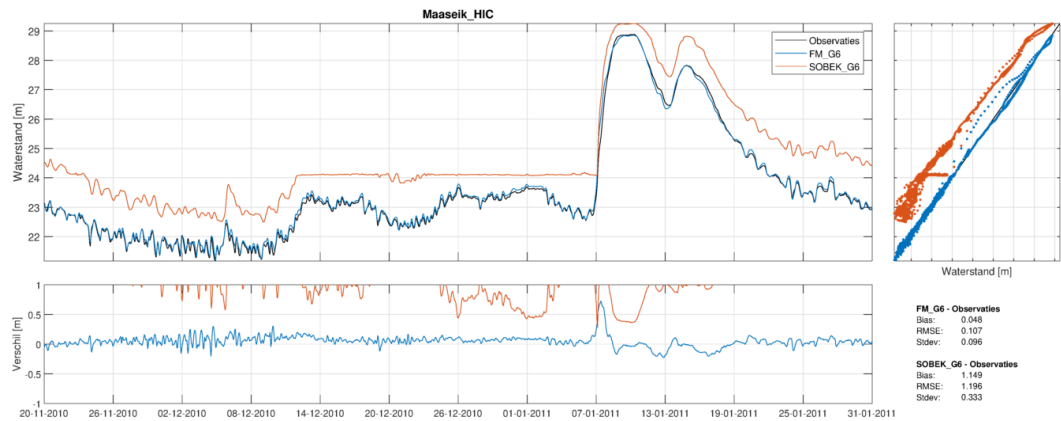
Figuur 5.8 Heatmap van de verschillen tussen G6 1D en G6 2D, validatiesom.

5.3.3.1 Analyse Maaseik

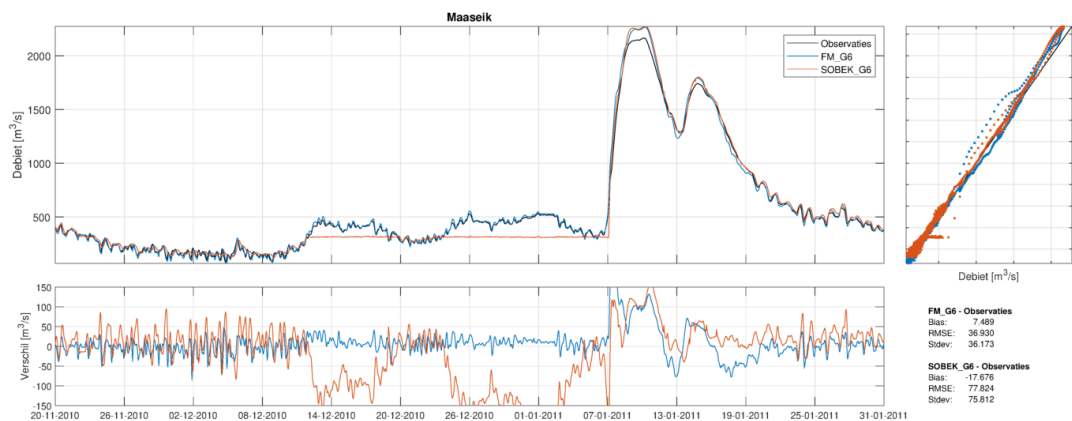
De tijdserie bij Maaseik (Figuur 5.9) laat een algemene overschatting zien van de waterstand bovenstrooms van rivierkilometer 55, en een vreemde aftopping in december 2010.

Hoewel het onduidelijk is waar deze aftopping door wordt veroorzaakt, zien we wel dat een nabijgelegen retentiegebied de waterstanden mogelijk flink beïnvloedt. Elk retentiegebied is geschematiseerd als een tak van 100 m lang. Waar in G5 1D 'retentieknoten' werden gebruikt om het volume van het retentiegebied te modelleren, gebruikt G6 dwarsprofielen. De retentiegebieden zijn van de rivier afgesloten door een stuw, maar deze stuwen staan op enige afstand (10 meter) van de hoofdtak van de rivier. Hoewel dit een gebruikelijke oplossing is, zorgt het in combinatie met een kleine taklengte (100 m) en groot retentiegebied ervoor dat 10% van de oppervlakte van het retentiegebied buiten de stuw ligt, en hierdoor een versturende werking kan hebben op de berekening.

Er is geen duidelijk aanwijsbare oorzaak voor deze rare overschatting van de waterstanden, die bij de kalibratiesom niet te zien was, en ook in de validatie van 2019 (Figuur 4.10) afwezig was. Hoewel dit punt (rivierkilometer 55) samenvalt met de aftakking van de Oude Maas, trekt de Oude Maas pas afvoer bij veel hogere waterstanden. Hoewel een duidelijke oorzaak voor de verschillen bij Maaseik niet gevonden is, lijken de verschillen te worden veroorzaakt door (lokale) tekortkomingen in de schematisatie van het pilotmodel.



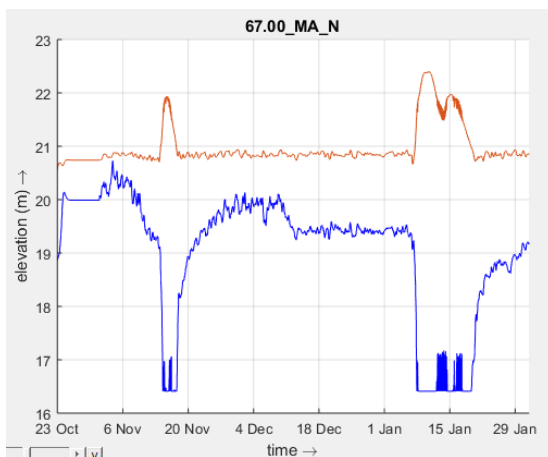
Figuur 5.9 De gesimuleerde en gemeten waterstand bij Maaseik, vergelijking met G6 2D (blauw) en G5 1D (oranje).



Figuur 5.10 De gesimuleerde en gemeten afvoer bij Maaseik, vergelijking met G6 2D (blauw) en G5 1D (oranje).

5.3.3.2 Analyse Linne

Bij stuw Linne is een kortdurende instabiliteit waargenomen in de besturing van de stuw (Figuur 5.11). Vergelijkbare instabiliteiten zijn waargenomen bij Lith, Sambeek en Belfeld. De logica in de stuwsturing is bij deze stations afhankelijk van meerdere meetstations en afhankelijk van de verhouding in de waterstand van deze stations. Een afwijkend verval zal daarom de stuwsturing onbetrouwbaar maken. Omdat waarden van de PID controllers zijn overgenomen uit G5 1D, is het mogelijk dat een herkalibratie van de PID controllers dit gedrag kan verhelpen.

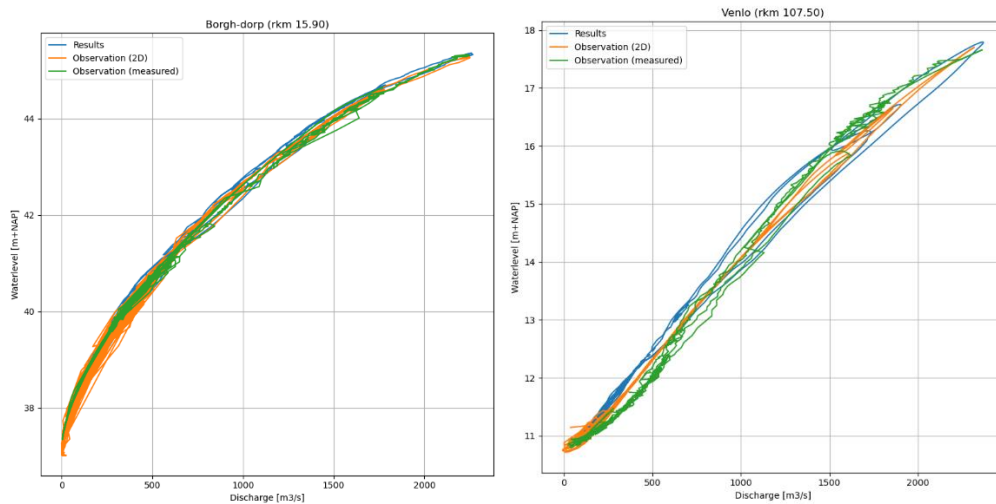


Figuur 5.11 Kruinhoogte van stuw Linne (blauw) en de waterstand bij het station, waarop de stuw de waterstand stuurt (oranje).

5.3.3.3

Algemeen beeld uit de overige stations

G6 1D is afgeleid van, en gekalibreerd op G6 2D. Om de analyseren in hoeverre de modelresultaten van G6 2D en G6 1D overeenkomen vergelijken we zowel tijdseries, als de relatie tussen afvoer en waterstand (QH). Bij de meeste stations zien we dat de QH-relatie sterk overeenkomt tussen 1D en 2D (Bijvoorbeeld bij Borgharen-Dorp en Venlo, Figuur 5.12). De LMW stations die duidelijke afwijking vertonen zijn hierboven al besproken, zoals Maaseik.



Figuur 5.12 De QH relaties van G6 1D (blauw), G6 2D (oranje) en metingen (groen).

Tabel 5.2 Gemiddelde afwijking (bias) t.o.v. metingen, berekend over de periode 20 november 2010 tot 31 januari 2011, in meters. De stations bovenstrooms van de stuwen zijn niet geëvalueerd voor het model G6 2D.

	G5 2D (WAQUA)	SOBEKG5 1D (SOBEK)	G6 2D (FM)	G6 1D (SOBEK)
Eijsden grens	0.183	0.013	-0.022	-0.346
Sint Pieter noord	0.022	0.003	0.021	0.042
Borgharen_jul	0.011	0.000	-0.001	-
Borgharen dorp	0.391	-0.105	-0.032	0.101
Lanaken Smeermaas	0.447	0.116	0.121	0.375
Uikhoven	0.383	-0.150	-0.017	0.070
Elsloo	-0.010	-0.054	-0.004	0.315
Eisden Mazenhoven	0.438	0.017	0.105	0.227
Meeswijk veer	0.082	-0.101	-0.086	0.461
Dilsen stokkem	0.878	0.712	0.761	0.497
Grevenbicht	0.104	0.080	0.122	0.182
Maaseik_HIC	0.188	-0.007	0.048	1.149
Stevensweert	-0.010	-0.051	-0.018	0.075
Heel boven	0.013	0.000	0.007	-
Linne ben	0.083	-0.020	-0.016	0.181
Roermond boven	0.030	0.005	-0.019	0.024
Heel ben	0.107	-0.018	-0.034	-
Neer	0.066	-0.025	-0.027	-0.052
Belfeld bov	0.032	-0.001	-0.050	-0.011
Belfeld ben	0.182	-0.099	0.041	0.096
Venlo	0.091	-0.108	0.083	0.166
Well dorp	0.098	-0.013	0.010	0.034
Sambeek bov	0.020	-0.005	-0.016	0.033
Sambeek ben	0.039	-0.069	0.017	0.211
Gennep	0.073	-0.060	0.014	0.081
Mook	0.057	-0.059	0.004	-0.023
Grave bov	0.038	0.006	-0.011	-0.030
Grave ben	0.164	-0.049	-0.015	0.025
Megen dorp	0.090	-0.033	-0.029	-0.035
Lith bov	0.001	-0.011	-0.020	0.022
Lith dorp	0.045	-0.091	-0.014	-0.128
Heesbeen	-0.009	-0.051	-0.001	-0.031
Keizersveer	0.002	0.000	0.000	0.000
GEMIDDELD	0.131	-0.007	0.028	0.124

Tabel 5.3 Root Mean Square Error t.o.v. metingen, berekend over de periode 20 november 2010 tot 31 januari 2011, in meters. De stations bovenstrooms van de stuwen zijn niet geëvalueerd voor het model G6 2D.

	G5 2D (WAQUA)	SOBEKG5 1D (SOBEK)	G6 2D (FM)	G6 1D (SOBEK)
Eijsden grens	0.202	0.045	0.032	0.358
Sint Pieter noord	0.033	0.041	0.040	0.063
Borgharen_jul	0.054	0.035	0.035	-
Borgharen dorp	0.429	0.281	0.175	0.187
Lanaken Smeermaas	0.484	0.209	0.243	0.418
Uikhoven	0.437	0.249	0.125	0.159
Elsloo	0.102	0.218	0.143	0.340
Eisden Mazenhoven	0.450	0.165	0.153	0.275
Meeswijk veer	0.173	0.236	0.133	0.505
Dilsen stokkem	0.904	0.749	0.768	0.666
Grevenbicht	0.179	0.186	0.160	0.414
Maaseik_HIC	0.217	0.142	0.107	1.196
Stevensweert	0.043	0.101	0.054	0.363
Heel boven	0.056	0.025	0.039	-
Linne ben	0.157	0.062	0.074	0.265
Roermond boven	0.076	0.045	0.073	0.105
Heel ben	0.131	0.057	0.106	-
Neer	0.101	0.056	0.103	0.127
Belfeld bov	0.087	0.043	0.142	0.103
Belfeld ben	0.206	0.159	0.157	0.297
Venlo	0.118	0.148	0.166	0.308
Well dorp	0.110	0.056	0.097	0.113
Sambeek bov	0.066	0.042	0.084	0.146
Sambeek ben	0.089	0.129	0.121	0.332
Gennep	0.113	0.128	0.116	0.166
Mook	0.110	0.117	0.080	0.113
Grave bov	0.114	0.057	0.062	0.115
Grave ben	0.197	0.145	0.154	0.192
Megen dorp	0.135	0.134	0.122	0.189
Lith bov	0.077	0.146	0.085	0.191
Lith dorp	0.100	0.177	0.172	0.364
Heesbeen	0.049	0.115	0.099	0.134
Keizersveer	0.005	0.000	0.000	0.000
GEMIDDELD	0.176	0.136	0.128	0.273

6 Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusies per onderdeel

6.1.1 Conclusies modelbouw

Het doel van deze fase was om te onderzoeken of de dwarsprofielen, die door FM2PROF worden aangemaakt plausibel zijn, en om de ervaring met het gebruik van FM2PROF te beschrijven. Er zijn voor twee modellen profielen en ruwheden aangemaakt, namelijk op basis van het j19 model (Hoofdstuk 3) en het j11 model (paragraaf 5.3.1).

De resultaten van de pilot laten zich als volgt samenvatten:

- De initiële waterstandvelden die met Baseline 6 worden aangemaakt zijn niet goed genoeg om direct toepasbaar te zijn voor FM2PROF. Nabewerking is nodig (paragraaf 3.1)
- Op basis van visuele inspectie zijn de profielen en ruwheden die met FM2PROF worden aangemaakt plausibel (paragraaf 3.4).
- De initiële verschillen tussen het ongekalibreerde 1D model en het 2D model zijn grotendeels consistent langs de rivier. Op de Grensmaas zien we een kleine bias en een grote variatie. Uit ervaring is gebleken dat dit soort verschillen inherent zijn aan het modelleren van het grote verval op de Grensmaas, worden deze afwijkingen niet gezien als iets dat eenvoudig verbeterd kan worden. (Paragraaf 3.6). Op de Zandmaas zien we een grotere bias, maar een kleine variatie, d.w.z. een vrij uniform verschil met 2D langs de rivier. Dit biedt een goed uitgangspunt voor kalibratie.
- De profielen die zijn aangemaakt voor j19 en het j11 zijn grotendeels gelijk. Verschillen lijken goed overeen te komen met systeemverandering zoals de Maaswerken (paragraaf 5.3.1).
- Profielen gegenereerd met FM2PROF hebben over het algemeen een kleiner bergend oppervlakte dan profielen die met WAQ2PROF worden aangemaakt (paragraaf 5.3.1).

Ten aanzien van de ervaring met het bouwen van modellen met de nieuwe werkwijze, maken we de volgende observaties:

- De uitgebreidere visualisatiemogelijkheden bieden veel inzicht in de totstandkoming van een profiel en het opsporen van fouten in de invoer (of bugs in de software).
- Profielen en ruwheden worden aangemaakt in 10 tot 15 minuten³ – een aanzienlijke snelheidswinst boven WAQ2PROF, en minder bewerkelijk. Hierdoor zijn analyses sneller en eenvoudiger uit te voeren.

6.1.2 Conclusies kalibratie en validatie

Het doel van dit onderdeel was om te onderzoeken of het technisch mogelijk is om de 1D ruwheden in één keer te kalibreren, of deze ruwheden plausibele waarden geven die leiden tot goede waterstandsresultaten bij validatie, en om ervaring met deze kalibratieaanpak te beschrijven. Er zijn in dit project modellen gekalibreerd en gevalideerd, namelijk het j19 model (Hoofdstuk 4) en het j11 model (paragraaf 5.3.2 en 5.3.3).

³ De tijd voor het toewijzen van secties en gebiedsvakken zijn hierbij niet opgenomen. Dit wordt eenmalig buiten FM2PROF om gedaan in DeltaShell en duurt ongeveer 40-60 minuten.

De resultaten van de pilot laten zich als volgt samenvatten:

- Alle kalibratieparameters in één kalibratie run kalibreren is goed mogelijk en levert ruwheden op binnen realistische grenzen (Paragraaf 4.2.1)
- Na kalibratie (j19) is het verschil met 2D modelresultaten langs vrijwel de hele rivier in de orde van maximaal 25 cm. (Paragraaf 4.2.2)
- Uit validatie (j19) op synthetische (WBI) golven blijkt dat dit verschil in dezelfde orde grootte blijft (paragraaf 4.3)
- Kalibratie op het j11 model laat bij de meeste stations ruwheden in met realistische waarden, met uitzondering van uitschieters beide kanten op (zowel erg hoog als erg laag) bij Stevensweert, Buggenum en Sambeek beneden (paragraaf 5.3.2).
- Na kalibratie op het j11 model volgen de waterstandverschillen over het algemeen dezelfde trend als die van het j19 model, maar zijn ze wel wat groter (tot ruim 50 cm) met een grotere uitschieter rond rkm 211.
- Validatie op de afvoergolf van november 2010-januari 2011 laat zien dat het patroon met actieve stuwsturing aanzienlijk anders is dan zonder actieve stuwsturing. Dit suggereert dat kalibratie op een situatie met gestreken stuwen mogelijk geen goed resultaat geeft voor een berekening van een gestuwde rivier (bij gelijke afvoer). Het verval binnen ieder stuwpand is te laag.
- Er kan (nog) niet worden geconcludeerd dat kalibratie op 2D modelresultaten leidt tot een acceptabele fout bij doorrekenen van een historische som, omdat is gebleken dat kalibratie op een situatie zonder actieve stuwsturing geen goed resultaat geeft voor validatie met actieve stuwsturing, en omdat in het (j11) pilotmodel enkele vermoedde beperkingen in de schematisatie zijn.
- Opmerking maken over retentiegebied (en?) Di bij Maaseik gaat niet goed. Ik weet niet of dat voor meerdere geldt. Hangt af van de methodiek.

Ten aanzien van de ervaring met het afregelen van modellen met de nieuwe werkwijze, maken we de volgende observaties:

- Het gebruik van 2D resultaten als proxy voor observaties maakt het kalibratie- en validatieproces een stuk eenvoudiger. Het validatieproces voor deze pilot is bijvoorbeeld volledig geautomatiseerd (d.w.z. via scripting met Python).
- Doordat er wordt gekalibreerd en gevalideerd op 2D modelresultaten, is er ook informatie tussen meetstations beschikbaar. Dit geeft veel extra informatie over de nauwkeurigheid van het 1D model en gedetailleerde aanknopingspunten voor verbeteringen aan de schematisatie.
- Kalibratie vereist enkele handmatige stappen, zoals het definiëren van ruwheidstrajecten. Dit is veelal eenmalig werk voor een model. Als de schematisatie niet aangepast wordt, kan kalibratie relatief eenvoudig herhaald worden.

6.1.3 Conclusies toepassing op hoogwater 2011

Het hoofddoel van dit onderdeel was om de volgende vraag te beantwoorden *“Heeft G6 1D een nauwkeurigheid die vergelijkbaar is, of beter dan, G5 1D, of kan redelijkerwijs worden verwacht dat dit niveau van nauwkeurigheid in 2021 kan worden gehaald?”*

Uit de resultaten blijkt, dat het model dat in deze pilot is afgeleid niet de nauwkeurigheid heeft die vergelijkbaar is G5 1D. Er zijn desalniettemin aanwijzingen die hoop geven, dat deze nauwkeurigheid met enkele aanpassingen aan de werkwijze wel gehaald kan worden. Wij vatten deze aanbevelingen samen in de volgende paragraaf.

6.2 Aanbevelingen

6.2.1 Aanbevelingen modelbouw

Uit de ervaring van de modelbouwfase (hoofdstuk 3) en de toepassing op 2011 (hoofdstuk 5), doen wij de volgende aanbevelingen voor toepassing van, en verbetering aan, de werkwijze die in deze pilot is gevolgd:

- Goede initialisatie van de 2D som is heel belangrijk. De initiële waterstanden uit Baseline 6 vormen een begin, maar nabewerking bleek nodig. Hiervoor is nu een werkwijze ontwikkeld, maar het wordt aangeraden deze werkwijze te standaardiseren – wellicht als onderdeel van Baseline 6.
- FM2PROF biedt verschillende analyse mogelijkheden voor de profielen, zoals de (volume)grafieken en GIS visualisatie. Deze visualisaties dienen vooral om profielen te analyseren, d.w.z. waarom ze eruit zien zoals ze eruit zien. We raden altijd aan om naast deze visualisaties een vergelijking te doen tussen het (ongekalibreerde) 1D model – met ruwheden en dwarsprofielen uit FM2PROF en het 2D model. Uit deze vergelijking kan men fouten opsporen in de invoer of in de 1D en 2D modelberekeningen.
- Het genereren van FM2PROF invoer is deels geautomatiseerd, maar het blijft noodzakelijk om over gebiedsspecifieke kennis te beschikken voor het maken van gebiedsvakken ('Regions') en de plaatsing van dwarsprofielen. Het loont, om kritisch naar invoer te blijven kijken.

Ten aanzien van de 1D schematisatie van het Maas model:

- De toewijzing van gebieds- en sectievakken gebeurt nu via Deltashell. Dit is weinig gebruiksvriendelijk. Het is aan te raden hier een gebruiksvriendelijker methode voor de vinden.
- Bij de toepassing van het model op de historische golf bleek dat de schematisatie mogelijk ontoereikend is. Het wordt aangeraden om te onderzoeken of aanpassingen aan de takkenstructuur tot voldoende lokale verbetering kan leiden.
- De huidige schematisatie van retentiegebieden (relatief kleine takken en daardoor hele brede dwarsprofielen) maakt het model erg foutgevoelig. Het wordt aangeraden de takken retentiegebieden aanzienlijk te verlengen.
- Rond rivierkilometer 211 zijn er onverklaarbare grote verschillen tussen 1D en 2D in het 2011 model. Het wordt aangeraden de oorzaak hiervan te onderzoeken.

6.2.2 Aanbevelingen kalibratie & validatie

Uit de ervaring van met de kalibratie en validatie van het j19 (hoofdstuk 4) en het j11 model (hoofdstuk 5), doen wij de volgende aanbevelingen voor toepassing van, en verbetering aan, de werkwijze die in deze pilot is gevolgd:

- Kalibreer en valideer op een situatie inclusief stuwsturing en een realistische benedenstroomse randvoorwaarde.
- Omdat niet kan worden geconcludeerd of een kalibratie op 2D modelresultaten leidt tot een voldoende nauwkeurigheid bij doorrekening van een historische som, wordt aangeraden om kalibratie op een historische simulatie of metingen als alternatief te overwegen.
- Kalibratie op 2D modelresultaten is desalniettemin relatief eenvoudig. Voor operationele toepassingen wordt het aangeraden om deze vorm van kalibratie alsnog uit te blijven voeren. Indien uit validatie blijkt, dat de resultaten niet voldoende zijn, kunnen deze resultaten als initiële conditie worden gebruikt voor kalibratie op historische metingen.

Referenties

De Jong (2016a), *Herkalibratie 5^{de} generatie WAQUA Maas*. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0008-v1.3

De Jong (2016b), *Herkalibratie SOBEK 3.4 Maas*. Deltares rapport

De Jong (2020), *Ontwikkeling zesde-generatie Maasmodel. Modelbouw, kalibratie en validatie*. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014

Domhof, B. C., Berends, K. D., Spruyt, A., Warmink, J. J., & Hulscher, S. J. (2018). *Discharge and location dependency of calibrated main channel roughness: case study on the River Waal*. In E3S Web of Conferences (Vol. 40, p. 06038). EDP Sciences.

Berends (2020), *FM2PROF Manual for version 1.4.1*. Deltares manual. 26 Mei, 2020

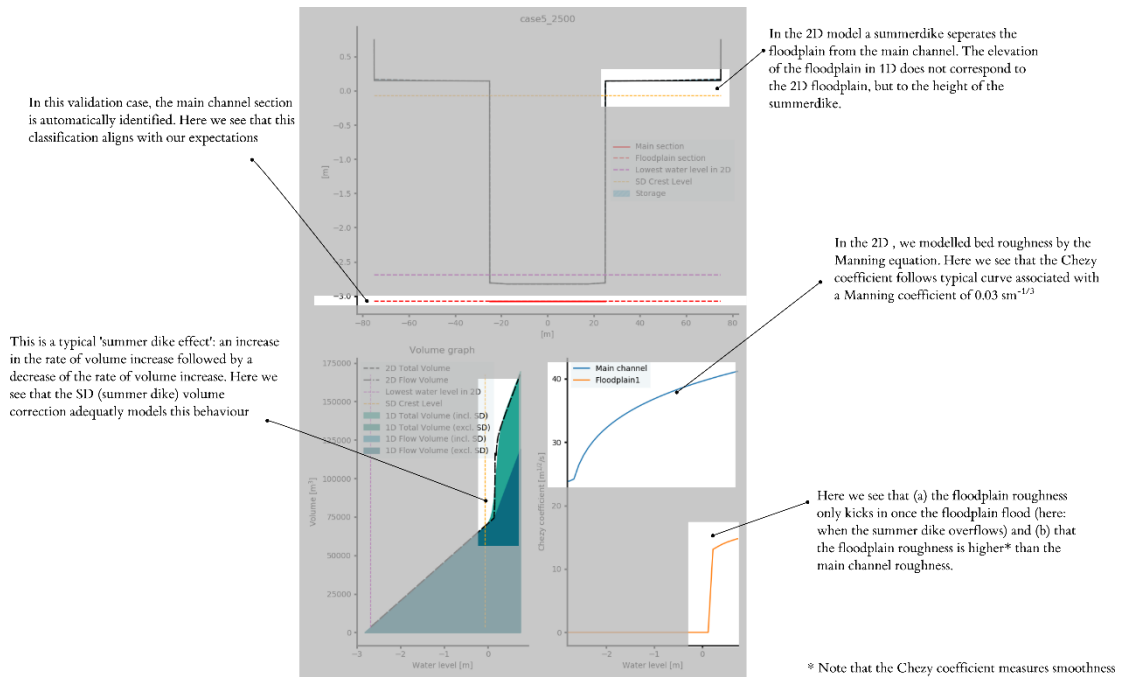
A Appendix bij Hoofdstuk 3

A.1 Visuele inspectie van FM2PROF uitvoer

Hieronder is de toelichting overgenomen, die in de handleiding van FM2PROF staat. Deze is enkel beschikbaar in het Engels. FM2PROF biedt twee manieren om de uitvoer te controleren.

A.1.1 Met utils.Visualiseoutput

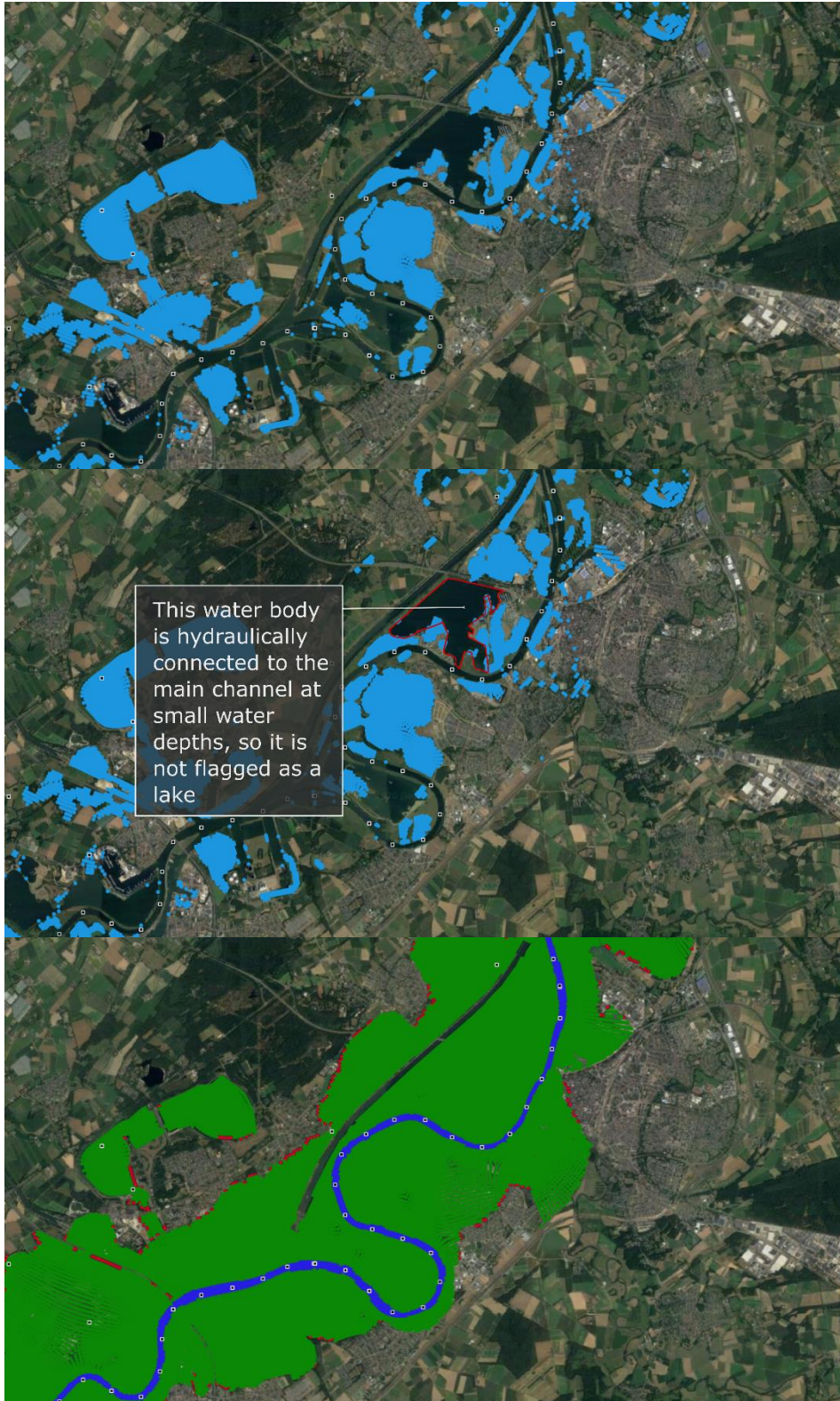
FM2PROF heeft enkele Python hulpfuncties en -klassen beschikbaar in de module *fm2prof.utils*. Met *fm2prof.utils.VisualiseOutput* wordt de uitvoer per profiel gevisualiseerd (Figuur A.1).



Figuur A.1 De visualisatie bestaat uit drie (sub)figuren: het dwarsprofiel (boven), de volumegrafiek (linksonder) en de ruwheidsgrafiek (rechtsonder).

A.1.2 Met GIS software

FM2PROF voert optioneel geojson bestanden uit, die te visualiseren zijn met GIS software, zoals QGIS of ArcGIS.

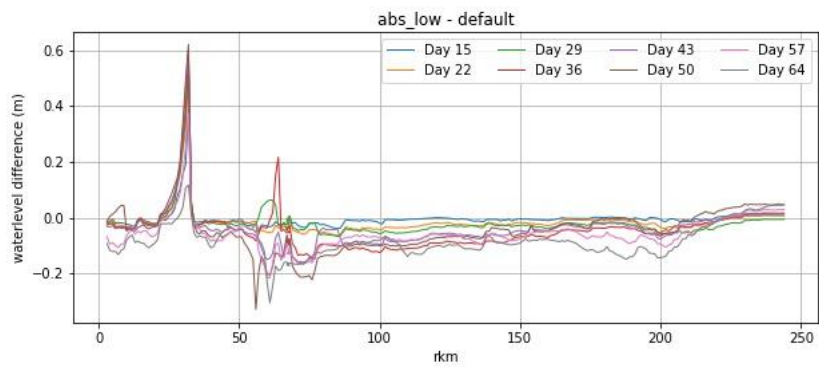


Figuur A.2 GIS visualisatie van plassen (boven), toewijzing van uitvoer aan dwarsprofielen (midden) en toewijzing aan hoofdgeul / uiterwaard.

A.2 Gevoeligheidsanalyse

A.2.1 Effect van aanpassing parameters

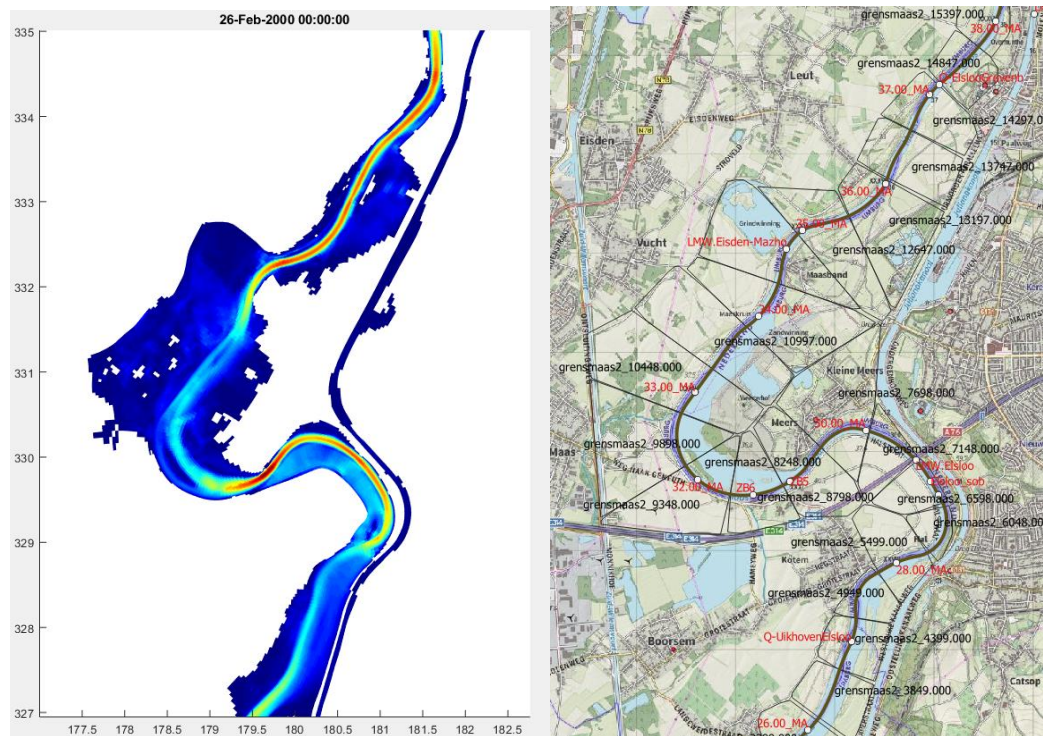
Scenario Abs_low



Figuur A.3 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling ($AbsoluteVelocityThreshold = 5 \text{ cm/s}$) en *abs_low* ($AbsoluteVelocityThreshold = 2.5 \text{ cm/s}$).

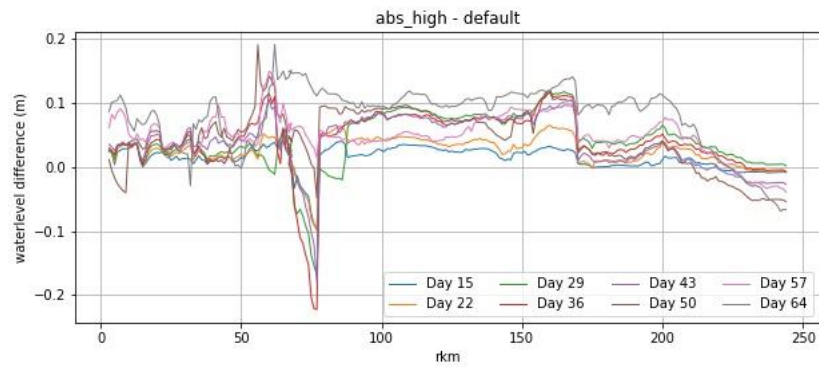
We zien:

- Hogere stroomvoerende breedte, minder bergende breedte in het dwarsprofiel.
- Over het algemeen een lagere waterstand.
- Grote lokale toename in waterstand rond rkm 32, door toegenomen stroomvoerende breedte.



Figuur A.4 The 2D flow velocity magnitude (m/s) between rkm 26 and 38. The dark red part (velocity of >5m/s) is around rkm 31.

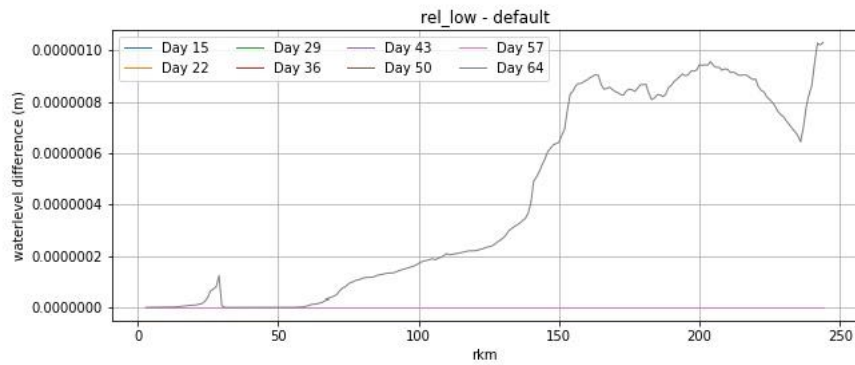
Abs_high:



Figuur A.5 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling ($AbsoluteVelocityThreshold = 5 \text{ cm/s}$) en *abs_high* ($AbsoluteVelocityThreshold = 7.5 \text{ cm/s}$).

- Meer bergende breedte en minder stroomvoerende breedte.
- De waterstand is over het algemeen hoger.
- Plaatselijk rond rivierkilometer 77 een afname in de waterstand.

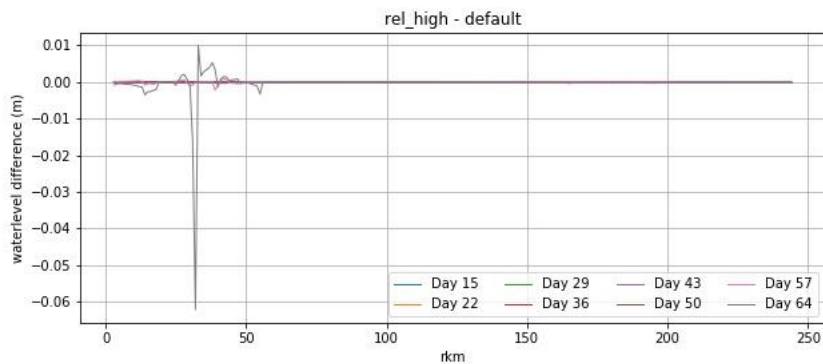
Rel_low:



Figuur A.6 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling (relative velocity threshold = 0.03 m/s) en rel_low (relative velocity threshold = 0.01 m/s).

- Geen effect.

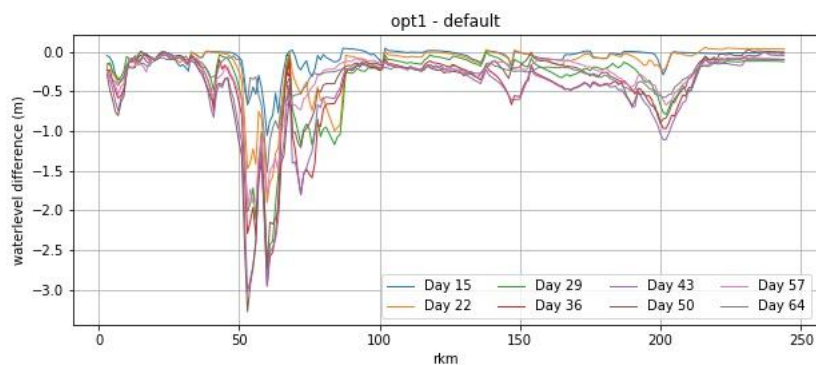
Rel_high:



Figuur A.7 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling (relative velocity threshold = 0.03) and rel_high (relative velocity threshold = 0.05) overtime.

- Nauwelijks effect (slightly lower water level at rkm 32 at extreme discharge).

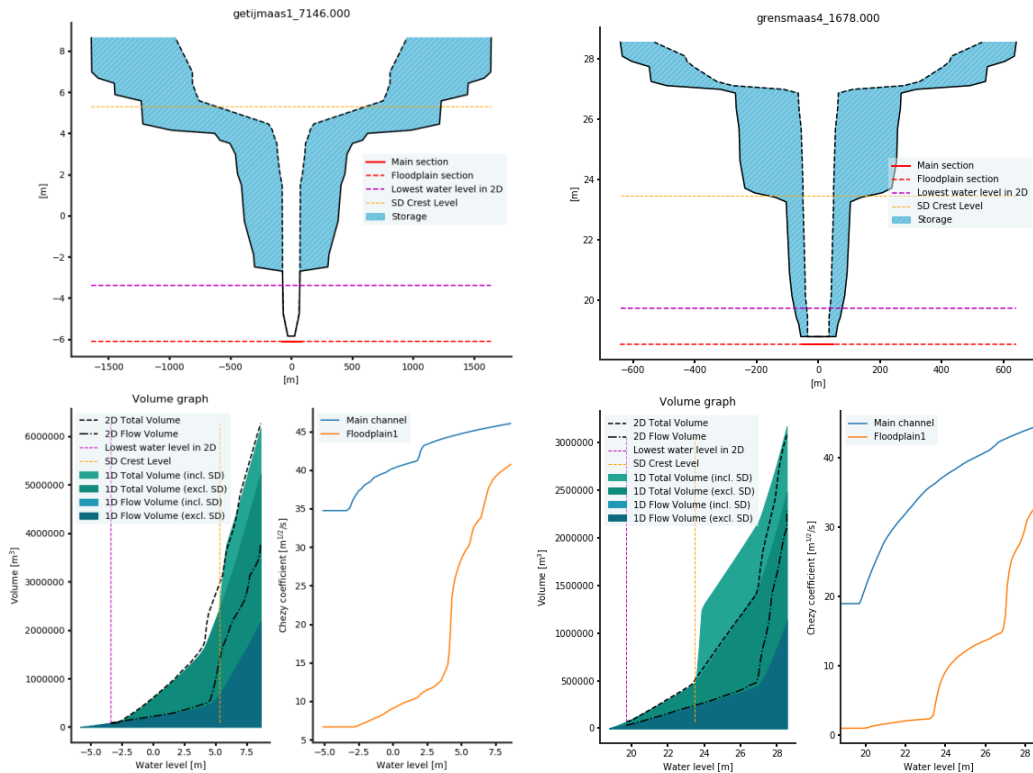
Opt1:



Figuur A.8 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling (SDOptimisationMethod = optimize on total volume) and opt1 (SDOptimisationMethod = optimize on flow volume) overtime.

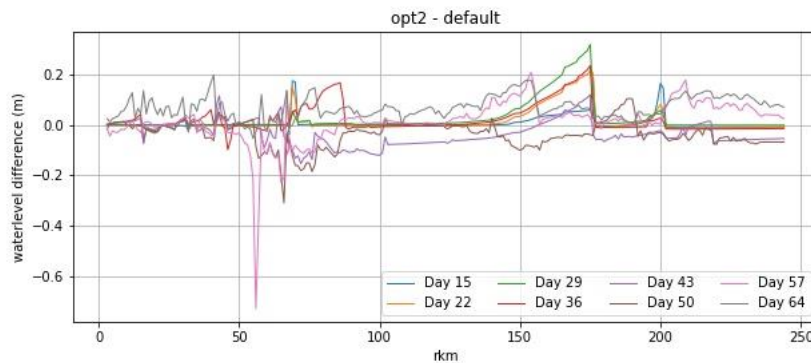
- Verandering in de zomerdijkhoogte, oppervlakte achter de zomerdijk en de uiterwaardhoogte achter de zomerdijk. (Figuur A.9).

- Over het algemeen een afname in de waterstand, met name. Extreem grote afname, tot 3 meter van rkm 50-80 bij gemiddelde tot hoge afvoer.



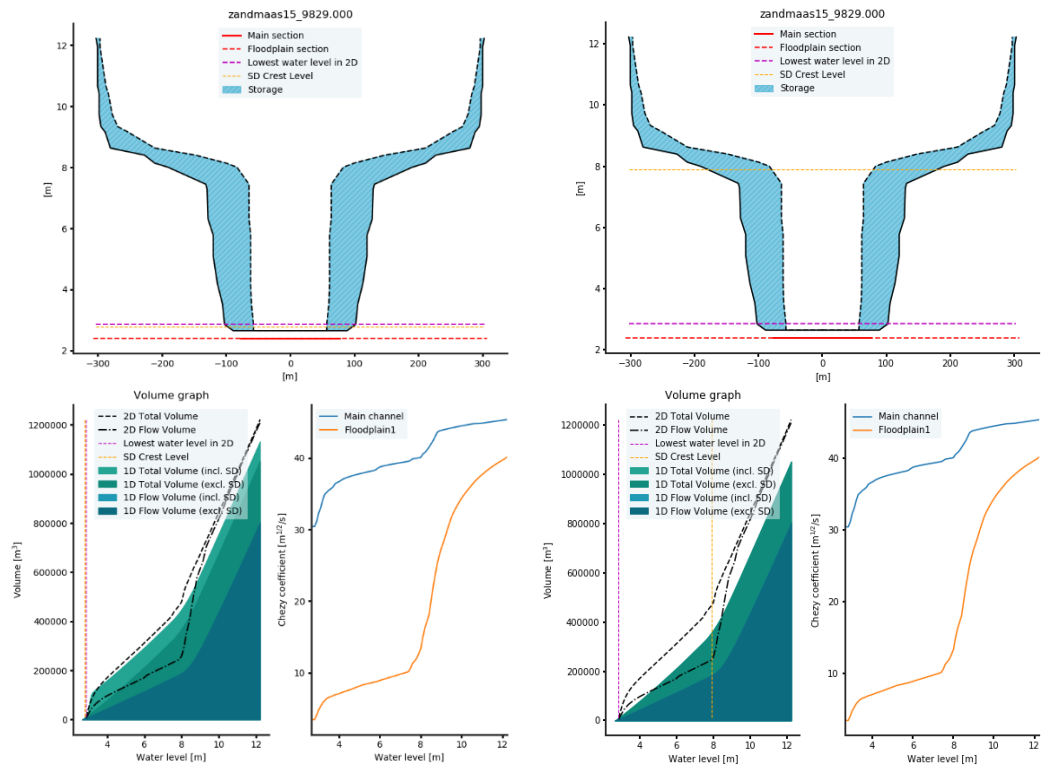
Figuur A.9 Het dwarsprofiel, volume, en ruwheid bij rkm 55.5 (links: default, rechts: opt1). De zomerdijk is lager dan in opt1 waardoor een volumefout ontstaat.

Opt2:



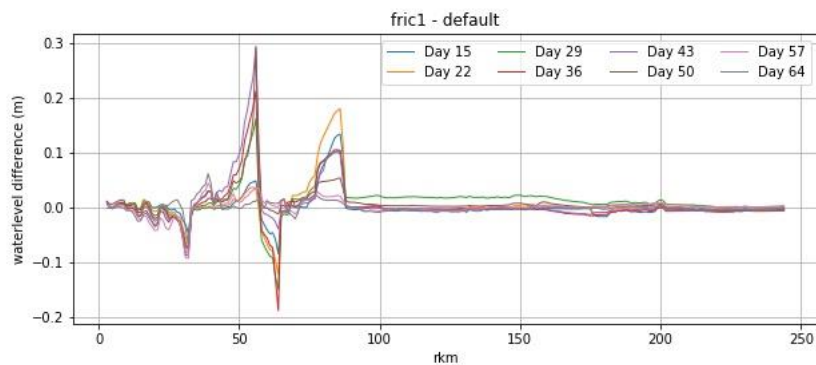
Figuur A.10 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling ($SDOptimisationMethod = optimize\ on\ total\ volume$) en opt2 ($SDOptimisationMethod = optimize\ on\ both\ total\ and\ flow\ volume$).

- Verandering in de zomerdijkhoogte, oppervlakte achter de zomerdijk en de uiterwaardhoogte achter de zomerdijk. (Figuur A.11).
- Er treedt vooral een effect op bij zeer hoge afvoer.
- Afnemende waterstand bij rkm 175-176 (Stuw Grave) bij lage tot middelhoge afvoer discharge.



Figur A.11 The cross-section, volume graph, and roughness right downstream of the Stuw Grave (left: default, right: opt2). The summer dike crest level is higher than that of default which triggers the volume error.

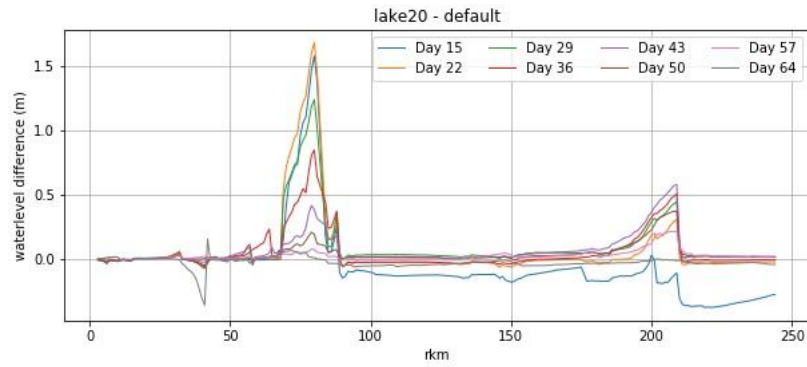
Fric1:



Figur A.12 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling (FrictionWeighingMethod= arithmetic mean) en fric1 (FrictionWeighingMethod= weighted average) overtime.

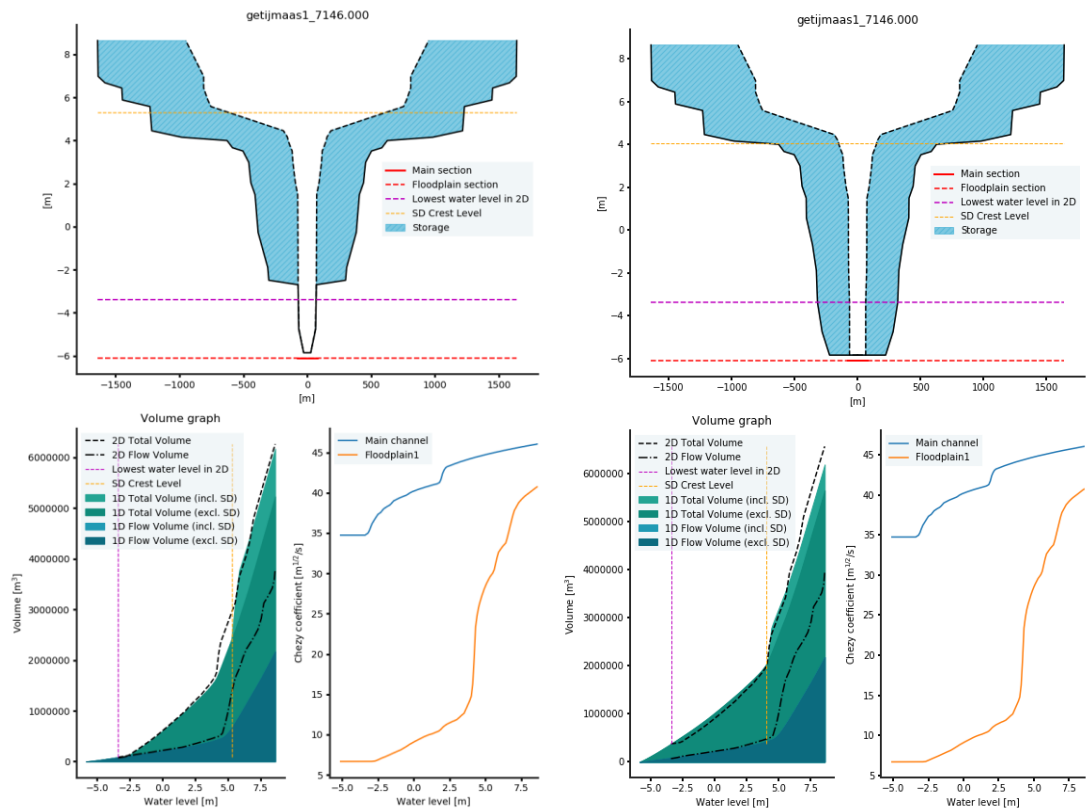
- Op grootste deel van de Maas nauwelijks verschil.
- Lokale effecten: waterstand neemt toe bij rkm 32 en 64 en neemt af bij rkm 56 en 86.
- Het verschil in ruwheidswaarden is $\pm 4 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$.

Lake20:



Figur A.13 Het waterstandsverschil tussen de standaardinstelling (LakeTimesteps=10) en lake20 (LakeTimesteps=20).

- Lokale toename in waterstand bij rkm 80 and 210.
- De dwarsprofielbreedte bij plassen is grotere bij lagere afvoer.



Figur A.14 The cross-section, volume graph, and roughness at the end of Geijmaas1 around rkm 209.5 (left: default, right: lake20). The lake is no longer recognized as a lake in lake20, the volume which is added to the area behind summer dike in default is added to the cross-section instead.

A.3 Python script voor het aanmaken van initiële waterstanden

```
"""
Script to read netCDF map file and create initial water level and xy velocity files
"""

import numpy as np
from netCDF4 import Dataset
import pandas as pd
from shapely.geometry import Point, Polygon, shape
import geopandas as gpd
import json

''' <User Input> '''

reference_model_path = 'c:/Projects/KPP/fm2prof_proj/Maas_dir/Model_FM/Maas_2_merged_map.nc'
fileout_path = 'c:/Projects/KPP/fm2prof_proj/Maas_dir/Model_FM/'
polygon_file = 'c:/Projects/KPP/fm2prof_proj/Maas_dir/Data/GIS/sectiel_plassen.geojson'
Filter = False # It takes overnight to process the filtering
tt = -1 # taking the output at the end of the simulation

''' </User Input> '''

def _read_fm_model(file_path):
    """input: FM2D map file"""

    # Open results file for reading
    res_fid = Dataset(file_path, 'r')

    # Time-invariant variables from FM 2D
    df = pd.DataFrame(columns=['x'], data=np.array(res_fid.variables['mesh2d_face_x']))
    df['y'] = np.array(res_fid.variables['mesh2d_face_y'])
    df['bedlevel'] = np.array(res_fid.variables['mesh2d_flowelem_b1'])

    # # Time-variant variables
    time_dependent = {
        'waterdepth': pd.DataFrame(data =
np.array(res_fid.variables['mesh2d_waterdepth']).T, columns=res_fid.variables['time']),
        'xvel': pd.DataFrame(data = np.array(res_fid.variables['mesh2d_ucx']).T,
columns=res_fid.variables['time']),
        'yvel': pd.DataFrame(data = np.array(res_fid.variables['mesh2d_ucy']).T,
columns=res_fid.variables['time']),
    }

    return df, time_dependent

''' WaterDepth '''
df, D = _read_fm_model(reference_model_path)
B = df['bedlevel']
x = df['x']
y = df['y']
wd = D['waterdepth'].iloc[:,tt]
xvel = D['xvel'].iloc[:,tt]
yvel = D['yvel'].iloc[:,tt]

if Filter:
    with open(polygon_file) as fin:
        js = json.load(fin)

X_vel = []
Y_vel = []
fileout = fileout_path + 'waterlevel_ini.xyz'
with open(fileout, 'w') as fout:
    for i in range(len(x)):
        lineout = '{:.6f} {:.6f} {:s}\n'.format(x[i], y[i], '-999')
        x_vel_tmp = 0
        y_vel_tmp = 0
        if wd[i] > 0.05:
            if Filter:
                pt = Point(x[i], y[i])
                for feature in js['features']:
                    polygon = Polygon(feature['geometry']['coordinates'][0][0])
                    if polygon.contains(pt):
                        lineout = '{:.6f} {:.6f} {:.3f}\n'.format(x[i], y[i], B[i]+wd[i])
                        x_vel_tmp = xvel[i]
                        y_vel_tmp = yvel[i]
                        break
            else:
                lineout = '{:.6f} {:.6f} {:.3f}\n'.format(x[i], y[i], B[i]+wd[i])
                x_vel_tmp = xvel[i]
                y_vel_tmp = yvel[i]
            fout.write(lineout)
            X_vel.append(x_vel_tmp)
            Y_vel.append(y_vel_tmp)

filein = fileout_path + 'waterlevel_ini.xyz'
```

```
fileout = fileout_path + 'waterlevel_ini.csv'
with open(filein) as fin, open(fileout,'w') as fout:
    for line in fin:
        if not '-999' in line:
            fout.write(line.replace(' ',''))

fileout = fileout_path + 'x_velocity_ini.xyz'
with open(fileout,'w') as fout:
    for i in range(len(x)):
        lineout = '{:.6f} {:.6f} {:.4f}\n'.format(x[i],y[i],X_vel[i])
        fout.write(lineout)

fileout = fileout_path + 'y_velocity_ini.xyz'
with open(fileout,'w') as fout:
    for i in range(len(x)):
        lineout = '{:.6f} {:.6f} {:.4f}\n'.format(x[i],y[i],Y_vel[i])
        fout.write(lineout)
```

B Appendix bij Hoofdstuk 4

Alle figuren zijn bijgeleverd als .zip bestand.

Tabel B.1 Overzicht RMSE-waardes (m) verschil tussen 2D en 1D resultaat per observatie locatie (grens van ruwheidstrajecten) voor 4 verschillende cases: ongekalibreerd, gekalibreerd, validatie WBI17 D1971 en validatie WBI17 D4118.

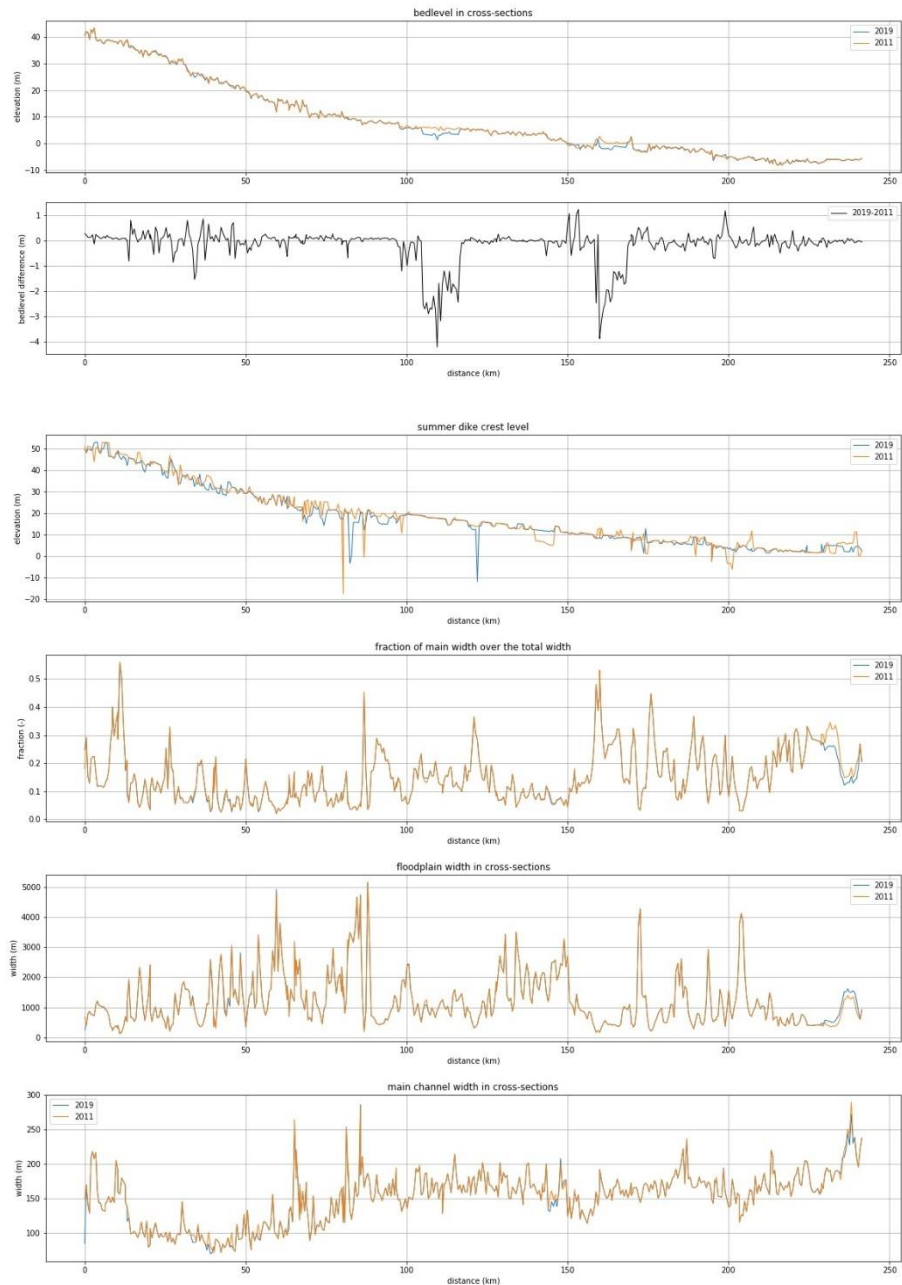
Locatie / ruwheidstraject	Ongekalibreerd	Gekalibreerd (variant 3)	Validatie - WBI17 D1971	Validatie - WBI17 D4118
Eijsden-grens	0.26	0.09	0.05	0.03
St-Pieter	0.27	0.09	0.01	0.04
Borgharen-dorp	0.27	0.14	0.09	0.07
Lanaken-Smeermaas	0.15	0.07	0.05	0.07
Uikhoven	0.27	0.10	0.08	0.04
Elsloo	0.16	0.12	0.05	0.06
Eisden-Mazenhoven	0.43	0.06	0.06	0.07
Meeswijk-Veer	0.55	0.06	0.05	0.09
Negenoord	0.25	0.06	0.07	0.09
Grevenbicht	0.27	0.10	0.08	0.08
Maaseik	0.40	0.10	0.09	0.10
Stevensweert	0.42	0.10	0.13	0.12
Linne-ben	0.75	0.14	0.12	0.09
Buggenum	0.78	0.26	0.17	0.11
Neer	0.72	0.08	0.10	0.10
Belfeld-ben	0.77	0.09	0.10	0.11
Venlo	0.57	0.10	0.09	0.09
Well-dorp	0.51	0.09	0.09	0.07
Sambeek-ben	0.50	0.08	0.11	0.10
Gennep	0.44	0.12	0.11	0.08
Mook	0.42	0.12	0.11	0.12
Grave-ben	0.47	0.07	0.10	0.12
Megen	0.51	0.08	0.12	0.12
Lith-dorp	0.53	0.10	0.11	0.18
Heesbeen	0.64	0.08	0.09	0.17

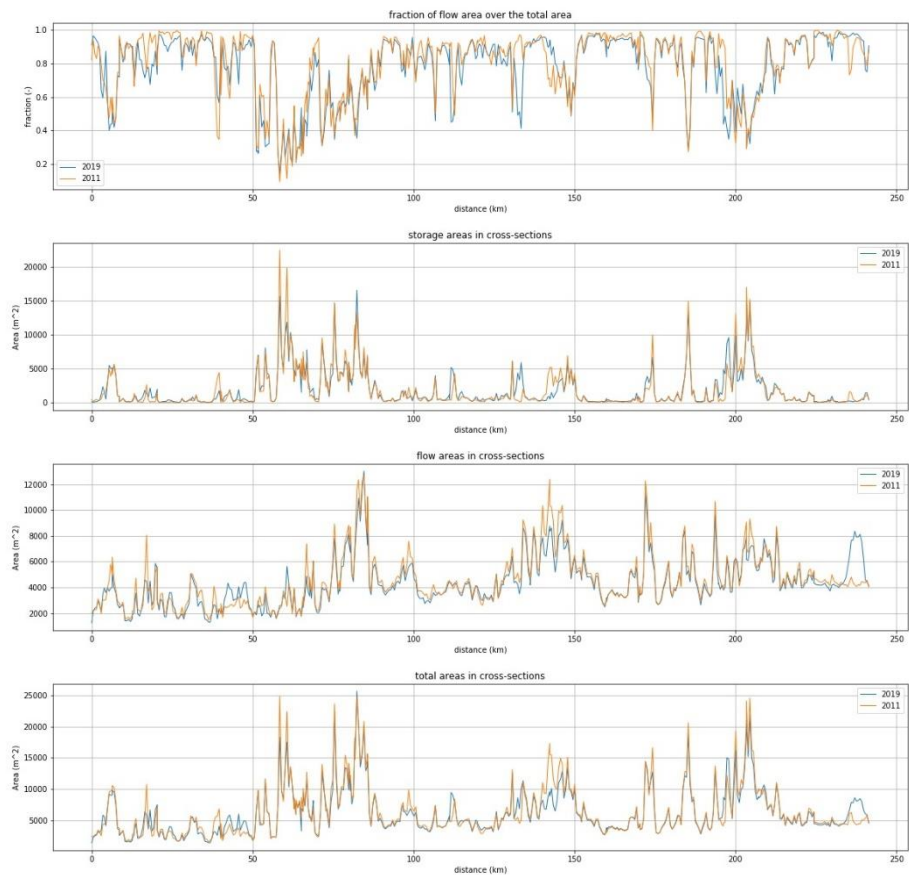
C Appendix bij Hoofdstuk 5

Alle figuren zijn bijgeleverd als .zip bestand. De x-as is de afstand tot de bovenstroomse modelrand.

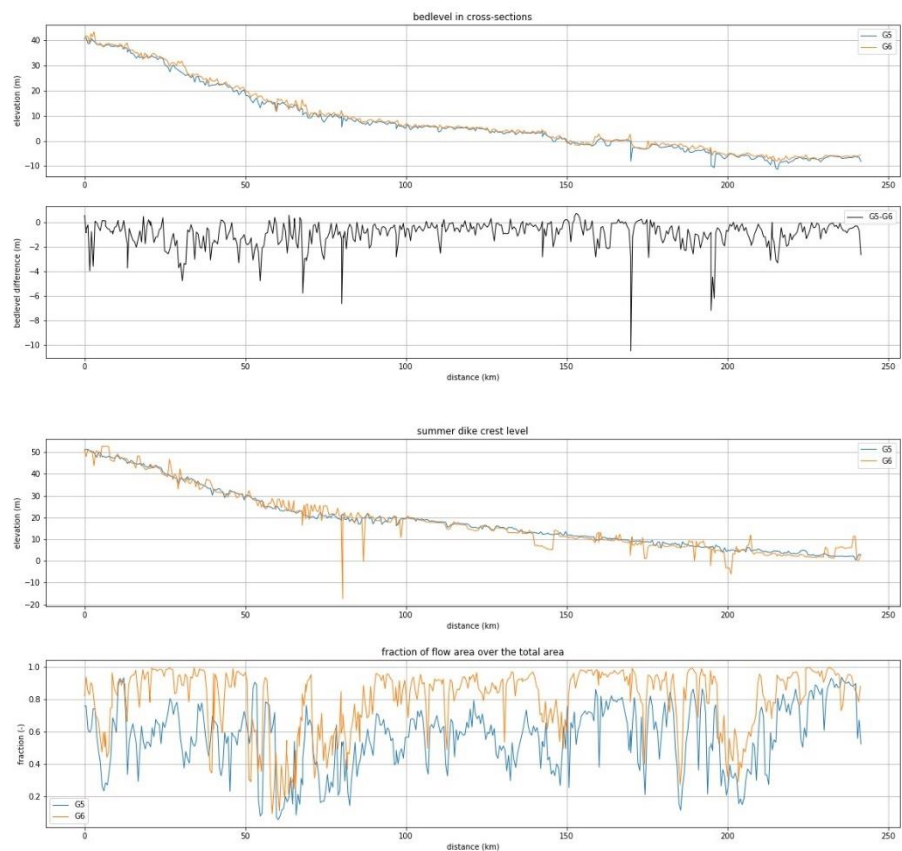
C.1 Modelbouw: vergelijking tussen FM2PROF uitvoer

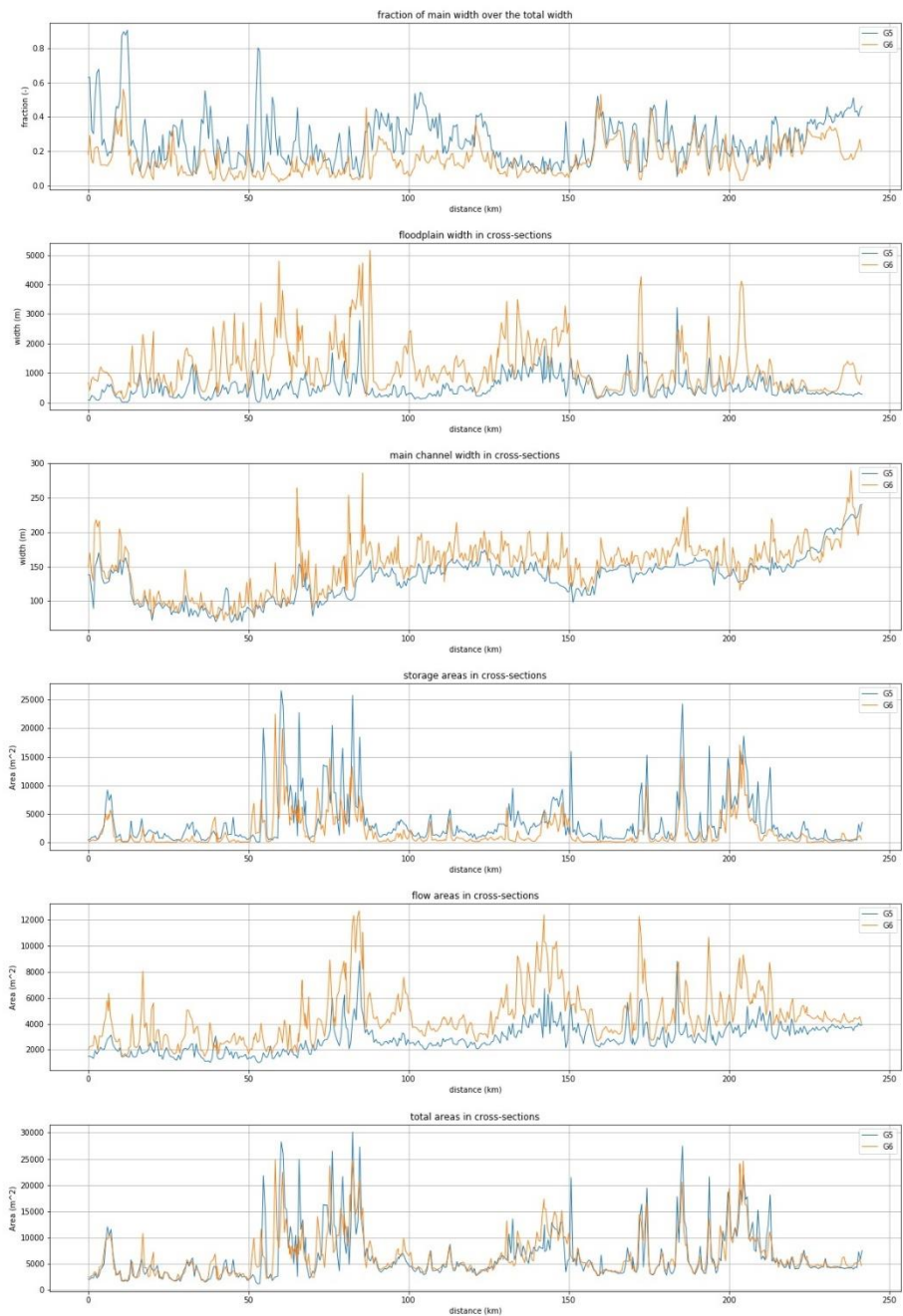
C.1.1 j11 en j19





C.1.2 j11 (G6) en j11 (G5)





C.2 Kalibratie & validatie figuren

Alle figuren zijn los bijgeleverd als *.zip bestand

Tabel C.2 Overzicht RMSE-waardes (m) verschil tussen 2D en 1D resultaat voor 2010/2011 per observatie locatie (grens van ruwheidstrajecten) voor 3 verschillende cases: ongekalibreerd, gekalibreerd, validatie 2010/2011 (zonder stuwen).

Locatie / ruwheidstraject	Ongekalibreerd	Gekalibreerd	Validatie - 2010/2011
Eijsden-grens	0.30	0.07	0.11
St-Pieter	0.49	0.07	0.05
Borgharen-dorp	0.50	0.04	0.25
Lanaken-Smeermaas	0.53	0.07	0.25
Uikhoven	0.41	0.06	0.20
Elsloo	0.40	0.05	0.36
Eisden-Mazenhoven	0.53	0.04	0.35
Meeswijk-Veer	0.50	0.07	0.57
Negenoord	0.29	0.10	0.42
Grevenbicht	0.59	0.07	0.40
Maaseik	0.14	0.07	1.23
Stevensweert	0.62	0.32	0.43
Linne-ben	0.69	0.10	0.31
Buggenum	0.18	0.13	0.34
Neer	0.40	0.07	0.17
Belfeld-ben	0.43	0.08	0.35
Venlo	0.46	0.07	0.33
Well-dorp	0.41	0.06	0.19
Sambeek-ben	0.51	0.09	0.38
Gennep	0.34	0.07	0.20
Mook	0.18	0.05	0.09
Grave-ben	0.27	0.06	0.24
Megen	0.25	0.10	0.18
Lith-dorp	0.47	0.24	0.31
Heesbeen	0.18	0.10	0.07

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