

## Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren

Zesde-generatie modellering Maas



**Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren**  
Zesde-generatie modellering Maas

## Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren

Zesde-generatie modellering Maas




<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat
<b>Contactpersoon</b>	Martin Scholten
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Zesde-generatie hydraulica schematisaties Rijkswaterstaat Maas modelnauwkeurigheid extrapolatie stationariteit

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	12-10-2021
<b>Projectnummer</b>	11206813-002
<b>Document ID</b>	11206813-002-ZWS-0012
<b>Pagina's</b>	36
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Jurjen de Jong	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Jurjen de Jong 	Koen Berends 	Bianca Peters 	

# Samenvatting

Deze rapportage beschrijft een advies in de toepassing van kalibratiefactoren voor de zesde-generatie modellen van Rijkswaterstaat, en is in eerste instantie met name gericht op de Maas. De vraag is van welke kalibratiewaarden wordt verwacht de beste modelresultaten te geven bij het simuleren van waterstanden bij hoge afvoeren: waarden gebaseerd op een kalibratie op HW1995 (de hoogste recente afvoergolf, maar de geometrie is sindsdien veel veranderd), of een kalibratie op HW2011 (een recentere geometrie, maar veel lagere afvoergolf).

Op basis van eerder gepubliceerde resultaten van modelkalibratie en -validatie is een beoordeling gemaakt van de *extrapolatietest* en de *stationariteitstest*. Op basis van de resultaten uit deze testen is een inschatting gemaakt van de meest nauwkeurige berekening van de waterstanden bij extreme afvoeren.

Op basis van de argumenten wordt geadviseerd om gebruik te maken van de kalibratie op HW1995. Door deze keuze wordt het risico op onderschatting in modelresultaten bij BOI-condities klein gehouden, terwijl ten opzichte van de vijfde generatie de waterstanden nog altijd lager zijn. Dit advies is overgenomen voor de zesde-generatie Maas-modellen.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Trends in kalibratiefactoren: ervaringen en verwachtingen</b>	<b>7</b>
2.1	Extrapolatietest	8
2.2	Stationariteitstest	9
2.3	Verwachtingen bij combinatie extrapolatie en stationariteit	10
<b>3</b>	<b>Afweging, advies en keuze</b>	<b>13</b>
3.1	Afweging en advies	13
3.2	Keuze voor optie A	14
<b>4</b>	<b>Aanbevelingen vervolgonderzoek</b>	<b>15</b>
	<b>Referenties</b>	<b>17</b>
<b>A</b>	<b>Kalibratiemethodiek en -factoren</b>	<b>18</b>
A.1	Maas	18
A.2	Rijntakken	20
A.3	Overijsselse Vecht	22
<b>B</b>	<b>Validatieresultaten</b>	<b>23</b>
B.1	Vijfde-generatie WAQUA	23
B.2	Maas	24
B.3	Rijntakken	27
<b>C</b>	<b>Effect kalibratiefactoren op waterstand bij MHW</b>	<b>30</b>
<b>D</b>	<b>Discussie kalibratiemethodiek</b>	<b>31</b>
D.1	Theoretische verwachting van maatregelen op stationariteit	31
D.2	Hypothese ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed	32
D.3	Effect op extrapolatie door keuzes in schematisatie en kalibratie	33

# 1 Inleiding

In de zesde-generatie modellering van Rijkswaterstaat zijn nieuwe modellen opgezet in D-HYDRO van diverse waterlichamen. Er is in deze generatie er voor gekozen om de kalibratie op dezelfde manier te doen als vorige generatie. Bij deze aanpak wordt de ruwheid middels een kalibratiefactor gekalibreerd op verschillende afvoerniveaus, en op verschillende jaren (waarbij ieder jaar een eigen modelgeometrie heeft). Doorgaans wordt het meest recente jaar gebruikt voor kalibratie, maar voor hogere afvoeren, die niet vaak optreden, worden oudere jaren gebruikt (zie ook bijlage A). Doordat voor hogere afvoeren terug wordt gegaan tot hoogwater (HW) 1995, bestrijken de verschillende modellen een periode van 20 jaar en is door diverse uitvoeringsprogramma's een grote verandering in de geometrie.

Bij de kalibratie en validatie van de Maas is geconstateerd dat de kwaliteit van het model (ten opzichte van metingen) sterk verschillende per gemodelleerd jaar (de geometrie) en per afvoer (De Jong, 2020). Bij de validatie bleek dat bij kalibratie op één afvoer / geometrie, de fout sterk toenam bij toepassing op een andere afvoer / geometrie. Voor het inschatten van de implicaties van deze verschillen is onderzoek gedaan naar de toepassing van verschillende kalibratieresultaten (ofwel H2 gekalibreerd op HW1995; ofwel H1 gekalibreerd op HW2011) op de waterstanden bij extrapolatie naar extreme afvoer (4000 m<sup>3</sup>/s), resulterend in een verschil van 10 à 20 cm afhankelijk van de keuze (Van der Deijl & De Jong, 2021; zie conclusies in bijlage C).

Tijdens bespreking van de resultaten met Rijkswaterstaat (8 juni 2021) kon geen consensus gevonden worden voor de keuze in toepassing van kalibratiefactoren van H1 of H2. Vastgesteld is dat deze afweging verder uitgewerkt diende te worden, wat geresulteerd heeft in de wens naar het voorliggende rapport. Het doel is het verzamelen van kwantitatieve en kwalitatieve argumenten op de nauwkeurigheid van het model bij BOI-condities<sup>1</sup> en het opstellen van een onderbouwd advies aan Rijkswaterstaat.

De hoofdtekst wordt ondersteund door diverse resultaten en citaten die opgenomen zijn in een serie bijlagen.

*Dit document is initieel opgesteld voor de keuze van de Maas, maar bevat ook al enkele afwegingen ten behoeve van de Rijntakken en de Overijsselse Vecht waar vergelijkbare trends zichtbaar zijn en keuzes gemaakt moeten worden. Deze passages zijn telkens cursief gemarkeerd.*

---

<sup>1</sup> BOI verwijst naar het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium waarbinnen de primaire waterkeringen worden beoordeeld. De term BOI-condities wordt hier gebruikt om te verwijzen naar de uitgangspunten van het project BOI, dit betreft een combinatie van de geometrie met alle bekende maatregelen en vergunningen (het 'beno'-model) en extreme rivierafvoeren. Hoewel in BOI gebruik wordt gemaakt van zeer extreme afvoeren wordt de beoordeling in dit rapport gegeven voor het maatgevend hoogwater (MHW; 4000 m<sup>3</sup>/s).

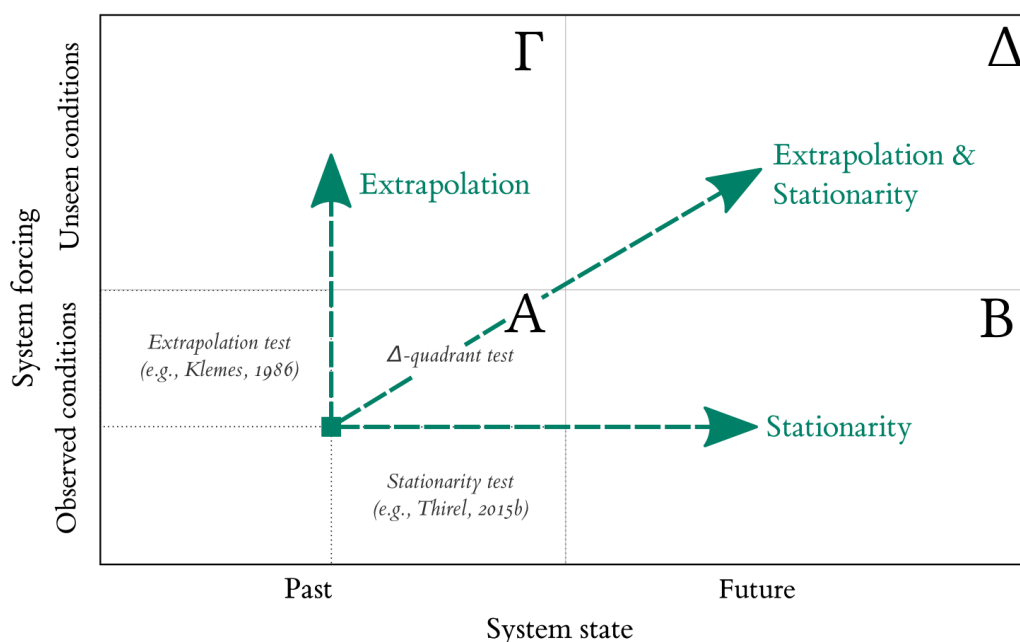
## 2 Trends in kalibratiefactoren: ervaringen en verwachtingen

De verwachte nauwkeurigheid van de waterstanden bij BOI-condities is afhankelijk van de kwaliteit van het model en diens kalibratie op metingen. In dit hoofdstuk volgt daarom een discussie van de ervaringen uit de kalibratie/validatie van het model, en de verwachte nauwkeurigheid van de kalibratiefactoren bij deze extrapolerende condities.

Voor het structureren van de ervaringen wordt gebruik gemaakt van het conceptuele schema van Berends (2019), zie Figuur 2.1. Dit schema beschrijft vier kwadranten van modeltoepassingen door onderscheid te maken in bekende en onbekende systeembeschrijvingen (horizontale as) en bekende en onbekende randvoorwaarden (verticale as). In de context van dit onderzoek bestaat de horizontale as uit de stationariteit door veranderende gebiedsbeschrijvingen<sup>2</sup> en de verticale as uit de extrapolatie bij hogere rivierafvoeren.

De kalibratie en validatie van het model bevindt zich in kwadrant **A**, terwijl we voor de BOI-condities geïnteresseerd zijn in het kwadrant  $\Delta$ : een niet-bemeten hoge afvoer, en een toekomstige geometrie door de modellering van geplande en vergunde maatregelen. Door kennis uit de kalibratie/validatie binnen kwadrant **A**, doen we een uitspraak over de verwachte extrapolatie ( $\Gamma$ ) en stationariteit (**B**) en de verwachting voor de combinatie hiervan ( $\Delta$ ).

Opgemerkt wordt dat in dit hoofdstuk niet wordt gesproken over de trend in waterstanden (die door de jaren vooral dalend is door rivierversuiming), maar over de trend in de *fout in gemodelleerde waterstanden*.



Figuur 2.1 Conceptueel diagram van modelgebruik in relatie tot de gebiedsbeschrijving (system state) en randvoorwaarden (system forcing). Overgenomen uit Berends (2019).

<sup>2</sup> In de context van dit rapport wordt stationariteit gedefinieerd als: de verandering in de modelprestaties doordat een verandering van de geometrie in het model een ander waterstandseffect geeft dan blijkt uit metingen.

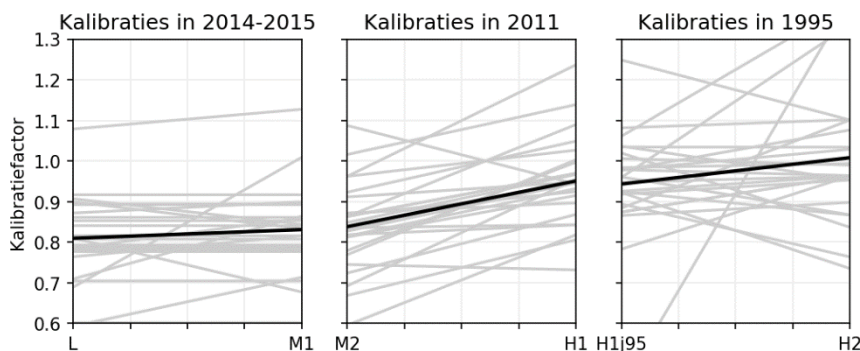
## 2.1 Extrapolatietest

De extrapolatie van het model kan beschouwd worden door een vergelijking van de kalibratiefactoren van de verschillende afvoerniveaus bij dezelfde gebiedsschematisatie. Bij een perfecte extrapolatie zouden de kalibratiefactoren bij alle afvoeren aan elkaar gelijk zijn: een kalibratie op één afvoerniveau zou volstaan. In de praktijk blijkt echter dat de kalibratiefactor niet constant is als functie van de afvoer. Dit kan komen doordat bij toenemende afvoer de waterdiepte en daardoor de ruwheid door rivierduinen, maar ook doordat delen van het winterbed actief worden.

Uit de kalibratie van de Maas (De Jong, 2020) blijkt dat binnen een modelschematisatie iedere hogere afvoer gemiddeld een hogere kalibratiefactor heeft (zie Figuur 2.2 en Bijlage A.1). Twee mogelijke oorzaken zijn: (1) als het winterbed te glad gemodeleerd wordt (te weinig weerstand), is bij toenemend afvoer een steeds grotere ruwheid van het zomerbed nodig om hiervoor te corrigeren, of (2) de waterdiepteafhankelijkheid in de zomerbedformulering is niet sterk genoeg: met toenemende waterdiepte zou de ruwheid meer moeten toenemen dan nu door de formulering wordt gedaan. In beide gevallen is de verwachting dat bij nóg hogere afvoeren (de extrapolatie) de kalibratiefactor nog hoger zou moeten liggen. Bij gelijkblijvende kalibratiefactor zouden gesimuleerde waterstanden daarom te laag zijn bij extrapolatieberekeningen (kwadrant  $\Gamma$ ).

Een inschatting van de orde grootte kan verkregen worden door eerst in te schatten hoeveel afvoerafhankelijkheid in de kalibratiefactor gemist wordt. Lineair doorzetten van de trends geeft een verwachte toename in kalibratiefactor bij BOI-condities van +0.1 tot +0.2 ten opzichte van niveau H2. Door het ontbreken van deze hogere kalibratiefactor zijn bij BOI-condities de waterstanden bij gebruik van H2 naar verwachting tussen -0.05 en -0.3 m te laag in het model (deze inschatting is gebaseerd op de initialisatiematrix van OpenDA-kalibratie; zie aanbeveling 2).

*Ook bij de Overijsselse Vecht is een grote toename in kalibratiefactor bij toenemende rivierafvoer (zie Bijlage A.3). Op de Rijntakken is de trend niet consistent waarneembaar<sup>3</sup> en zijn de trends in kalibratiefactor (als functie van afvoer) verschillend per riviertak (zie Bijlage A.2).*



Figuur 2.2 In ieder kalibratiejaar (met een eigen modelschematisatie) zijn twee kalibraties uitgevoerd. In iedere deelfiguur is voor een modelschematisatie de gemiddelde trend van de twee kalibraties in ieder dat jaar weergegeven (zwart) met op de achtergrond de trends van de individuele stations (grijs).

<sup>3</sup> Globaal kan wel gezegd worden dat bij toenemende afvoer er een hogere kalibratiefactor gevonden wordt, behalve tussen H1 en H2; dan neemt de kalibratiefactor af. De H1 factoren op de Neder-Rijn/Lek vanaf Grebbe tot Hagestein zijn vermoedelijk te hoog, door nog onbekende oorzaak.



## 2.2 Stationariteitstest

De stationariteit wordt getoetst door bij vergelijkbare afvoeren verschillende gebiedsbeschrijvingen te toetsen. Deze test is bij de modelopzet uitgevoerd door in de validatie perioden te kiezen in andere jaren. De kwaliteit van de kalibratie en de stationariteit wordt hierdoor gelijktijdig getest en kunnen dus niet afzonderlijk worden gekwantificeerd.

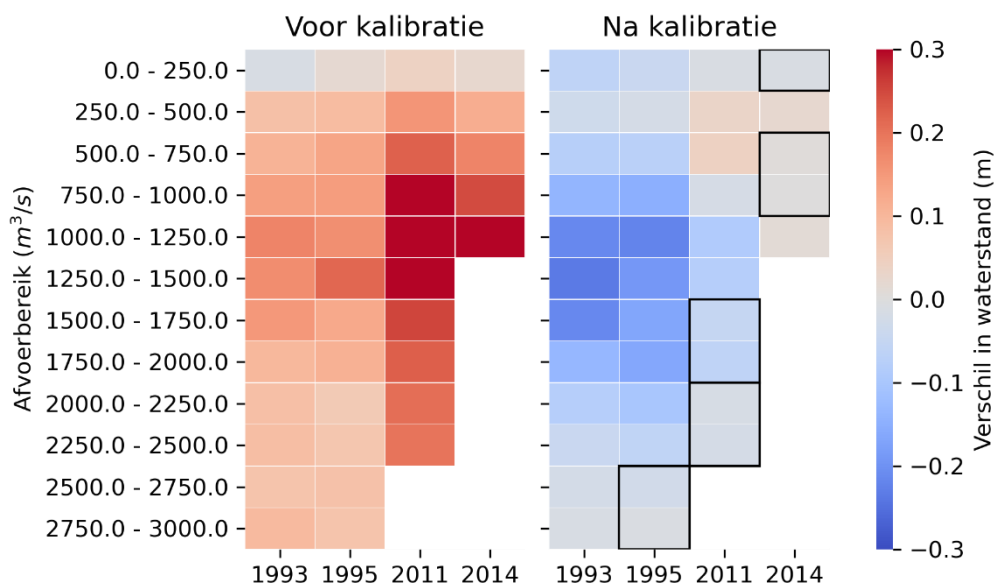
Uit de vergelijking met metingen (zie Bijlage B.2) blijkt dat meer historische schematisaties van de Maas ten opzichte van metingen een lagere bias hebben (Figuur 2.3, links). Doordat de kalibratie is uitgevoerd op (voor iedere afvoer) de meest recente periode hebben de meer historische schematisatie een negatieve bias (Figuur 2.3, rechts).

Een hypothese is dat de verschillende resultaten veroorzaakt worden doordat over de tijd het doorstroomoppervlakte van het winterbed toeneemt ten gevolge van rivierverruiming (bijvoorbeeld Maaswerken). Bij een toenemende afvoer door het winterbed neemt daarmee de afvoer door het (gekalibreerde) zomerbed af in de tijd. Uit de extrapolatietest bleek al dat een lagere (zomerbed)afvoer in kalibratie leidt tot een lagere kalibratiefactor. Wanneer bij een rivierverruiming de kalibratiefactor niet wordt verlaagd, leidt dit tot te hoge waterstanden. In deze hypothese worden de fouten van zowel de extrapolatietest als de stationariteitstest verklaard door een gebrekkige waterstandsafhankelijkheid in het zomerbed. Deze hypothese verklaart niet waarom de negatieve bias ook bij lage afvoeren ontstaat (dit geldt met name voor de Rijn, zie Bijlage A.2). Een discussie hierover voor toekomstige kalibraties is opgenomen in bijlage D.2.

Als deze trend doorzet, dan wordt verwacht dat een schematisatie met nóg verdergaande rivierverruiming (bij gelijke kalibratiefactoren en gelijke afvoer) te hoge waterstanden zal simuleren (kwadrant **B**).

Een inschatting van de orde grootte kan verkregen worden door de verandering in modelresultaat (model t.o.v. meting) tussen 2011 en 1995 af te lezen bij middelhoge afvoeren (+10 à +20 cm), en aan te nemen dat dit ook geldt voor hogere afvoeren. Als aangenomen wordt dat de verandering tussen 1995 en de BOI-schematisatie twee keer zo groot is als tussen 1995 en 2011, en deze trend overeenkomstig te verdubbelen ontstaat een kwantitatieve inschatting (zie aanbeveling 5 en 7). In dat geval is de verwachte fout in de waterstanden in de BOI-schematisatie bij afvoerniveau H2, +20 à +40 cm.

*Op de Rijntakken blijkt uit de validatie op 1993 en 1995 bij de afvoeren M1 en M2 (2000 en 4000 m<sup>3</sup>/s) een sterk negatieve bias. Deze negatieve bias is vergelijkbaar maar soms iets kleiner in de validatie op 2010. Bij validatie op recentere perioden (2015/2016) is de bias slechts enkele centimeters (zie Bijlage B.3). Voor de Overijsselse Vecht is de validatie nog niet uitgevoerd.*



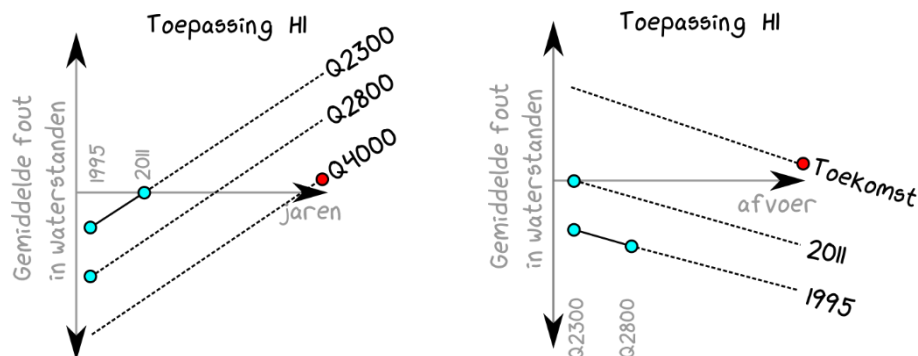
Figuur 2.3 Verschil tussen model en meting voor de perioden HW1993, HW1995, HW2010-2011 en het jaar 2014-2015 voor (links) en na (rechts) uitvoering van de kalibratie. De modelresultaten zijn berekend per afvoerbereik (de lokale gemodelleerde afvoer). Alleen de stations zijn meegenomen die in alle 4 perioden aanwezig waren. In de figuur na kalibratie zijn de kalibratiecondities gemarkeerd.

## 2.3 Verwachtingen bij combinatie extrapolatie en stationariteit

Op basis van de verwachte extrapolatie en stationariteit kan een uitspraak worden gedaan van de combinatie van beiden (kwadrant **A**). Dit gaat uit van constante kalibratiefactoren, bijvoorbeeld door gebruik van kalibratie H2 (op HW1995).

Uit de extrapolatietest blijkt de verwachting dat te lage waterstanden worden gesimuleerd bij extrapolatie bij extreme afvoeren (kwadrant **B**). Uit de stationariteitstest blijkt de verwachting dat te hoge waterstanden worden gesimuleerd bij verdere gebiedsverruiming (kwadrant **C**). Voor de combinatie hiervan moet een inschatting gemaakt worden tussen de bijdrage van beide trends: welke trend is dominant?

Dit probleem is geschetst in Figuur 2.4 door de bekende modelresultaten (blauwe bolletjes) als trend door te zetten naar de BOI-condities (rode bolletje). Hoe deze figuur er daadwerkelijk uit ziet is een grote onbekende. In dit voorbeeld zouden de waterstanden bij BOI-condities te hoog zijn, maar bij een sterkere relatie met de afvoer of een zwakkere relatie met de jaren, kan dit resultaat ook geheel anders uitvallen.

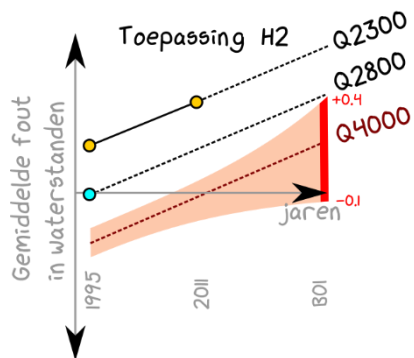


Figuur 2.4 Schets van het effect van doorzettende trends van de fout in modelresultaten bij (door de tijd) toenemende gebiedsverruiming (links) en bij toenemende afvoer (rechts). Beide figuren geven dezelfde informatie weer. Iedere lijn geeft de verwachte modelfout bij een andere afvoer. De figuur is geschetst met de kennis van de kalibratie en validatie van H1 (blauwe bolletjes). De curve en gradiënt van de werkelijke stippellijnen is onbekend, maar zorgt ervoor dat de verwachte fout in BOI-modellering (rode bolletje) positief of negatief uitvalt. Bij toepassing van H2 zouden alle lijnen in deze figuur omhoog verschuiven.

Geconcludeerd wordt dat bij gelijke afvoer (linker figuur) een kalibratie op recente jaren een beter resultaat geeft dan een kalibratie op een meer historisch jaar – de kalibratie H2 levert een verwachte overschatting van de waterstanden. Door onvoldoende afvoerafhankelijkheid in de modellering zal bij een MHW-afvoer bij gelijke geometrie (bij H2 is dat 1995) een te lage waterstand gemodelleerd worden. Deze onderschatting is sterker bij toepassing van een lager afvoerniveau zoals H1 (in het jaar 2011), omdat bij dat niveau de kalibratiefactoren lager zijn. Door gebruik te maken van een kalibratie op een historisch jaar (H2; HW1995) wordt gekozen voor hogere kalibratiefactoren en wordt gecorrigeerd voor het gemis in afvoerafhankelijkheid. Op basis van de orde grootte inschattingen van de voorgaande paragrafen wordt ingeschat dat door toepassing van kalibratiefactor H2 (op HW1995) bij BOI-condities, de waterstanden een fout met de werkelijkheid hebben van -0.1 tot +0.4 m (zie Figuur 2.5 en Tabel 2.1). Bij toepassing van kalibratiefactor H1 (op HW2011) wordt dit ingeschat op een fout van -0.5 tot +0.1 m.

Tabel 2.1 Samenvatting van de verwachte extrapolatiefout, stationariteitsfout en de optelsom van beiden als de totale fout (zie aanbeveling 1). Afgerond op 1 significant cijfer.

Verwachting bij BOI-condities o.b.v.:	Bij toepassing H1	Bij toepassing H2
Extrapolatiefout	-0.6 à -0.1 m (dubbele van H2)	-0.3 à -0.05 m
Stationariteitsfout	+0.1 à +0.2 m (helpt van H2)	+0.2 à +0.4 m
Totale fout	<b>-0.5 à +0.1 m</b>	<b>-0.1 à +0.4 m</b>



Figuur 2.5 Schets van de verwachte fout in waterstanden bij toepassing van kalibratiefactor H2. De blauwe bolletje geeft de enige bekende informatie aan, de gele bolletjes zijn een verwachting op basis de resultaten in Figuur 2.4.

Bij afvoergolven lager dan het MHW is de extrapolatiefout kleiner en wordt een hogere bias verwacht. Bij het operationele model is de stationariteitsfout kleiner en wordt een lagere bias verwacht. Voor operationeel gebruik wordt op basis hiervan ingeschat dat de bias netto iets hoger zal zijn.

Deze modelnauwkeurigheid is dezelfde orde grootte (iets kleiner) als de modelonzekerheid van de WAQUA-modellen van de Rijn bij MHW-condities:  $\pm 0.7$  à  $\pm 0.8$  m (Warmink, 2011; Thijssen et al, 2014). Berends et al. (2019) vonden een vergelijkbare bandbreedte met D-HYDRO modellen.

Ten slotte wordt opgemerkt dat in deze resultaten naar globale trends over het model is gekeken. Regionaal kunnen de trends anders zijn, en zouden in aanvullend onderzoek bepaald moeten worden.

## 3 Afweging, advies en keuze

### 3.1 Afweging en advies

In het vorige hoofdstuk wordt op basis van de geconstateerde modelfout door extrapolatie en stationariteit verwacht dat een fout bij BOI-condities ontstaat van  $\pm$  enkele decimeters. Geconstateerd wordt dat dit dezelfde orde grootte (iets kleiner) is als de verwachte onnauwkeurigheid van de modelresultaten uit eerdere onderzoeken (Warmink, 2011; Thijssen et al, 2014; Berends et al., 2019). Naast deze kwantitatieve constatering bestaan er echter ook enkele meer kwalitatieve argumenten. In dit hoofdstuk worden deze argumenten weergegeven voor drie mogelijke keuzes (opties) in de kalibratiefactor. Een beperkt aantal opties ontstaat door het uitgangspunt dat de reeds-uitgevoerde kalibraties niet meer worden herzien.

- Optie A. Extrapolatie op basis van “H2” (HW1995)
- Optie B. Extrapolatie op basis van “H1” (HW2011); het kalibratieniveau H2 laten vervallen wordt verwijderd.
- Optie C. Extrapolatie op basis van “H2<sub>j11</sub>”. Hiervoor wordt H2 gecorrigeerd op basis van het verschil tussen H1<sub>j95</sub> en H1.<sup>4</sup>

Voor ieder van deze opties is in Tabel 3.1 de diverse kwantitatieve en kwalitatieve argumenten gegeven. **Op basis van de argumenten wordt geadviseerd om gebruik te maken van de optie A “H2”.** Door deze keuze wordt het risico op onderschatting in modelresultaten bij BOI-condities klein gehouden, terwijl ten opzichte van de vijfde generatie de waterstanden nog altijd lager zijn.

---

<sup>4</sup> Deze correctie wordt hier uitgewerkt. Ter verduidelijking wordt een subscript aan alle kalibratiefactoren toegevoegd met het jaar waarop de kalibratie geldt (H2 is gelijk aan H2<sub>j95</sub>, en H1 is gelijk aan H1<sub>j11</sub>).

De correctie gaat als volgt:  $H2_{j11} = H2_{j95} \cdot (H1_{j11}/H1_{j95})$ ;  $H2_{j11} = H1_{j11} \cdot \frac{H2_{j95}}{H1_{j95}}$

Kalibratiefactor H1<sub>j95</sub> is gemiddeld hoger dan H1<sub>j11</sub> waardoor H2<sub>j11</sub> lager zal zijn dan H2<sub>j95</sub> (zie Bijlage B.2).

Tabel 3.1 Afweging van de voor- en nadelen van de drie opties

Optie A "H2"	Optie B "H1"	Optie C "H2 <sub>11</sub> "
Verwacht wordt bij BOI-condities een onderschatting in de afvoerafhankelijkheid, en een overschatting door stationariteit.	Verwacht wordt bij BOI-condities een (grotere) onderschatting in de afvoerafhankelijkheid, en een (kleinere) overschatting door stationariteit.	Verwacht wordt bij BOI-condities een onderschatting in de afvoerafhankelijkheid, en een (onbekende) overschatting door stationariteit.
<b>Een nauwkeurigheid wordt verwacht van -0.1 tot +0.4 m</b>	<b>Een nauwkeurigheid wordt verwacht van -0.5 tot +0.1 m</b>	<b>De uitkomst van dit model zal gemiddeld vergelijkbare waterstanden geven met optie A.</b>
+ Op basis van de verwachte nauwkeurigheid geeft het modelresultaat een overschatting (conservatief)	- Op basis van de verwachte nauwkeurigheid geeft het modelresultaat een onderschatting	- Geen aanleiding om een betere nauwkeurigheid te verwachten.
+ Lagere waterstanden dan vijfde generatie modellering (WAQUA)	+ (Veel) lagere waterstanden dan vijfde generatie modellering (WAQUA)	+ Lagere waterstanden dan vijfde generatie modellering (WAQUA)
		- De opbouw van dit kalibratieniveau vraagt goede onderbouwing, en is hiermee aanzienlijk complexer dan de andere opties.
+ Gebruik van de metingen van de hoogst gemeten afvoer	- Informatie uit HW1995 (H2) wordt niet gebruikt	+ Gebruik van de metingen van de hoogst gemeten afvoer
+ Huidige modelontwikkelingsprojecten zijn uitgevoerd met deze kalibratie	- Aanpassingen van kalibratie noodzakelijk in lopende modelontwikkelingsprojecten	- Aanpassingen van kalibratie noodzakelijk in lopende modelontwikkelingsprojecten
- Schematisatie en modelinvoer van 1995 zijn mogelijk kwalitatief minder dan 2011.		- Schematisatie en modelinvoer van 1995 zijn mogelijk kwalitatief minder dan 2011.

### 3.2 Keuze voor optie A

Op 20 juli 2021 is in overleg tussen Deltares en Rijkswaterstaat het resultaat van de conceptversie (v0.3) van de voorliggende rapportage besproken. Tijdens dit overleg is gekozen voor optie A: niveau H2 wordt toegepast in de zesde-generatie Maas-modellen. Dit op basis van de argumenten van de voorgaande hoofdstukken. De belangrijkste redenen zijn dat op deze manier de informatie van de hoogst gemeten afvoer (1995) wordt meegenomen op een eenduidige manier en dat dit naar verwachting een conservatieve uitwerking (hogere waterstanden) geeft onder BOI-condities.

## 4 Aanbevelingen vervolgonderzoek

Op basis van de conclusies in deze rapportage en de discussies die zijn gevoerd bij de totstandkoming hiervan, wordt het volgende aanbevolen om verder te onderzoeken, of mee te nemen bij toekomstige kalibraties:

1. Dit rapportage bevat inschattingen van de verwachte modelfout op basis van bekende modeluitkomsten uit de kalibratie/validatie. Doordat het slechts oppervlakkige inschattingen zijn is ook de methode om fouten te combineren eenvoudig gehouden door dit bij elkaar op te tellen. Voor een betere kwantificering dienen de fout in extrapolatie en stationariteit verder uitgewerkt te worden (de hierop volgende aanbevelingen), en moet bij het combineren van de fouten rekening gehouden worden met de mogelijke correlatie tussen beiden.
2. Het effect van extrapolatie is nu primair beoordeeld op een verandering in kalibratiefactor. Het effect van kalibratiefactor op de waterstanden betreft een inschatting. Door een gevoeligheidsanalyse uit te voeren met een (bijv. 10% hogere) kalibratiefactor kan dit effect beter beoordeeld worden.
3. Aanvullende validaties van het model op recente hoogwaters kunnen meer inzicht geven in de kwaliteit van het model in de actuele geometrie. De piek van de afvoergolven (2018-2020) is beduidend lager (max 1700 m<sup>3</sup>/s) dan HW2011 (2300 m<sup>3</sup>/s), waardoor hiermee met name de stationariteit wordt getoetst. De recente afvoergolf van juli 2021 (ong. 3300 m<sup>3</sup>/s) biedt wel uitkomsten om zowel stationariteit als extrapolatie te toetsen.
4. Een stationariteitsfout kan al voorafgaand aan kalibratie worden opgemerkt. Aanbevolen wordt om bij toekomstige kalibraties altijd vooraf na te gaan of de verandering in modelresultaten tussen twee jaargangen (met mogelijk verschillende modellen) overeenkomt met de veranderingen zoals opgemerkt in metingen. Een afwijking hiertussen kan door kalibratie niet worden opgelost en vraagt veranderingen in keuzes in de modelopzet.
5. De stationariteit wordt in deze rapportage enkel afgezet tegen het modeljaar. Dit jaar staat echter voor een bepaalde status van het systeem, bijvoorbeeld de beschikbare afvoercapaciteit. Aanbevolen wordt om veranderingen in de geometrie beter kwantitatief uit te drukken. Omdat veranderingen in modelinvoer (zoals ruwheid en bodemhoogte) sterk afhankelijkheid zijn van hun locatie in het winterbed en de stroombanen, wordt aanbevolen de verandering in modeluitkomsten allereerst uit te drukken in de verandering in modeluitkomsten (verandering in waterstanden). Door de verandering in modeluitkomsten af te zetten tegen de ontwikkeling van de stationariteitsfout, kan ook een verwachting voor deze fout voor onbekende geometrieën worden ingeschat.
6. Bij de kalibratie en validatie wordt nu enkel gekeken naar de waterstanden en afvoeren in het model. Aanbevolen wordt om ook te valideren op afvoerverdeling zomerbed-winterbed en op de stroomsnelheden in beiden. Een fout hierin geeft aan dat de kalibratie mogelijk niet op de goede plek wordt toegepast en dat bijvoorbeeld het winterbed gekalibreerd zou moeten worden. Verwacht wordt dat dit het sterkst speelt op rivieren met een relatief smal zomerbed (zoals de Maas). Indien metingen van de afvoerverdeling ontbreken, kan ook de verandering in afvoerverdeling onderzocht worden met modelsimulaties van verschillende jaren.

7. De niet-stationariteit in modelfout over verschillende schematisaties kan ook veroorzaakt worden door veranderingen in de manier dat de geometrie in de modellen wordt gemaakt. Zo is in 2012 de karterresolutie van de ecotopen verhoogd van 20x20 m<sup>2</sup> naar 5x5 m<sup>2</sup> (in WAQUA gaf dit een afname van 1 cm in de waterstanden en is dit gecorrigeerd met een kalibratie van model op model; De Jong, 2015). Daarnaast zijn veel lodingen in de oudere modellen gebaseerd op singlebeam metingen, terwijl in recente modellen multibeam metingen gebruikt worden. In de bodemhoogte van Baseline zijn de singlebeam hoogtes gecorrigeerd met -15 tot -30 cm om het verschil in meettechniek te corrigeren. Ook is de wijze van schematiseren veranderd, waardoor bijvoorbeeld het aantal overlaten (fixed weirs) tussen het j93 en j19 model bijna is verdubbeld (De Jong, 2020).
8. Onzekerheden in modelopbouw zouden onderdeel moeten zijn bij belangrijke modeltoepassingen. Aanbevolen wordt om ook verschillende modellen, of variaties in modelinstellingen (zoals kalibratiefactoren) mee te nemen. Voor het toetsen welke onzekerheden (positieve of negatieve) invloed hebben op het vermogen van het model om om te gaan met niet-stationariteit en extrapolatie, kunnen de testen die in dit rapport zijn uitgevoerd worden gebruikt.



# Referenties

- Adriaanse (1986) De ruwheid van de Bergsche Maas bij hoge afvoeren, DBW/RIZA nota 86.19
- Berends, K. D. (2019) Human intervention in rivers: quantifying the uncertainty of hydraulic model predictions. University of Twente. <https://doi.org/10.3990/1.9789036548823>
- Berends, K. D., Straatsma, M. W., Warmink, J. J., and Hulscher, S. J. M. H. (2019) Uncertainty quantification of flood mitigation predictions and implications for interventions, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19, 1737–1753, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1737-2019>, 2019.
- Van der Deijl, E. & J.S. de Jong (2021) Deelonderzoek Extrapolatie model-resultaten. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0008 v1.2
- De Jong, J.S. (2015), Nieuwe ecotopenkartering Maas: Kalibratie en verschilanalyse. Deltares rapport 1220072-002-ZWS-0027
- De Jong, J.S. (2020). Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelopbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014
- De Jong, J.S. (2021) Effect van de kalibratiemethodiek op afvoerverdeling en extrapolatie met behulp van een theoretisch model. Deltares memo 11206813-002-ZWS-0014, d.d. 7 juli 2021
- Spruyt, A.S. (2018) Keuze kalibratiepolygonen zesde generatie riviermodellen. Deltares memo 11202220-005-ZWS-0007
- Thijssen, A., A. Becker, D. Stuparu & M. Yossef (2014), Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper River Area. Report 1207807-02, Deltares, Delft, January 2014.
- Warmink, J.J. (2011), Unraveling uncertainties; The effect of hydraulic roughness on design water levels in river models. PhD thesis, University of Twente, ISBN 978-90-365-3227-3.

# A Kalibratiemethodiek en -factoren

Deze bijlage bevat enkele resultaten van de afgeronde kalibratie van de Maas (bijlage A.1; de Jong, 2020) en van de lopende kalibratie van de Overijsselse Vecht (bijlage A.2).

## A.1 Maas

De algemene methodiek van de kalibratie wordt samengevat in onderstaande tabel. De kalibratie is initieel uitgevoerd van laag (L) tot hoog (H2). Vervolgens zijn in verschillende iteraties alle niveaus nog doorlopen.

Belangrijke toevoeging hierop is een correctie die nodig bleek bij de kalibratie op H2 (1995). Doordat gebruik van uitgevoerde kalibraties L tot H1 de aanloop van de afvoergolf sterk verslechterde, is besloten deze informatie niet mee te nemen. In plaats daarvan is een tijdelijk niveau H1<sub>95</sub> gebruikt om de aanloop van de golf te kalibreren. Dit niveau wordt alleen in 1995 en 1993 gebruikt.

Tabel 4.1 Keuze kalibratie- en validatieperioden. K = kalibratie, V = validatie. Een (V) geeft aan dat deze afvoer wel voor komt in de genoemde periode, maar niet gebruikt is voor validatie (De Jong, 2020)

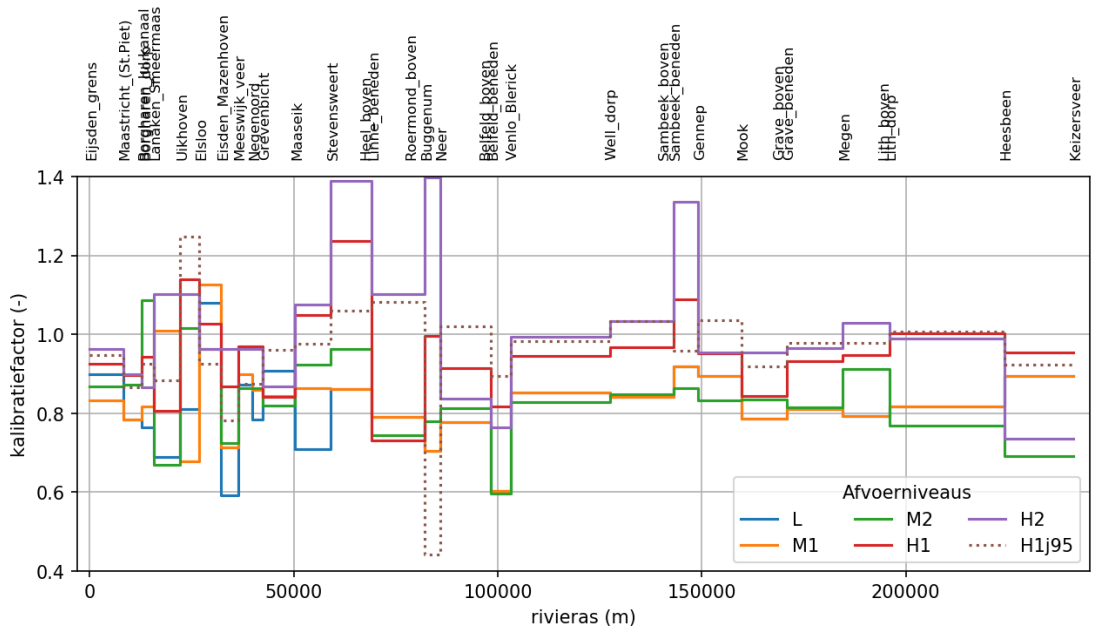
Randvoorwaarden	Afvoerniveaus in de kalibratiefactor									
	Laag (L) 100 m <sup>3</sup> /s		Midden1 (M1) 800 m <sup>3</sup> /s		Midden2 (M2) 1700 m <sup>3</sup> /s		Hoog1 (H1) 2300 m <sup>3</sup> /s		Hoog2 (H2) 2700 m <sup>3</sup> /s	
01-11-1993 – 31-01-1994		(V)		(V)		(V)		(V)		V
01-12-1994 – 28-02-1995		(V)		(V)		V		V	K	
01-11-2010 – 31-01-2011		(V)		(V)	K		K			
01-07-2014 – 30-06-2015	K	V	K	V						

De resulterende kalibratiefactoren zijn weergegeven in Figuur A.1 en Figuur A.2. Ten opzichte van de figuren in de kalibratierapportage (De Jong, 2020) is aan deze figuren het tijdelijke niveau H1<sub>95</sub> toegevoegd.

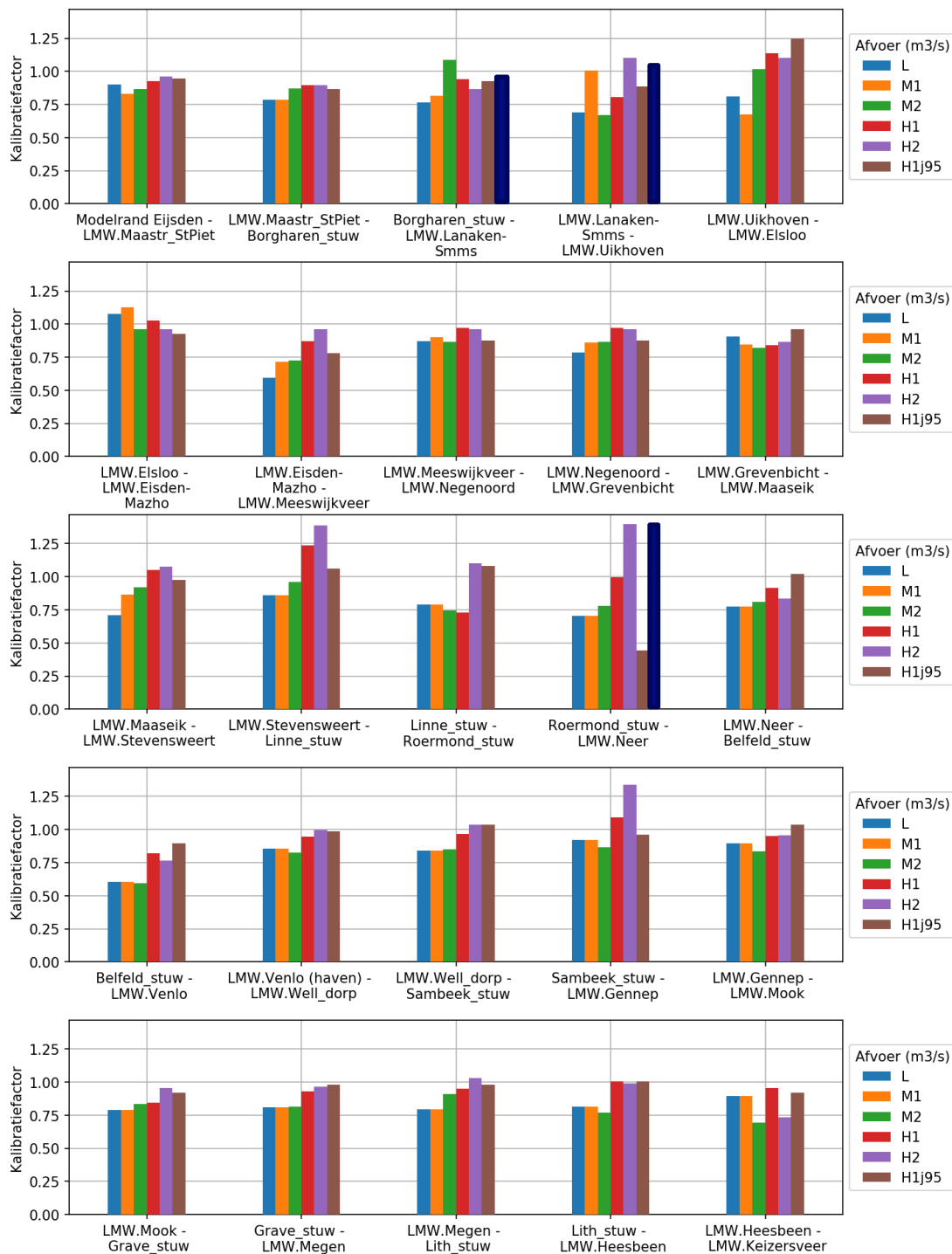
Op basis van de figuren zien we het volgende:

- H2 is vrijwel altijd hoger dan H1;
- H1 is vrijwel altijd hoger dan M2;
- M2 en M1 hebben vaak ongeveer dezelfde waarde.

H1<sub>95</sub> kan niet direct met H1 worden vergeleken. Doordat in de kalibratie op 1995 de niveaus L, M1, M2 en H1 zijn vervangen door het ene niveau H1<sub>95</sub>, is dit niveau feitelijk ook een vervanging van al deze lageregelegen niveaus. Vanwege de afvoeren in de kalibratieperiode geldt dit echter vooral voor M2 en H1. H1<sub>95</sub> heeft ongeveer dezelfde hoogte als H1 (al is het vooral hoger op de Zandmaas), maar is consistent hoger dan M2.



Figuur A.1 Kalibratiefactoren van het G6 Maas-model (De Jong, 2020), aangevuld met het niveau H1j95



Figuur A.2 Kalibratiefactoren per traject

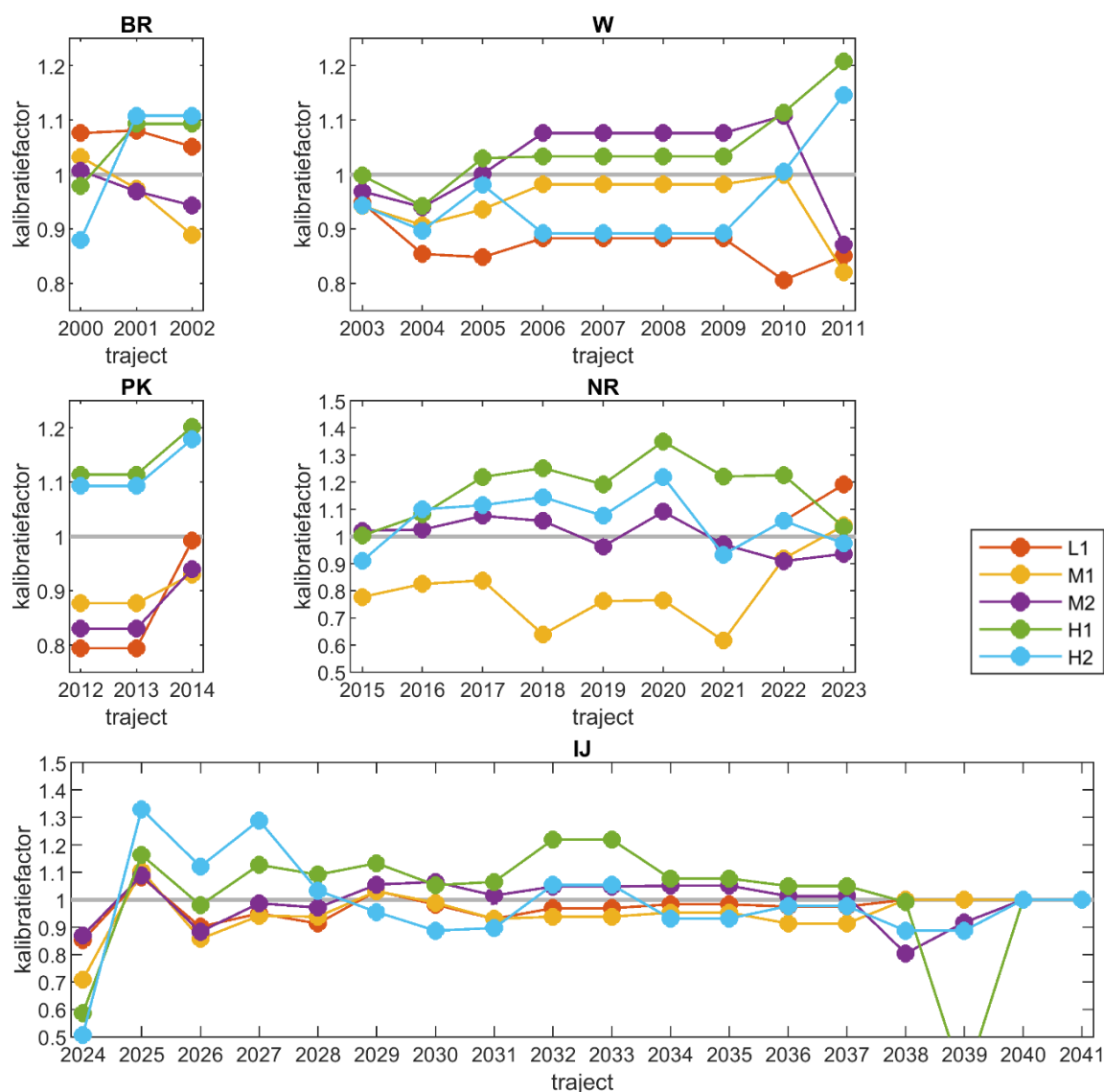
## A.2 Rijntakken

De kalibratieperioden en afvoeren van de Rijn zijn gegeven in Tabel A.1. De resultaten van de kalibratie (nog in concept) zijn weergegeven in Figuur A.3. Op basis hiervan zien we hoofdlijnen de volgende (gemiddelde) trends in stijgingen en dalingen tussen kalibratieniveaus. Deze interpretatie is opgesplitst per riviertak vanwege de grote verschillen tussen de resultaten per riviertak.

Trend in kalibratiefactoren	BR	W	PK	NR	IJ
M1 t.o.v. L	-	+	+	n.v.t.	0
M2 t.o.v. M1	-	+	-	++	+
H1 t.o.v. M2	+	-	++	+	+
H2 t.o.v. H1	+/-	-	-	-	-

Tabel A.1 Gebruikte kalibratieperioden. De afvoeren verwijzen naar de afvoer bij Lobith.

	Afvoer	Kalibratie
Laag (L)	1.000	jan 2017/ okt 2016 - jan 2017
Midden 1 (M1)	2.000	feb – mrt 2017
Midden 2 (M2)	4.000	jan 2016 / mrt 2017
Hoog 1 (H1)	8.000	jan 2011
Hoog 2 (H2)	11.800	jan - feb 1995



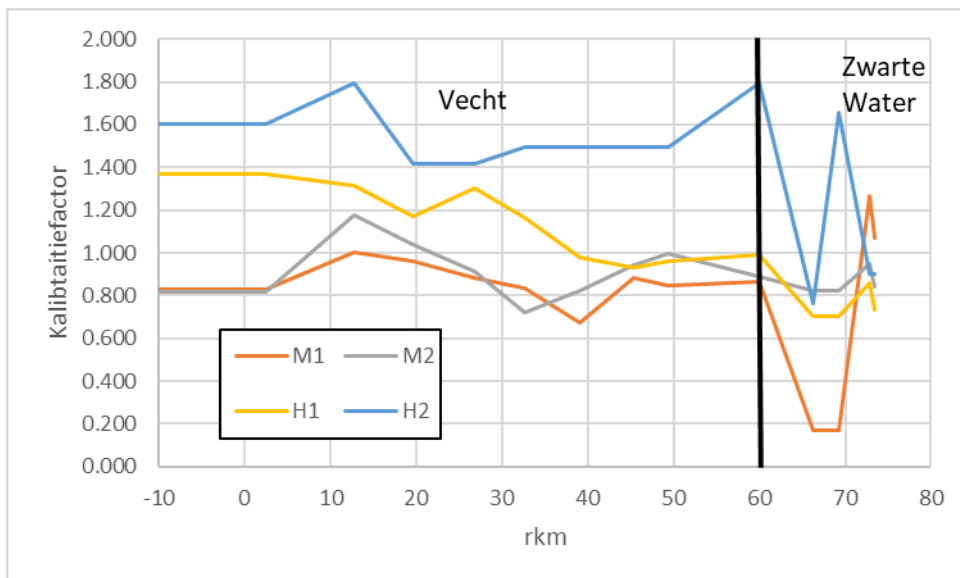
Figuur A.3 Kalibratiefactoren langs de Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn Lek en IJssel.

### A.3 Overijsselse Vecht

Gebruik maken van de beschikbare metingen van de hoogste gemeten afvoer. Is vooral voor de Vecht een issue: 220 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen (H1: 2017) vs ca. 400 m<sup>3</sup>/s bij Dalfsen (H2: 1998).

Ook op bovenstroomse deel van de Vecht grote verschillen tussen H1 en M2, terwijl dezelfde schematisatie (j19) is gebruikt en er maar een jaar tussen zit. Ook hier liggen M1 en M2 veel dicht bij elkaar. Zie Figuur A.4.

De kalibratiefactoren van niveau H2 (1.4 en hoger) liggen veel hoger dan de factoren die gevonden zijn bij de Rijn en Maas.



Figuur A.4 Tussenresultaten kalibratiefactoren van het G6 OVD-model. M1: maart 2018, M2: feb 2019, H1: jan 2018, H2: okt 1998.

## B Validatieresultaten

In deze bijlage worden diverse validatieresultaten gedeeld. In Bijlage B.1 is een beknopte literatuurstudie gegeven van validatieresultaten van Maas en Rijn uit de vijfde generatie in WAQUA. In Bijlage B.2 zijn resultaten van de validatie van de Maas gegeven voor de zesde generatie.

### B.1 Vijfde-generatie WAQUA

Diverse validaties van de vijfde generatie WAQUA-modellen zijn nageslagen om te controleren of hier vergelijkbare trends in zijn te traceren. In deze generatie zijn diverse herkalibraties uitgevoerd die in deze overwegingen dienen worden meegenomen. Merk op dat er een behoorlijke mate van generalisatie wordt gedaan en dat resultaten per station kunnen verschillen. Over het algemeen blijkt echter dezelfde trend als we nu ook in D-HYDRO zien: de actuelere modellen geven te hoge waterstanden.

#### Maas:

- Becker (2012a): Kalibratie van Laag (200 m<sup>3</sup>/s; HW2003), Midden (1450 m<sup>3</sup>/s; HW2003), Hoog (2700 m<sup>3</sup>/s; HW1995)
- De Jong (2014c): Validatie op HW2011 geeft doorgaans een positieve bias. Zowel bij de aanloop naar de afvoergolf (eind december 2010) als bij de piek van de afvoergolf (januari 2011).
- De Jong (2015): *herkalibratie t.b.v. trendbreuk ecotopenkartering (kalibratie op modelresultaat)*
- De Jong (2016b): Nieuwe kalibratie van Extreem Laag (25 m<sup>3</sup>/s; 2015), Laag (150 m<sup>3</sup>/s; 2014), Midden (1450; HW2011)
- De Jong (2016d): Het model met de oude kalibratie (De Jong, 2015) geeft een grote positieve bias. De nieuwe kalibratie geeft bij de lage afvoeren (tot 500 m<sup>3</sup>/s) een veel kleinere bias, maar bij hoge afvoeren (1000 m<sup>3</sup>/s) een kleinere, maar wel negatieve bias
- Van der Veen & Agtersloot (2019). Onofficiële evaluatie van HW2019 (1600 m<sup>3</sup>/s). Bij veel stations zijn de waterstanden tijdens de hogere afvoeren 1 à 2 dm te hoog.
- Van der Veen & Agtersloot (2020). Onofficiële evaluatie van HW2020 (1700 m<sup>3</sup>/s). Bij veel stations zijn de waterstanden te hoog.

#### Rijntakken:

- Becker (2012b): Kalibratie van Laag (2700 m<sup>3</sup>/s; HW1995), Midden (4400 m<sup>3</sup>/s; HW1995), Hoog (12000 m<sup>3</sup>/s; HW1995)
- De Jong (2014a): Validatie op HW2011 (ca. 8000 m<sup>3</sup>/s) geeft op de Waal een negatieve bias, op het Pannerdensch Kanaal een positieve bias, Boven-IJssel een positieve bias en op de Beneden-IJssel en Neder-Rijn Lek, negatief. Afvoerverdeling is erg belangrijk.
- Spruyt (2015): *herkalibratie t.b.v. trendbreuk ecotopenkartering (kalibratie op modelresultaat)*
- Visser (2017): Validatie op LW2011 (ca. 1000 m<sup>3</sup>/s) geeft over het algemeen een te hoge bias. WAQUA model is echter niet gekalibreerd voor dit lage niveau.
- Van der Veen & Agtersloot (2018a). Onofficiële evaluatie van eerste deel hoogwatergolf HW2018 (ca. 7500 m<sup>3</sup>/s). Boven-Rijn te hoog, Waal te laag, PK te hoog, NR-Lek te laag, Boven-IJssel te hoog, Beneden-IJssel te laag.
- Van der Veen & Agtersloot (2018b). Onofficiële evaluatie van tweede deel hoogwatergolf HW2018 (ca. 7000 m<sup>3</sup>/s). Zelfde beeld als bij eerste golf.

## Referenties G5

- Becker, A. (2012a): Maas-modellen 5de generatie - Modelopzet, kalibratie en verificatie. Deltares, 1204280-000-ZWS-0011 & 1204280-000-ZWS-0032 - bijlagen, november 2012
- Becker, A. (2012b): Rijn-modellen 5de generatie - Modelopzet, kalibratie en verificatie. Deltares, 1205994-000-ZWS-0007 & 1205994-000-ZWS-0012 - bijlagen, november 2012.
- Jong, J.S. de (2014a): Verificatie hoogwater 2011 Rijntakken - 5de generatie WAQUA en SOBEK. Deltares-rapport 1209449-003-ZWS-0009.
- Jong, J.S. de (2014c): Verificatie hoogwater 2011 Maas - 5de generatie WAQUA en SOBEK. Deltares-rapport 1209449-002-ZWS-0019-v2.
- Jong, J.S. de (2015): Nieuwe ecotopenkartering Maas: Kalibratie en verschilanalyse. Deltares rapport 1220072-002-ZWS-0027.
- De Jong, J.S. (2016b): Herkalibratie 5de generatie WAQUA Maas. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0008
- De Jong, J.S. (2016d): Verificatie modellen Maas Jaarsom 2014. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0019
- Spruyt (2015) Nieuwe ecotopenkartering Rijntakken. Kalibratie en verschilanalyse. Deltares rapport 1220072-003-ZWS-0035
- Van der Veen & Agtersloot (2018a). E-mail: test actueel model Rijntakken d.d. 23-1-2018
- Van der Veen & Agtersloot (2018b). E-mail: Metingen en berekeningen hoogwater Rijn, simulatie R2018\_02 d.d. 1-2-2018
- Van der Veen & Agtersloot (2019). E-mail: Hindcast hoogwater 2019\_03, d.d. 25-3-2019
- Van der Veen & Agtersloot (2020). E-mail: hoogwater Maas d.d. 10-2-2020
- Visser, T (2017): Validatie laagwaterperiode (WAQUA + SOBEK3) Rijntakken. Deltares memo 11200569-004-ZWS-0031

## B.2 Maas

Deze bijlage bevat diverse resultaten van de kalibratie. Opgemerkt wordt dat hier altijd model resultaten worden gegeven met ofwel het ongekalibreerde model, ofwel het model met de definitieve kalibratie. Geen van de onderstaande modelresultaten gebruikt het tijdelijke niveau H1<sub>95</sub> (zie sectie A.1). Sommige van deze figuren zijn nieuwe gemaakt op basis van de simulatieresultaten uit De Jong (2020), anderen komen rechtstreeks uit de daarbij behorende rapportage.

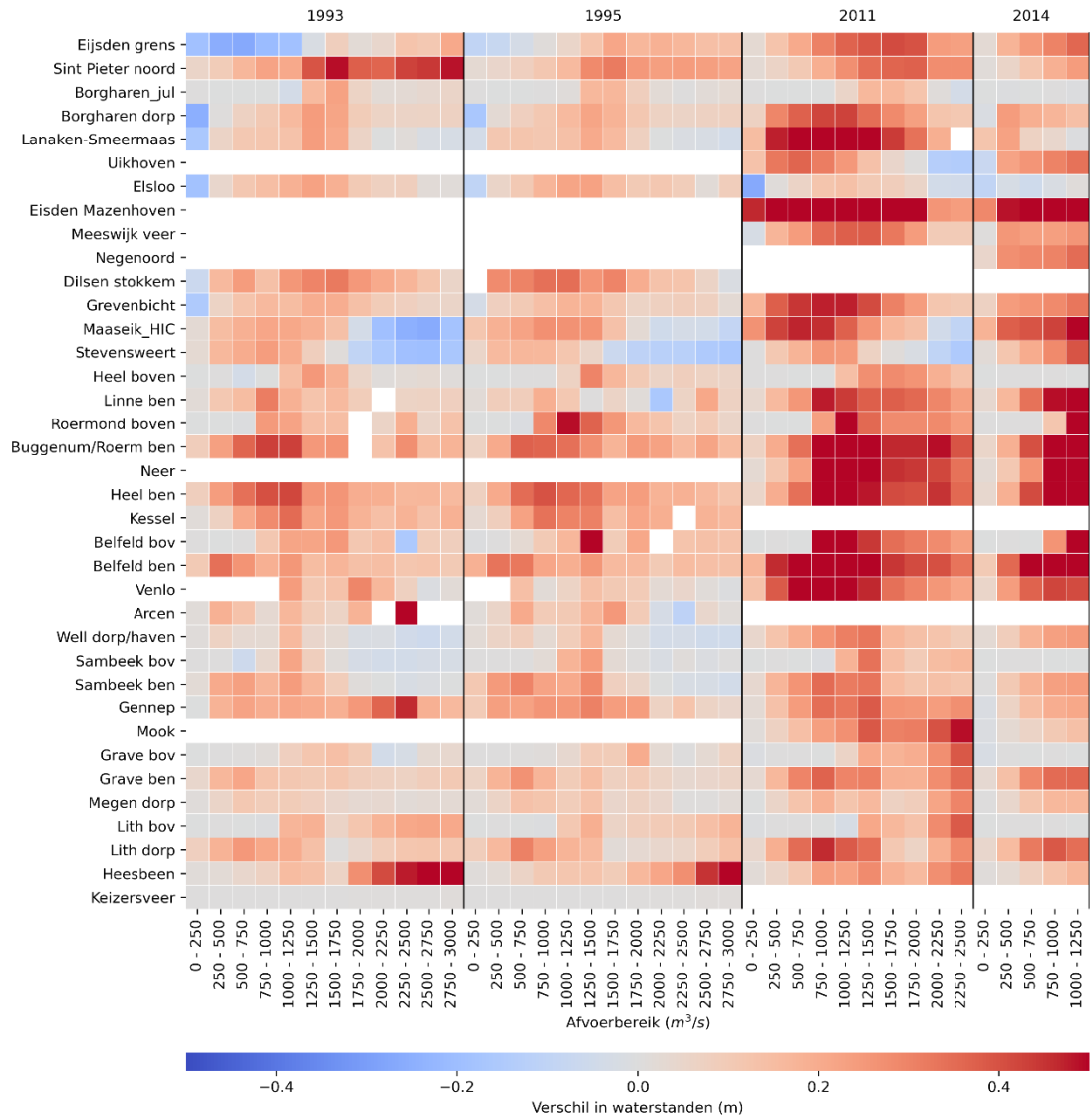
Figuur B.1 en Figuur B.2 geven de resultaten voor en na kalibratie per station. Figuur B.3 geeft een samenvatting van beiden als functie van afvoer, en Figuur B.4 als functie van de (model)jaren.

Uit Figuur B.2 en Figuur B.4 blijkt dat bij gelijke afvoer de bias in waterstanden klein kan zijn in recente jaren (hierop zijn ze gekalibreerd) maar veel groter in de meer-historische jaren. Deze bias heeft een duidelijk uitslag richting negatieve waarden. Voorbeelden:

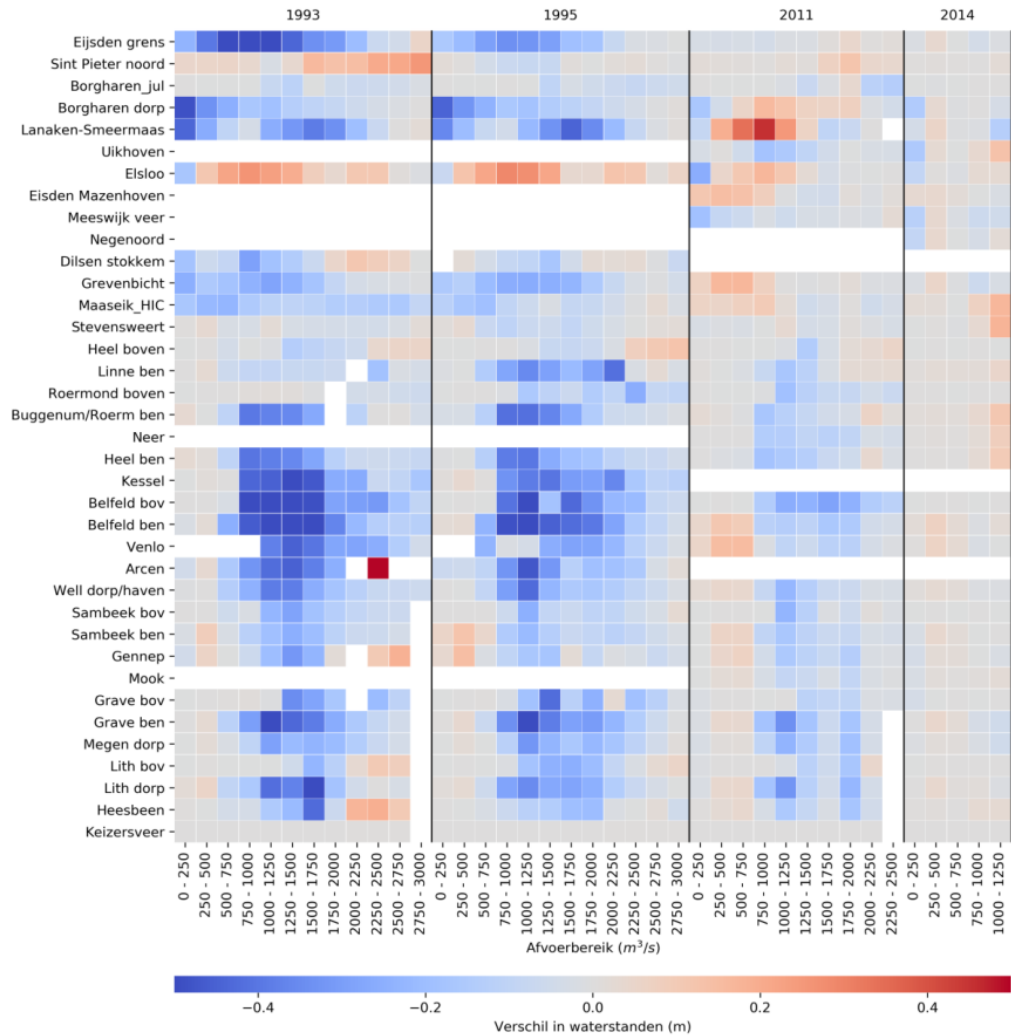
- de kalibratie op M1 (800 m<sup>3</sup>/s) geeft in kalibratieperiode 2014 een goed resultaat. In 2011 is er bij deze afvoer een hele kleine negatieve bias; in 1993/1995 een grotere negatieve bias. (Deze afvoeren komen voor in februari 1995; na de afvoergolf)
- de kalibratie op M2 (1700 m<sup>3</sup>/s) en H1 (2250 m<sup>3</sup>/s) geeft in kalibratie periode 2011 een kleine bias; in 1993/1995 is deze negatieve bias veel groter. (Deze afvoeren komen ongeveer overeen met de eerste piek (december 1995; 1400 m<sup>3</sup>/s) en het kleine eerste piekje van 23 februari 1995 (2000 m<sup>3</sup>/s) ).



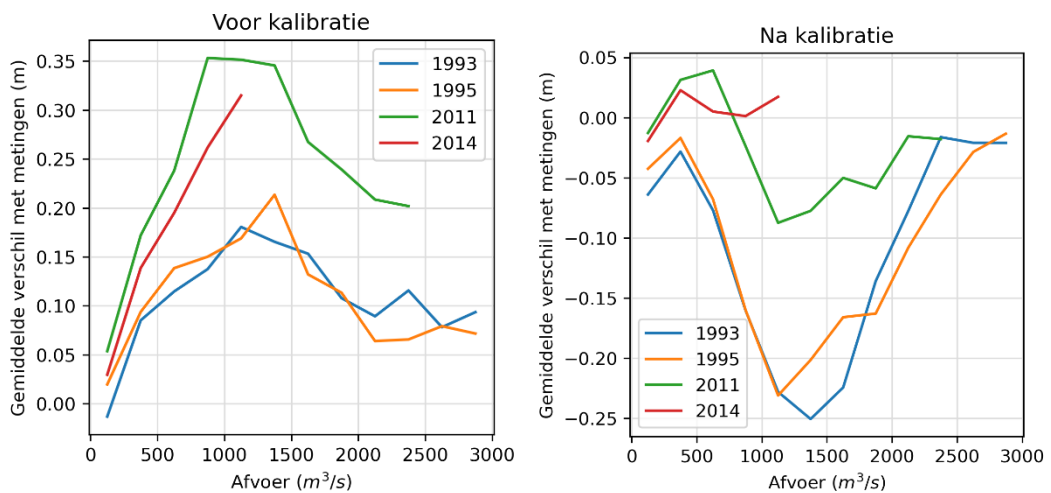
Uit Figuur B.1 en Figuur B.3 blijkt dat de fout in de modelresultaten sterk afhankelijk is van de afvoer. Het ongekalibreerde model presteert beter bij de extreme afvoeren, maar heeft in het net-ongestuwde bereik (rond 1500 m<sup>3</sup>/s) een grote positieve bias.



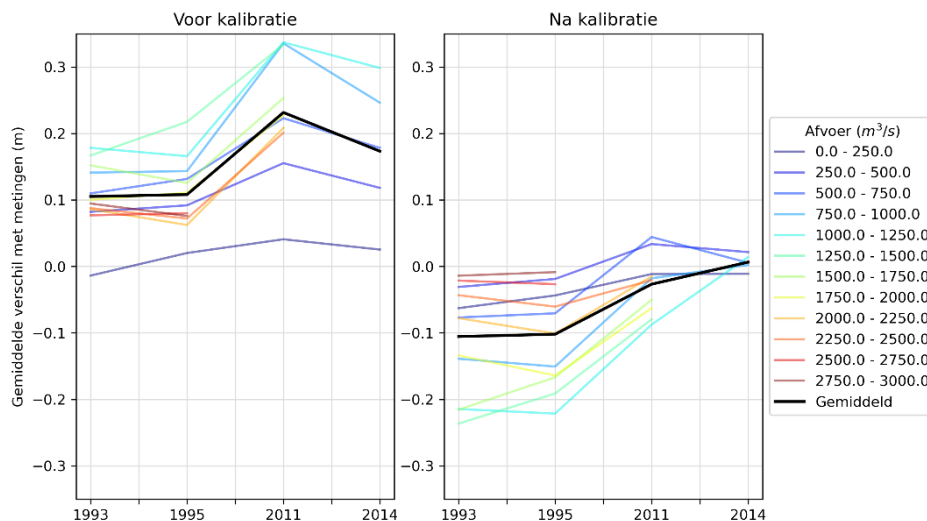
Figuur B.1 Bias in waterstanden tot metingen in het ongekalibreerde model



Figuur B.2 Bias in waterstanden tot metingen in het gekalibreerde model (Bijlage I.5.2 van De Jong, 2020). Afvoeren L en M1 (100 en 800 m<sup>3</sup>/s) zijn gekalibreerd op 2014-2015, M2 en H1 (1700 en 2300 m<sup>3</sup>/s) op 2010-2011 en H2 (2700 m<sup>3</sup>/s) op 1995.



Figuur B.3 Gemiddelde verschil met metingen als functie van de afvoer; voor (links) en na (rechts) kalibratie. Doordat veel stations gestuurd zijn, is er een kleine fout bij kleine afvoeren. Voor het beoordelen van de trend in waterstandsfout kan het best gekeken worden naar afvoeren van 1500 m<sup>3</sup>/s en hoger.



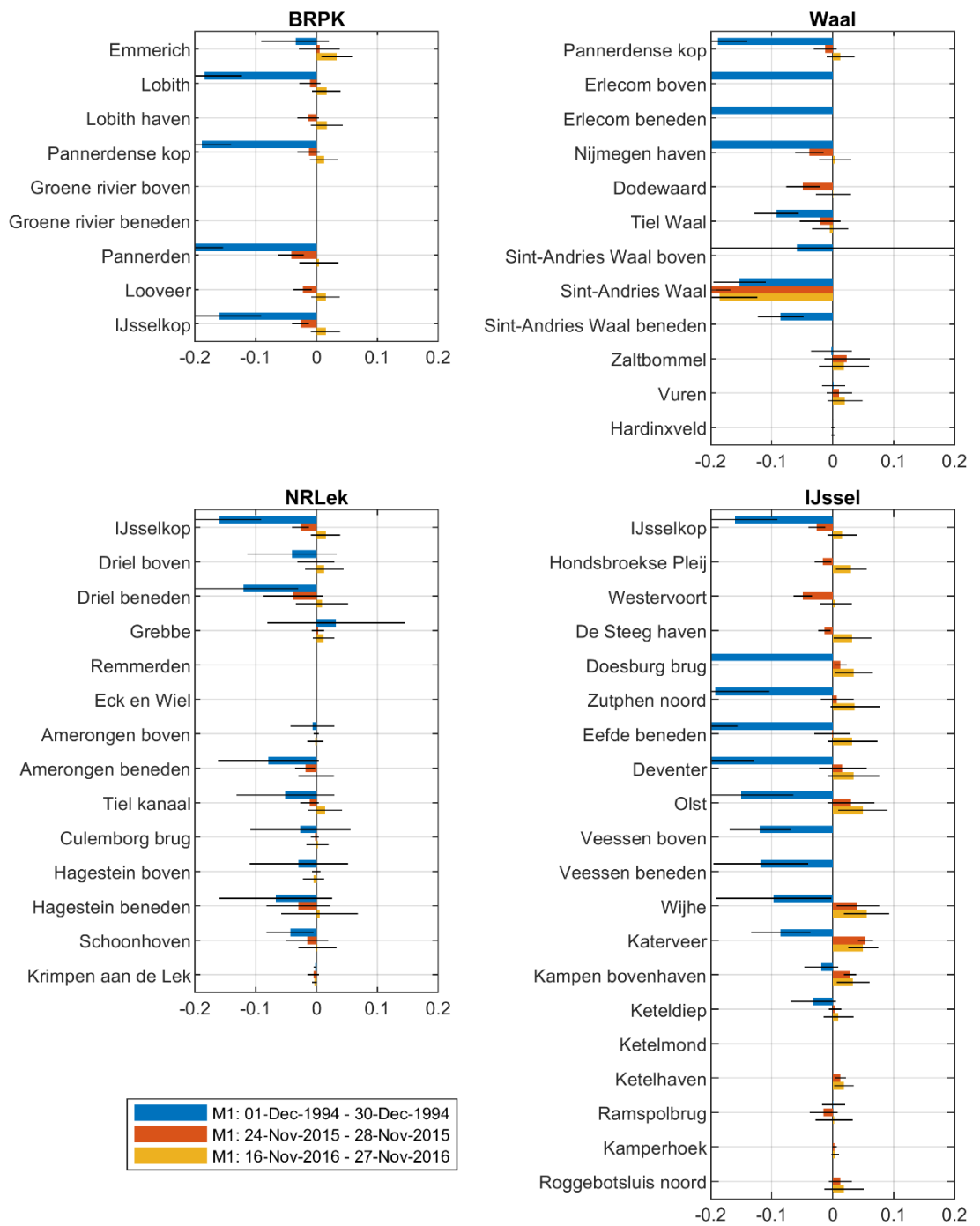
Figuur B.4 Gemiddelde verschil met metingen als functie van de jaren; voor (links) en na (rechts) kalibratie

### B.3 Rijntakken

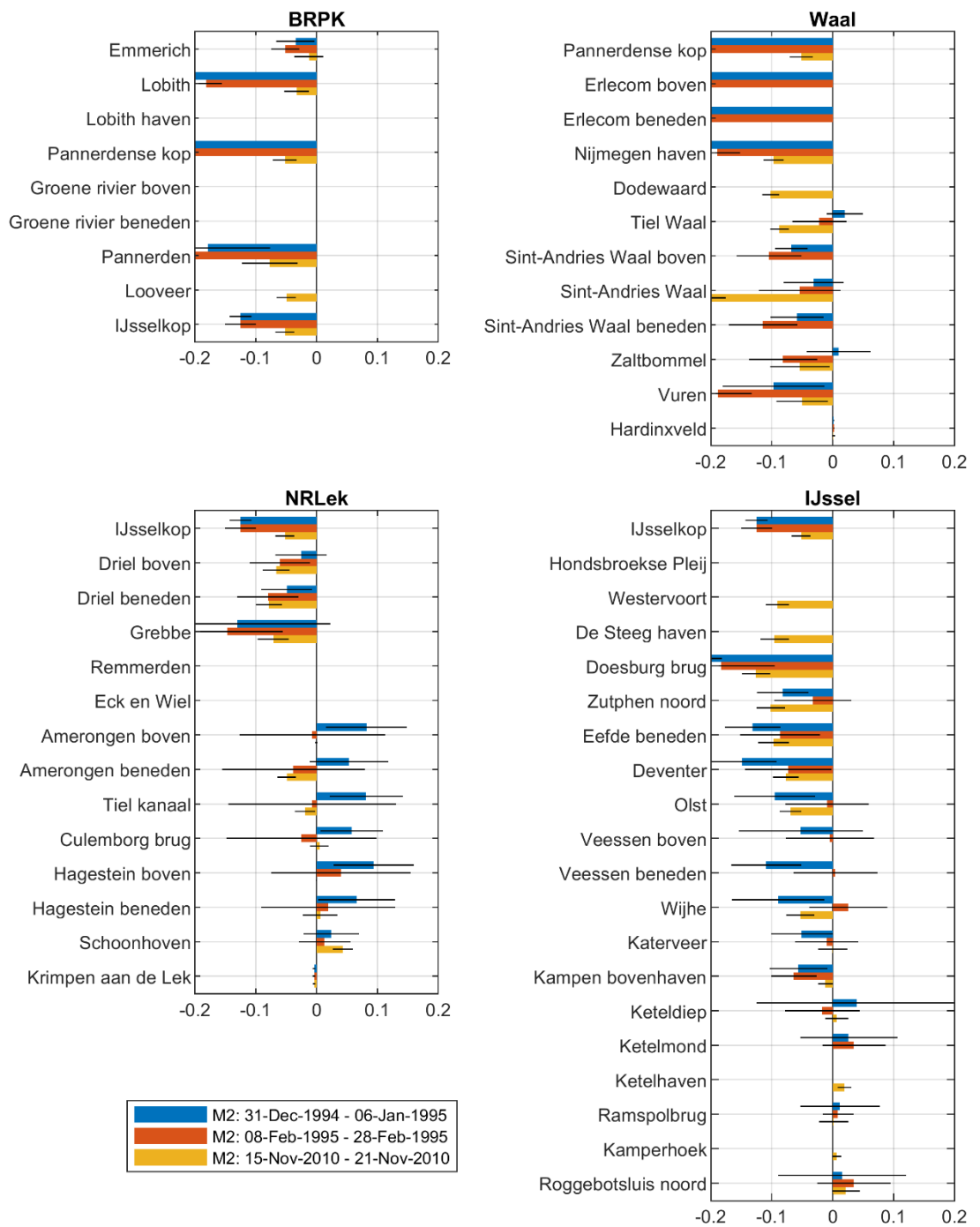
Hieronder volgen enkele concept validatieresultaten van de Rijntakken. De validatie is nog lopende en de resultaten zijn nog niet gerapporteerd en niet gereviseerd. In de context van dit rapport worden de resultaten enkel gebruikt om de trends te bespreken.

Op basis van de figuren blijkt het volgende:

- Op alle riviertakken is bij afvoer M1 (2000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith) een negatieve bias van enkele decimeters in 1994, terwijl in 2015 en 2016 de fout bescheiden blijft tot +/- enkele centimeters. Deze jaren zitten dichtbij de kalibratieperiode (2017).
- Bij vrijwel alle stations en alle jaren is er bij afvoer M2 (4000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith) een negatieve bias. Deze bias is het grootst in 1994 en 1995. In 2010 is de fout op de IJssel en Nederrijn vrijwel gelijk, maar is op de Waal de fout een stuk kleiner. De kalibratie is uitgevoerd op 2016/2017.



Figuur B.5 Concept validatieresultaten M1 (d.d. 28 april 2021)



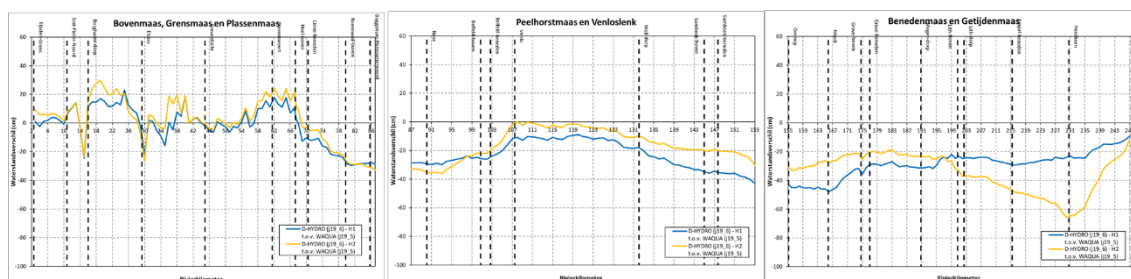
Figuur B.6 Concept validatieresultaten M2 (d.d. 28 april 2021)

## C Effect kalibratiefactoren op waterstand bij MHW

In Van der Deijl & De Jong (2021) is onderzoek gedaan naar het verschil in extrapolatie naar extreme afvoeren (afvoergolf 4000 m<sup>3</sup>/s) van de kalibratieniveaus H1 en H2. De simulaties zijn afgezet tegen de waterstanden bij een vergelijkbare afvoergolf in WAQUA (net andere randvoorwaarden).

Uit de analyse blijkt:

- De verschillen op de Grensmaas (bovenstrooms rkm 70) zijn beperkt en verwaarloosbaar gezien de gevoeligheid voor veel grotere variatie op de Grensmaas.
- Op de Zandmaas (benedenstrooms rkm 70) zijn de waterstanden in D-HYDRO lager dan WAQUA.
  - De simulatie bij extrapolatie o.b.v. H1 geeft lagere waterstanden dan bij extrapolatie o.b.v. H2.
  - De uitzondering hierop is het traject rondom Heesbeen. De kalibratiefactor H2 is hier veel lager dan H1. Dit is handmatig gecorrigeerd in het WAQUA-model (Becker, 2012). Mogelijk heeft relatie tot de vergladding van het zomerbed zoals geconcludeerd door Adriaanse (1986).<sup>5 6</sup>



Figuur: Van der Deijl & De Jong (2021) van j19\_6 t.o.v. j19\_5

<sup>5</sup> Op basis van uitgebreide metingen tijdens het hoogwater van 1984, afvoer rond 2500 m<sup>3</sup>/s, is geconstateerd dat er wellicht een overgang is naar een vlakker bed met veel minder duinen. En als gevolg daarvan een veel lagere ruwheid.

<sup>6</sup> Tijdens het overleg op 26 augustus is in gezamenlijk overleg besloten deze kalibratiefactor handmatig te corrigeren naar de kalibratiewaarde van het traject Lith-Heesbeen. Deze aanpassing wordt bijgewerkt in een nieuwe versie van De Jong (2020).

## D Discussie kalibratiemethodiek

Gedurende de discussie omtrent de keuzes in kalibratiefactoren is ook nagedacht over de mogelijke oorzaken van de ontbrekende afvoerafhankelijkheid in de kalibratiefactor, en van het ontstaan consistente fout bij toetsing van de stationariteit. Deze passage bevat een aantal losstaande onderzoeken en discussies.

- In bijlage D.1 enkele gedachten/hypotheses wat er theoretisch verwacht wordt van de nauwkeurigheid van een zomerbedkalibratie als na uitvoering van de kalibratie rivierkundige maatregelen worden gerealiseerd.
- In bijlage D.2 wordt een hypothese beschreven waarin wordt gesteld dat de geconstateerde trends in extrapolatie en stationariteit beiden afkomstig zijn van ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed.
- In bijlage D.3 wordt op basis van een analytisch model enkele conclusies getrokken op de keuzes zoals deze nu in het model zijn gemaakt.

In ieder van deze passages is het belangrijk te realiseren dat de kalibratie in de modellen correcties doet voor verschillende onnauwkeurigheden en onbekenden in de modellering. Op de eerste plaats zijn er onnauwkeurigheden in de geometrie: numerieke weerstand (door stroming diagonaal door een curvilineair rooster), door fouten in de baselineschematisatie, en door fouten in de discretisatie. In de tweede plaats zijn er ook onnauwkeurigheden in fysische beschrijving van de werkelijkheid, zoals de zomerbedruwheid, de winterbedruwheid, de stroming over kades en kribben (overlaatformulering), etc.

In discussies wordt vaak aangenomen dat van deze lijst aan onbekenden de bijdragen van de onbekende (en afvoerafhankelijke) zomerbedruwheid centraal staat. Een mogelijke verklaring hiervan is dat bij laag water alle afvoer en bij hoog water vaak het grootste deel van de afvoer door het zomerbed stroomt, en in het zomerbed maar één belangrijke parameter is waarmee gekalibreerd kan worden, namelijk de bodemruwheid. Een kwantitatieve vergelijking van de verschillende onbekenden en onnauwkeurigheden bij hoge afvoer is onbekend en zal bovendien variabel zijn over de rivier.

### D.1 Theoretische verwachting van maatregelen op stationariteit

In Spruyt (2018) is ingegaan op het effect van maatregelen bij het vasthouden van de huidige breedte van de kalibratiepolygoon (optie 3 van de memo). Bij een kalibratiefactor lager dan 1 (vrijwel overal in het Maas-model, zie Bijlage B.2) resulteert dit in (dit gaat uit van kalibratie van enkel zomerbedruwheid, en een gelijke bodemruwheid in de zomerbedverbreding):

- Zomerbedverbreding resulteert in te hoge gemodelleerde waterstanden
- Zomerbedversmalling resulteert in te lage gemodelleerde waterstanden

Daarnaast valt ook na te denken over wat we zouden verwachten wat er met de kalibratiefactor zou gebeuren bij maatregelen. Als we aannemen dat de kalibratiefactor grotendeels gebaseerd is op de onnauwkeurigheid in de formulering van de zomerbedruwheid, dan zou dit het volgende betekenen:

- Winterbedvergraving → minder afvoer door zomerbed → kleinere waterdiepte → lagere duinen → *lagere weerstand?*
- Zomerbedverbreding → minder afvoer door gekalibreerde zomerbed (de verbreding is ongekalibreerd) → lagere waterdiepte → lagere duinen → *lagere weerstand?*

- Zomerbedverdieping → meer afvoer door zomerbed → veel dieper dan evenwichtsdiepte dus lagere stroomsnelheid → *lagere weerstand?*

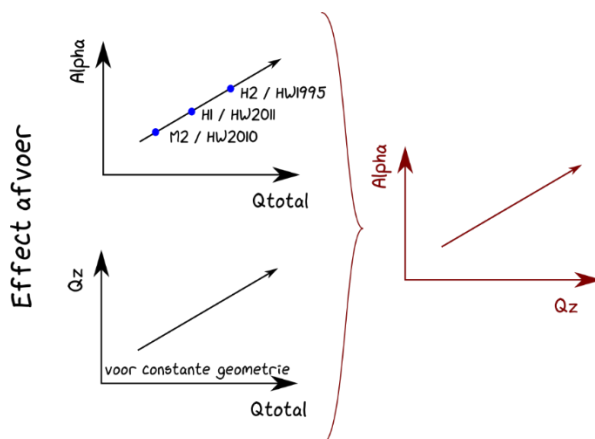
## D.2 Hypothese ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed

Op basis van de geobserveerde trends in kalibratiefactoren (bijlage A.2) is de hypothese ontstaan dat zowel de trend in extrapolatie (afvoerafhankelijkheid) als trend in stationariteit (over de jaren) veroorzaakt worden door een ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed.

In Figuur D.1 is geschetst dat gevonden is dat de kalibratiefactor toeneemt bij toenemende rivierafvoer. Bij toenemende rivierafvoer neemt (logischerwijs) ook de zomerbedafvoer toe. Dit resulteert in een toenemende kalibratiefactor bij toenemende zomerbedafvoer.

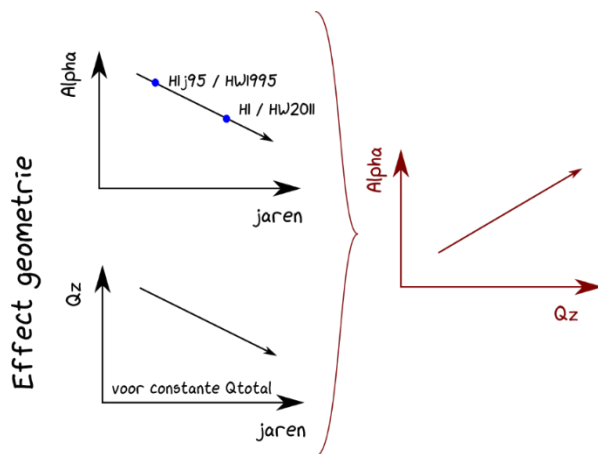
In Figuur D.2 is geschetst dat gevonden is dat de kalibratiefactor afneemt over de jaren. Tegelijkertijd wordt verwacht dat door rivierversuiming de afvoer door het winterbed over de jaren toe neemt, en hierdoor de afvoer door het gekalibreerde zomerbed afneemt. Ook dit resulteert in de trend van een toenemende kalibratiefactor bij toenemende zomerbedafvoer. Om deze hypothese verder te onderbouwen wordt aanbevolen om de trend in zomerbedafvoer te onderzoeken op basis van zowel ADCP-metingen en modelresultaten.

Uitgaande van de eerder genoemde hypothese kan de benodigde alpha-waarde bepaald worden als functie van de zomerbedafvoer zoals verwacht bij BOI-condities. Dit is geschetst in Figuur D.3. Uiteraard is dit slechts een theoretische schets en is de werkelijkheid vermoedelijk niet zo'n duidelijke lineaire trend.

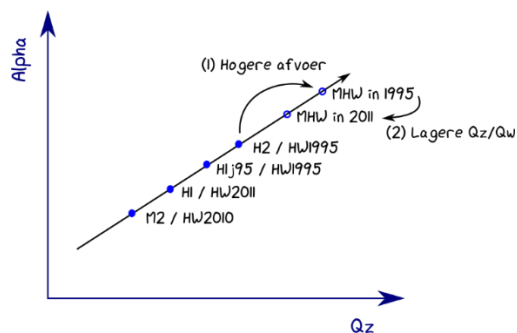


Figuur D.1 Gedachtenlijn dat een toenemende kalibratiefactor (alpha) bij toenemende afvoer kan worden toegeschreven aan een ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed.





Figuur D.2 Gedachtenlijn dat een afnemende kalibratiefactor (alpha) over de jaren kan worden toegeschreven aan een toename in afname in afvoer door het zomerbed, en daardoor ook resulteert in een ontbrekende afvoerafhankelijkheid in het zomerbed.



Figuur D.3 Schets van de verwachte kalibratiefactor (alpha) die bij MHW-afvoeren toegepast zou moeten worden.

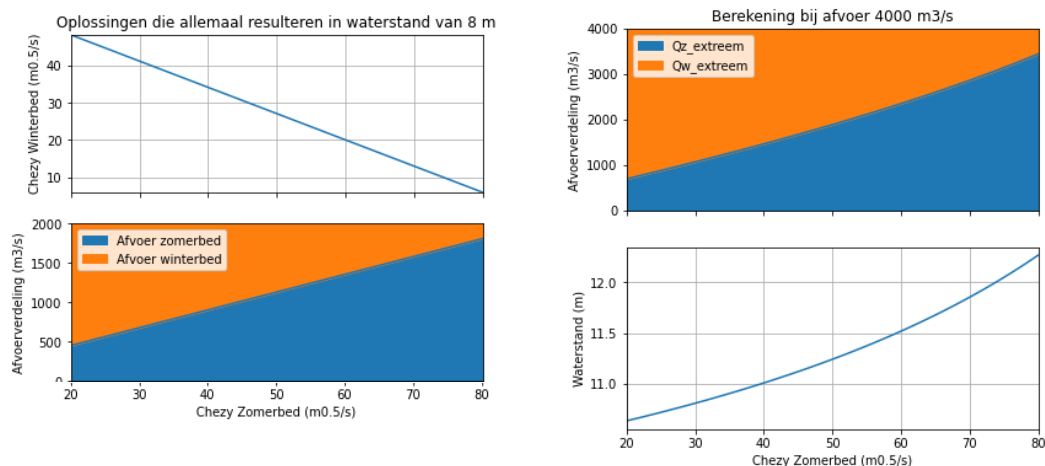
## D.3 Effect op extrapolatie door keuzes in schematisatie en kalibratie

### Effect kalibratiepolygon op de zomerbed-winterbed afvoerverdeling en het effect hiervan bij extrapolatie

We kalibreren enkel de ruwheid binnen de kleinste zomerbedbegrenzing (voor de Maas is dit de ligging in 1995). Een te lage of te hoge weerstand in het winterbed betekent dat bij hoge afvoeren dit volledig gecompenseerd wordt in de kalibratiefactor van het zomerbed. De ruwheid in het zomerbed wordt hierdoor relatief veel veranderd. Met name rivieren met een relatief breed (en afvoertrekkend) winterbed (Maas, IJssel, Overijsselse Vecht) zal een grote correctie gedaan worden door de kalibratiefactor. De afvoerverdeling zomerbed-winterbed wordt hierdoor beïnvloed.<sup>7</sup> Hierop wordt geen validatie uitgevoerd.

Uit de theoretische beschouwing (samengesteld profiel, ruwheidsformulering Chézy) van het effect van verschillende mogelijke oplossing in de zomerbed-winterbed-afvoerverdeling bleek het volgende (De Jong, 2021, zie Figuur D.4): een lagere zomerbedruwheid (en hoge winterbedruwheid), resulteert in een hogere afvoer door het zomerbed. Bij een extrapolatie naar extreme afvoeren zorgt dit voor een hogere waterstand dan de situatie met hoge zomerbedruwheid (en lage winterbedruwheid).

<sup>7</sup> Deze veronderstelling is nog niet getoetst met modelresultaten.

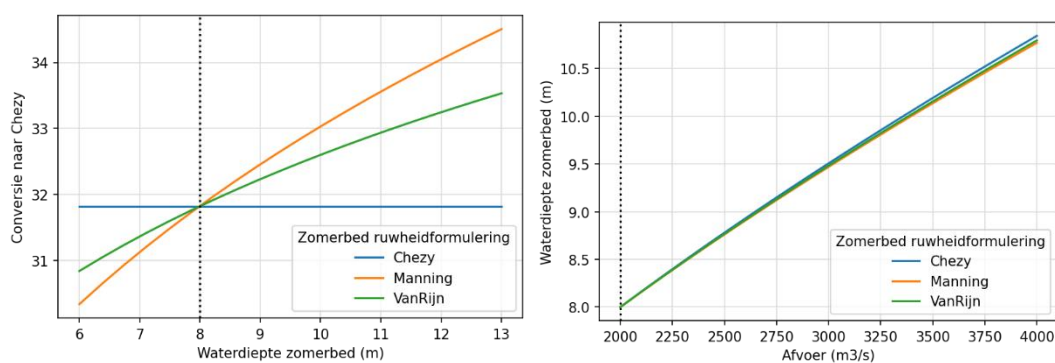


Figuur D.4 Links: verschillende combinaties tussen zomerbed- en winterbedafvoer die allemaal resulteren in een waterstand van 8 m bij een afvoer van 2000 m<sup>3</sup>/s (boven), ieder van deze oplossingen heeft een andere verhouding in afvoerverdeling (onder). Rechts: effect van ieder van deze combinaties als de afvoer verhoogd wordt naar 4000 m<sup>3</sup>/s in afvoerverdeling (boven) en waterstand (onder). De combinatie met een glad zomerbed en ruw winterbed resulteert in de hoogste waterstanden.

### Effect keuze ruwheidsformulering zomerbed

De keuze van de ruwheidsformulering in het zomerbed beïnvloedt de afvoerafhankelijkheid. In deze sectie wordt de gevoeligheid van deze keuze gekwantificeerd met een analytisch model.

Op basis van een analytisch model is het onderscheid tussen Chézy, Manning en VanRijn berekend en weergegeven in Figuur D.5. Chézy heeft de zwakste afvoerafhankelijkheid en Manning de sterkste afvoerafhankelijkheid. Hierdoor is de waterstandstoename bij Manning het minst in de extrapolatie. In dit analytische model is het verschil maximaal een decimeter.



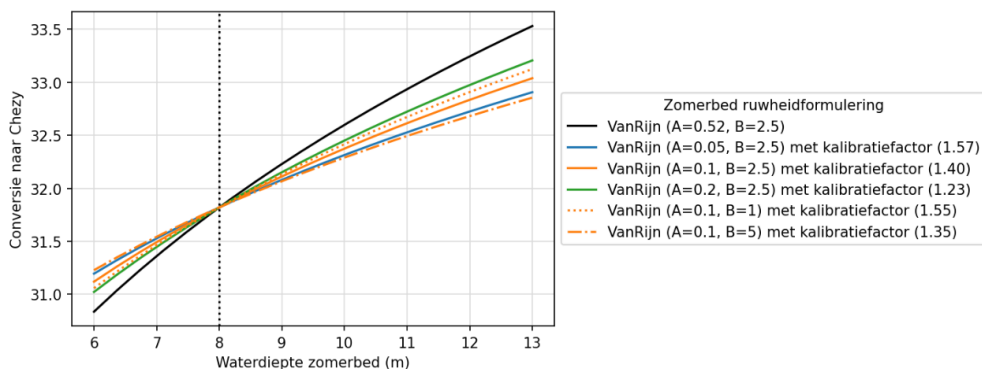
Figuur D.5 Vertaling van verschillende ruwheidsformuleringen naar Chézy (links) en het effect hiervan op de afvoerafhankelijkheid (rechts). De stippellijn markeert de condities waar het theoretische model op gekalibreerd is.

In WAQUA werd de kalibratie uitgevoerd op de alpha-coëfficiënt in de Van Rijn-formulering. In de D-HYDRO modellering wordt de achtergrondruwheid van het alluviale zomerbed (Zandmaas en Rijntakken) ook berekend met Van Rijn, de kalibratie wordt echter uitgevoerd nadat dit is geconverteerd naar Manning. Dit geeft een andere vervorming van de waterstandsafhankelijkheidskromme.

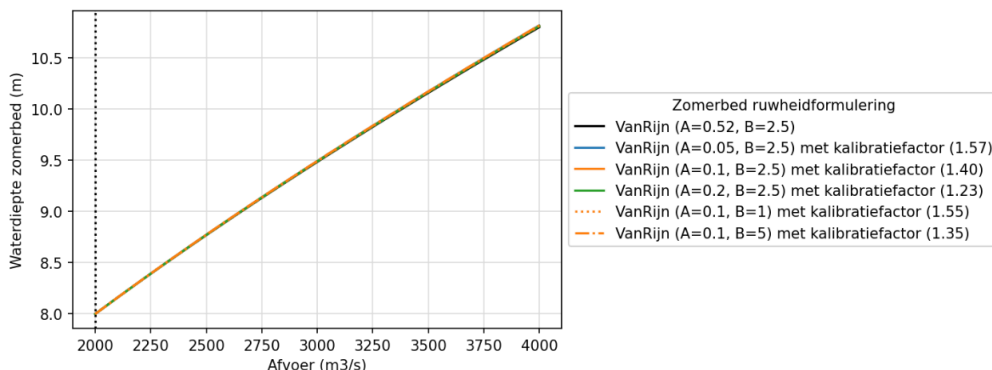
<i>Simplified van Rijn</i>	$k = Ah^{0.7} (1 - e^{-Bh^{-0.3}})$
<i>Nikuradse naar Manning-conversie</i>	$n = \frac{1}{18 \log\left(\frac{12h}{k}\right)} h^{\frac{1}{6}}$

In Figuur D.6 is het effect van de kalibratiemethodiek met als basis Van Rijn weergegeven. De zwarte lijn geeft het scenario waarbij de alpha-coëfficiënt wordt gekalibreerd. De overige lijnen geven een kalibratie op kalibratiefactor, waarbij de basisruwheid telkens verschilt. In het theoretische model is het effect hiervan op de waterstanden verwaarloosbaar, zie Figuur D.7

Uit deze resultaatne blijkt dat een hogere alpha-coëfficiënt, een lagere kalibratiefactor geeft, en dat dit resulteert in een hogere Chézy en daarmee lagere waterstanden.



Figuur D.6 Effect van de combinatie van de VanRijn-formule en een kalibratiefactor op de afvoerafhankelijkheid uitgedrukt in een waterdiepte-Chézy-relatie. De stippe lijn markeert de condities waar het theoretische model op gekalibreerd is.



Figuur D.7 Effect van de combinatie van de VanRijn-formule en een kalibratiefactor op de afvoerafhankelijkheid uitgedrukt in een afvoer-waterdiepte-relatie. De stippe lijn markeert de condities waar het theoretische model op gekalibreerd is.

Op basis van deze analytische berekeningen wordt geconcludeerd dat de mate van waterstandsafhankelijkheid grote verschillen kan geven in de omgerekende Chézy-waarde, maar dat het effect op de waterstanden maar beperkt is tot maximaal een decimeter. De huidige aanpak zit qua waterstandsafhankelijkheid in het midden van de onderzochte situaties. De mogelijkheid om de waterstanden te sturen met een aanpassing in de methode lijkt op basis van deze analyse, maar beperkt te zijn. Dit dient echter wel verder onderzocht te worden voor andere analytische geometrieën en uiteindelijk met een hydrodynamisch model zoals D-HYDRO.

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](http://www.deltares.nl)