

Verbetering kalibratie en validatie riviermodellen voor Rijkswaterstaat



Verbetering kalibratie en validatie riviermodellen voor Rijkswaterstaat

Auteur(s)

Anna Kusters

Verbetering kalibratie en validatie riviermodellen voor Rijkswaterstaat

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten
Referenties	
Trefwoorden	Kalibratie, validatie, Rijn, Maas, D-HYDRO

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	27-05-2024
Projectnummer	11209278-013
Document ID	11209278-013-ZKS-0008
Pagina's	36
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anna Kusters	

Samenvatting

Rijkswaterstaat en Deltares werken samen aan de ontwikkeling en het onderhoud van een uitgebreid modelinstrumentarium en daaraan gekoppelde modelschematisaties, o.a. voor de Rijn en de Maas. In de loop der tijd is het aantal toepassingen van het instrumentarium voor deze rivieren geleidelijk aan toegenomen. Om het aantal verschillende modellen beperkt te houden streeft RWS nog steeds naar de ontwikkeling van één gekalibreerd en gevalideerd model per gebied, dat voor alle toepassingen geschikt is. De kalibratie/validatiemethode is echter niet op deze toepassingen aangepast. Daarnaast is niet duidelijk wat de resulterende nauwkeurigheid van het gekalibreerde model is voor de verschillende toepassingen. Daarom is besloten om de kalibratie/validatiemethode nu, voor de start van de ontwikkeling van de zevende generatie riviermodellen, eens grondig onder de loep te nemen. Dit gebeurt op basis van literatuurstudie en opgedane ervaring met kalibratie/validatie in eerdere modelgeneraties.

Ten opzichte van de bestudeerde internationale case studies is de kalibratie/validatiemethode voor de RWS-riviermodellen zeer uitgebreid. In de uitgevoerde literatuurstudie zijn slechts enkele methoden gevonden die qua complexiteit vergelijkbaar zijn met de riviermodellen van de zesde generatie. Met het gebruik van op fysica gebaseerde basisruwheden en een afvoerafhankelijke kalibratie zijn de riviermodellen van de zesde generatie state-of-the-art te noemen. Toch kunnen op basis van de literatuurstudie enkele aanbevelingen worden gedaan voor de gebruikte kalibratie/validatiemethode. Deze moeten met verschillende experimenten getoetst en in meer detail uitgewerkt worden.

- De prestatie-eis tijdens kalibratie is zeer streng (5 mm per station per periode) en wordt gesteld over een vaak korte periode (uren tot dagen). Bij de validatie presteren de modellen beduidend slechter. Dit kan duiden op overfitting. Het is belangrijk een **goed onderbouwde prestatie-eis te formuleren voor de kalibratie**. Een minder strenge eis voor de kalibratie en het combineren van verschillende prestatie-indicatoren (zoals bias en RMSE) kan ervoor zorgen dat het model in andere simulaties, bijvoorbeeld de validatie, beter presteert. Daarnaast moet uitgezocht worden **hoeveel onbekenden in de kalibratie** (kalibratiepolygonen en afvoerniveaus) nodig zijn om het gewenste validatieresultaat te behalen.
- In de RWS-riviermodellen van de zesde generatie is alleen de zomerbedruwheid gekalibreerd. In de literatuurstudie zijn geen andere voorbeelden gevonden van methoden waarbij slechts een gedeelte van de stromende breedte wordt gekalibreerd. Het compenseren van fouten in de schematisatie van het winterbed met het aanpassen van de zomerbedruwheid beïnvloedt de afvoerdeling tussen zomer- en winterbed. Er zijn verschillende mogelijkheden om de **ruwheid van het winterbed te kalibreren**. De eerste, die de minste aanpassing behoeft aan de huidige kalibratiemethode, is het doortrekken van de bestaande kalibratiepolygonen naar het winterbed. Een tweede optie is het definiëren van aparte polygonen in het winterbed. Daarmee wordt het mogelijk om op de afvoerdeling zomerbed/winterbed te kalibreren (wanneer hiervoor metingen beschikbaar zijn). Ten derde kunnen ruwheidsklassen direct gekalibreerd worden. Hiervoor moeten de ruwheidsklassen in hoge mate geaggregeerd worden, maar het kan een betere stationariteit van modellen opleveren.

- Het kennen en expliciet benoemen van onzekerheden is van belang bij de interpretatie en het gebruik van modelresultaten, zeker als dit gebeurt in de context van wet- en regelgeving (zoals bij RWS-modellen het geval is). Het is daarom opvallend dat hier bij de ontwikkeling van de zesde-generatiemodellen weinig aandacht aan is besteed. Om meer inzicht te krijgen in het effect van verschillende invoerparameters op de modelresultaten wordt een **gevoeligheidsanalyse** aanbevolen als eerste stap. Daarnaast wordt aanbevolen een **roosterconvergentie-analyse** uit te voeren. Hiermee wordt het verband tussen roosterresolutie en modelnauwkeurigheid in beeld gebracht. Vervolgens wordt aanbevolen om de modelkalibratie/validatie zó uit te voeren, dat apart getest kan worden op **extrapolatie, stationariteit en de combinatie daarvan**.
- De huidige kalibratiemethode is gebaseerd op gegevens over waterstanden en afvoerdeling over de riviertakken. Dit levert goede resultaten op voor toepassingen in het hoogwaterveiligheidsdomein (operationele voorspelling en ontwerp primaire keringen), maar voor maatregelstudies en morfologische/ecologische toepassingen is deze kalibratie onvolledig. Door **meer typen data mee te nemen** in kalibratie en validatie, en **geen abrupte ruwheidsovergangen** toe te staan kan de huidige methode worden verbeterd voor deze toepassingen. Mogelijk helpt dit daarnaast om de modellen robuuster te maken.
- De grote complexiteit van de RWS-modellen vergroot de kans op menselijke fouten tijdens modelopzet, kalibratie/validatie en gebruik. **Onnodige complexiteit** moet daarom worden voorkomen. Daarnaast wordt aanbevolen de **FAIR-principes** te hanteren bij het ontwerpen van de kalibratie/validatiemethodiek. Hiervoor is verdere **automatisering** van de workflow en duidelijkheid over de verdeling van **verantwoordelijkheden** nodig.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	8
1.1	Achtergrond en doel	8
1.2	Leeswijzer	9
1.3	Organisatie en bijdragen	9
2	Kalibratie en validatie riviermodellen in de zesde generatie	10
2.1	Basisruwheid	10
2.2	Kalibratie	11
2.2.1	Kalibratietrajecten	11
2.2.2	Afvoerniveaus	11
2.3	Validatie	12
3	Overzicht internationaal gebruikte kalibratie/validatiemethoden	13
3.1	Bodemruwheid is de meest gebruikte kalibratieparameter	13
3.2	Kalibratie gebeurt via trial-and-error of met een optimalisatie-algoritme	13
3.3	Bodemruwheden (Manning-waarden) worden soms gevarieerd in ruimte en tijd	13
3.3.1	Constante ruwheidswaarde in ruimte en tijd	13
3.3.2	Ruwheidswaarde variërend in ruimte	14
3.3.3	Ruwheidswaarde variërend in ruimte en tijd	14
4	Analyse verschillen	17
4.1	Prestatie bij kalibratie versus validatie	17
4.2	Kalibratie van winterbedruwheden	17
4.3	Verschillende modelschematisaties binnen één kalibratie/validatie	18
4.4	Analyse van onzekerheden	18
4.5	Geschiktheid voor toepassing	19
5	Mogelijke verbeteringen kalibratie/validatiemethode	21
5.1	Geschiktheid voor toepassing	21
5.1.1	Waterstanden	22
5.1.2	Stroomsnelheden	22
5.1.3	Afvoerverdeling zomer/winterbed	22
5.1.4	Afvoerverdeling takken	23
5.1.5	Conclusie	23
5.2	Analyse van onzekerheden	24
5.3	Kalibratie van winterbedruwheden	24
5.4	Prestatie bij kalibratie versus validatie	26
5.5	Complexiteit en FAIR-principes	26

6	Conclusies	28
7	Aanbevelingen	30
7.1	Korte termijn	30
7.2	Lange termijn	30
7.2.1	Metingen	31
7.2.2	Modelopzet zevende generatie	31
8	Referenties	32
A	Kalibratie van winterbedruwheden – uitwerking methoden	35

1 Introductie

1.1 Achtergrond en doel

Rijkswaterstaat en Deltares werken in een continu proces samen aan de ontwikkeling en het onderhoud van een uitgebreid modelinstrumentarium en daaraan gekoppelde modelschematisaties van het hoofdwatersysteem. De ontwikkeling van deze modellen vindt plaats in generaties, waarbij in elke nieuwe generatie verbeteringen worden doorgevoerd ten opzichte van de vorige. Deze verbeteringen worden gedaan op basis van inzichten uit de ontwikkeling en het gebruik van de vorige generatie, maar ook op basis van nieuwe wetenschappelijke inzichten en ontwikkelingen in soft- en hardware. De ontwikkeling van modelschematisaties in de zesde generatie is inmiddels afgerond, waarmee kan worden gestart met het definiëren van verbeteringen voor de zevende generatie.

In de ontwikkeling van modellen zijn kalibratie en validatie belangrijke stappen. Door modellen te kalibreren op gemeten omstandigheden wordt de nauwkeurigheid geoptimaliseerd, en door validatie op gemeten omstandigheden kan deze nauwkeurigheid worden gekwantificeerd. De methode van kalibreren en valideren verschilt voor verschillende typen RWS-modellen, en daarmee verschillen ook de verbetermogelijkheden op dit gebied. In dit rapport ligt de focus op de modellen van de rivieren in het Nederlandse hoofdwatersysteem, met name de Rijn en de Maas.

De eerste generaties riviermodellen werden vooral toegepast voor waterstandsvoorspellingen bij hoge afvoeren en ontwerp van keringen. De kalibratie- en validatiemethode sloot hierop aan en was dus met name gericht op het zo nauwkeurig mogelijk simuleren van (piek)waterstanden. In de loop der tijd is het aantal toepassingen echter geleidelijk aan toegenomen. Om het aantal verschillende modellen beperkt te houden streeft RWS nog steeds naar de ontwikkeling van één gekalibreerd en gevalideerd model per gebied, dat voor alle toepassingen geschikt is. Om de modellen geschikt te maken voor een groot afvoerbereik (naast extreme afvoeren ook lage en middelhoge) wordt gekalibreerd op verschillende afvoerniveaus. De kalibratie- en validatiemethode is in de kern echter niet aangepast, hoewel een optimale kalibratie/validatie voor elke toepassing anders is. Daarnaast is niet duidelijk wat de resulterende nauwkeurigheid van het gekalibreerde model is voor de verschillende toepassingen. Vragen vanuit de verschillende toepassingsgebieden hierover kunnen op dit moment niet goed beantwoord worden.

Daarom is besloten om de kalibratie/validatiemethode nu, voor de start van de ontwikkeling van de volgende generatie, eens grondig onder de loep te nemen. Vragen die hierbij beantwoord worden zijn:

- Wat zijn de verschillen tussen de huidige door ons gebruikte kalibratie/validatiemethode en de methoden die internationaal worden gebruikt? Kunnen we deze verschillen verklaren en wat kunnen we ervan leren?
- Welke toepassingen kent het huidige riviermodelinstrumentarium? Wat zou voor elke toepassing apart de optimale kalibratie/validatiemethode zijn?
- Is het mogelijk om één gekalibreerd model te maken dat voor alle toepassingen voldoende geschikt is?
- Met welke kalibratie/validatiemethode krijgen we de meest nauwkeurige en robuuste resultaten voor de verschillende toepassingen samen? Hoe kunnen we de nauwkeurigheid kwantificeren?

- Wat zijn de verschillen van de voorgestelde methode(n) ten opzichte van de huidige methode?
- Hoe kunnen we nieuwe methoden testen?
- Welke meetgegevens hebben we nodig voor de voorgestelde kalibratie/validatiemethode? Zijn deze gegevens beschikbaar, of zouden aanvullende metingen uitgevoerd moeten worden?
- Geven de resultaten van deze tests aanleiding om de huidige kalibratie/validatiemethode te herzien?

De beantwoording van deze vragen mondt uit in een advies aan RWS met betrekking tot de kalibratie/validatiemethode in de riviermodellen van de zevende generatie.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een samenvatting van de huidige kalibratie/validatiemethode voor RWS-riviermodellen. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van internationaal gebruikte kalibratie/validatiemethoden op basis van literatuurstudie. In hoofdstuk 4 worden de verschillen tussen de RWS-methode en de internationale standaard geanalyseerd en wordt gekeken naar de eisen van verschillende toepassingen aan de kalibratie. Hoofdstuk 5 geeft op basis hiervan aanbevelingen voor het verbeteren van de kalibratie/validatiemethode. Conclusies volgen in hoofdstuk 6 en het rapport eindigt met concrete aanbevelingen voor de korte en lange termijn in hoofdstuk 7. In bijlage A worden verschillende opties voor de kalibratie van winterbedruwheden in meer detail uitgewerkt.

1.3 Organisatie en bijdragen

Het project is uitgevoerd door Anna Kusters. Anke Becker heeft de rol van reviewer. De volgende personen hebben bijgedragen aan de inventarisatie van verbeterpunten:

- Aukje Spruyt
- Kees Sloff
- Koen Berends
- Victor Chavarrías
- Willem Ottevanger

2 Kalibratie en validatie riviermodellen in de zesde generatie

Voor de zesde-generatiemodellen van Rijn en Maas is de ruwheid van het zomerbed gebruikt als kalibratieparameter. Voor zowel zomer- als winterbed worden voorafgaand aan de kalibratie ruwheden gedefinieerd op basis van beschikbare data. In het zomerbed worden deze zogenoemde basisruwheden vervolgens vermenigvuldigd met een factor, die wordt bepaald op basis van kalibratie op gemeten waterstanden. In het winterbed wordt geen kalibratiefactor toegepast, omdat dit zou leiden tot verschillende ruwheden voor dezelfde typen vegetatie of landgebruik op verschillende locaties. Maatregelen in het winterbed hebben daardoor op de ene plek een groter effect dan op de andere, waardoor partijen benadeeld zouden kunnen worden als zij een vergunning aanvragen.

In onderstaande paragrafen wordt de kalibratie/validatiemethode beknopt samengevat. Voor meer details wordt verwezen naar de rapporten van Kosters et al. (2022) en De Jong (2021a) over de ontwikkeling van de zesde-generatiemodellen van de Rijn en de Maas.

2.1 Basisruwheid

Voor de basisruwheid van het winterbed worden beschikbare vegetatie- en landgebruikkaarten gebruikt die zo goed mogelijk passen bij de situatie waarvoor het model representatief moet zijn.

Voor de Rijn is de ruwheid van het zomerbed gebaseerd op duinhoogtedata, volgens een versimpelde versie van de ruwheidsschatter van Van Rijn:

$$k_s = A d^{0.7} (1 - e^{-Bd^{-0.3}})$$

Met:

k_s Nikuradse-ruwheid

d waterdiepte [m]

B parameter, hier 2.5

A parameter gebaseerd op duinhoogte:

$$A = \frac{1.1H_d}{d^{0.7}}$$

met H_d de duinhoogte [m].

In de oorspronkelijke ruwheidsschatter wordt ook de invloed van de korreldiameter op de ruwheid meegenomen. In de versimpelde versie is deze component verwaarloosd.

Om de waarde van A te bepalen is het zomerbed handmatig opgedeeld in 30 trajecten van min of meer constante duinhoogte. Per traject wordt een constante waarde van A toegepast op basis van de gemiddelde duinhoogte op het traject. Hierbij is geen gebruik gemaakt van de relatie met duinhoogte en waterdiepte zoals hierboven weergegeven. In plaats daarvan is een maximale waarde voor A gekozen (0.1), die is toegepast op het traject met de grootste duinhoogte. De overige trajecten zijn hiermee geschaald. De resulterende waarde van k_s wordt de basisruwheid genoemd (die dus traject- en waterdiepte-afhankelijk is).

Voor de Maas zijn slechts twee basisruwheidtrajecten gedefinieerd. Voor het traject bovenstrooms van stuw Linne (tot rkm 69) is de basisruwheid gebaseerd op de korrelgrootte van het grind. Benedenstrooms van stuw Linne is gebruik gemaakt van dezelfde methode als voor de Rijn. Voor dit traject is een constante waarde van 0.1 gekozen voor A , omdat er geen duidelijke correlatie is tussen duinhoogte en rivierkilometer.

2.2 Kalibratie

2.2.1 Kalibratietrajecten

Voor de kalibratie zijn opnieuw trajecten gedefinieerd, waarvan de grenzen ditmaal worden bepaald door de locaties van waterstandsmetpunten. Voor elk traject wordt een kalibratiefactor bepaald, zodat de fout van gemodelleerde ten opzichte van gemeten waterstanden wordt geminimaliseerd.

Voor de Rijn zijn de drie takken (Waal, Neder-Rijn/Lek en IJssel) eerst apart van elkaar gekalibreerd, zodat de afvoerverdeling tijdens de kalibratie niet kan veranderen (deze wordt opgelegd als bovenstroomse randvoorwaarde). Vervolgens zijn de takken gecombineerd tot een totaalmodel, waarin de waterstanden op Boven-Rijn en Pannerdens Kanaal, als ook de afvoerverdeling over de takken¹ zijn gekalibreerd.

Voor zowel Rijn als Maas is de kalibratie geautomatiseerd met behulp van het Dud (Doesn't use derivative) optimalisatie-algoritme zoals geïmplementeerd in de data-assimilatietool OpenDA (<https://www.openda.org/>).

Op de grens tussen twee kalibratietrajecten lopen de factoren over een lengte van 2 km geleidelijk in elkaar over, zodat geen plotselinge sprongen in de kalibratiefactor ontstaan. Voor de basisruwheidtrajecten is zo'n overgangszone echter niet toegepast, waardoor er nog steeds sprongen in de ruwheid aanwezig zijn.

2.2.2 Afvoerniveaus

De kalibratiefactoren zijn niet alleen afhankelijk van het traject, maar ook van de lokale afvoer op dat traject. De gedachte hierachter is dat bodemvormen afhangen van de afvoer, waardoor ook de ruwheid afvoerafhankelijk is. Dit wordt gedeeltelijk ook meegenomen via de waterdiepteafhankelijkheid in ruwheidsformuleringen. Daarnaast stroomt bij hogere afvoeren ook het winterbed mee, waardoor de kalibratiefactor bij deze afvoeren ook wordt gebruikt om te corrigeren voor onzekerheden in het winterbed.

De afvoerafhankelijkheid wordt geïntroduceerd door voor 5 afvoerniveaus kalibratiefactoren te bepalen. Deze niveaus bevatten twee van de hoogste gemeten afvoeren in de afgelopen 30 jaar, een lage afvoer (relevant voor bijvoorbeeld scheepvaart) en twee tussenliggende niveaus, één waarbij het zomerbed volledig gevuld is en één waarbij de uiterwaarden net zijn overstroomd. Voor tussenliggende afvoeren wordt de kalibratiefactor bepaald door lineaire interpolatie, terwijl voor afvoeren buiten het gekalibreerde bereik de factor van het laagste of hoogste niveau wordt aangehouden.

Na de keuze van de afvoerniveaus zijn historische perioden geselecteerd waarin de betreffende afvoeren voorkomen. Door deze historische perioden te modelleren en gemodelleerde waterstanden te vergelijken met metingen kunnen de kalibratiefactoren per afvoerniveau worden bepaald.

¹ Hierbij is bij de splitsingspunten steeds de afvoer naar de kleinste tak als onbekende opgenomen in de kalibratie. De afvoer naar de andere tak volgt dan uit de waterbalans.

Voor elke periode is een bijpassende modelschematisatie gemaakt, die representatief is voor die periode. Hoewel de kalibratiefactoren dus met een bepaalde modelschematisatie zijn afgeleid, worden ze vervolgens overgenomen in alle modelschematisaties van de zesde generatie voor de Rijn dan wel de Maas.

De kalibratie is uitgevoerd van laag naar hoog afvoerniveau, waarbij de reeds bepaalde kalibratiefactoren steeds worden meegenomen in de simulatie voor het volgende afvoerniveau. Wanneer in een historische periode afvoeren voorkomen die tussen het betreffende en het lagere niveau in liggen wordt de ruwheid immers bepaald door lineaire interpolatie van de kalibratiefactor tussen de twee niveaus.

2.3 Validatie

Voor de modelvalidatie zijn opnieuw historische perioden geselecteerd met afvoeren rondom de kalibratieniveaus. Dit zijn andere perioden dan die gebruikt zijn in de kalibratie. De historische perioden zijn gesimuleerd met de bijbehorende modelschematisaties, inclusief de afgeregelde kalibratiefactoren, om zo de nauwkeurigheid van het model in het berekenen van waterstanden te kunnen kwantificeren.

Omdat de beschikbare data wordt opgesplitst in twee zoveel mogelijk vergelijkbare datasets (één voor kalibratie, één voor validatie) kan worden gesproken over een kruisvalidatie. De resultaten van deze validatie zeggen niets over het extrapolierend vermogen van het model, i.e. het vermogen om waterstanden te voorspellen voor hogere of lagere afvoeren dan gebruikt tijdens de kalibratie.

Recent zijn zowel voor de Rijn als de Maas extra validaties uitgevoerd op waterstanden gemeten tijdens recente hoogwaters (Kosters en Berends, 2022 en Van der Deijl, 2023) en op afvoer(verdeling) en stroomsnelheden, zie Gradussen (2023), Becker et al. (2023) en Van der Deijl (2023). De modellen presteren redelijk tot goed in deze validaties, al zijn lokaal grote afwijkingen zichtbaar, o.a. op locaties waar geometrische elementen in de schematisatie (bijv. drempels, kades) niet up-to-date zijn.

3 Overzicht internationaal gebruikte kalibratie/validatiemethoden

3.1 Bodemruwheid is de meest gebruikte kalibratieparameter

Kalibratie van hydrodynamische riviermodellen gebeurt in de meeste gevallen door het aanpassen van de bodemruwheid. De belangrijkste reden hiervoor is dat de bodemruwheid niet direct uit metingen verkregen kan worden, terwijl modeluitkomsten gevoelig zijn voor de gekozen waarde. Hierdoor levert de bodemruwheid doorgaans één van de grootste bijdragen aan de onzekerheid van de modeluitkomsten (Domhof et al. 2018; Meert, Pereira en Willems 2018). Met de kalibratie van de bodemruwheid wordt echter niet alleen gecompenseerd voor de fout in de bodemruwheid zelf, maar ook voor alle andere foutbronnen in het model (invoerdata, discretisatie, etc.).

3.2 Kalibratie gebeurt via trial-and-error of met een optimalisatie-algoritme

De bodemruwheid wordt veelal handmatig gekalibreerd volgens een 'trial-and-error'-methode (bijv. Dam et al. 2008; Matte, Secretan en Morin 2017; Meert, Pereira en Willems 2018; Vanlede et al. 2009), of met behulp van een optimalisatie-algoritme (Chu et al. 2022; Fread 1985; Vidal et al. 2007). De 'trial-and-error'-methode is tijdrovend en de resultaten zijn niet makkelijk herleidbaar of reproduceerbaar. Daarnaast hangt de uitkomst van deze methode sterk af van de ervaring en de gebiedskennis van de modelleur. Het gebruik van een optimalisatie-algoritme neemt deze nadelen (gedeeltelijk) weg, maar kan leiden tot onrealistische parameterwaarden. Daarnaast komt hierin het probleem van equifinaliteit sneller naar voren, het gegeven dat dezelfde modelresultaten bereikt kunnen worden met verschillende parametersets (Bessar, Matte en Ancil 2020; van Maren en Cronin 2016; Vidal et al. 2007). Ook kunnen de resultaten hierbij zonder veel extra moeite zeer precies op de metingen worden afgeregeld, waardoor het risico op overfitting toeneemt (Bao et al. 2018). Domhof et al. (2018) laten echter zien dat geen overfitting optreedt voor een 1D-model van de Waal met maximaal 5 kalibratietrajecten en 12 afvoerniveaus, want de prestatie tijdens de validatie (voor de Waal als geheel) neemt niet af bij een toenemend aantal kalibratietrajecten of afvoerniveaus. Aan de andere kant wordt de prestatie ook niet significant beter naarmate het aantal variabelen tijdens de kalibratie toeneemt.

3.3 Bodemruwheden (Manning-waarden) worden soms gevarieerd in ruimte en tijd

In riviermodellen wordt de bodemruwheid vaak uitgedrukt met de formule van Manning. Dit is slechts één van een groot aantal empirische relaties tussen ruwheid en hydraulische straal, maar is om historische redenen veruit de meest gebruikte (Berends et al., 2022).

3.3.1 Constante ruwheidswaarde in ruimte en tijd

In een deel van gepubliceerde case studies wordt op basis van kalibratie slechts één Manning-waarde afgeleid, die constant is in tijd en ruimte (bijv. Kadhim Hameed en Tawfeek Ali 2013; Parhi, Sankhua en Roy 2012). In veel van deze gevallen is een meer gedetailleerde kalibratie niet mogelijk omdat de beschikbare data beperkt is of niet van goede kwaliteit.

Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Wanneer geen gedetailleerde bodemmetingen beschikbaar zijn, en ook gegevens over de bodemsamenstelling en eventueel aanwezige vegetatie ontbreken, kan geen ruimtelijk variërende basisruwheid worden bepaald op basis van fysische eigenschappen als korrelgrootte en duinhoogte. In deze gevallen wordt vaak gebruik gemaakt van opzoektabellen die Manning-waarden voor verschillende typen rivieren geven (bijv. Chow, 1959) als basis voor kalibratie of om gekalibreerde Manning-waarden mee te vergelijken. Als daarnaast geen hydrodynamische gegevens beschikbaar zijn binnen het modeldomein kunnen deze standaardwaarden direct worden toegepast.
- Het aantal meetlocaties (voor waterstanden of bijvoorbeeld snelheden) binnen het modeldomein bepaalt het maximale aantal kalibratietrajecten. Als slechts op één locatie gemeten tijdseries beschikbaar zijn kan geen ruimtelijk variërende ruwheid worden bepaald op basis van kalibratie.
- Wanneer waterstands- en afvoermetingen slechts een korte periode beslaan (bijv. voor één enkele afvoerpiek) kan geen (uitgebreide) afvoerafhankelijke kalibratie worden uitgevoerd.
- Wanneer de onzekerheid in de metingen van bijvoorbeeld afvoer en waterstanden groot is, is het onzinnig een complexe ruwheidskalibratie op basis van deze data uit te voeren. Het is in dat geval belangrijker om eerst de onzekerheid in de metingen te verkleinen en ondertussen het model vooral te beoordelen op plausibiliteit.

3.3.2 Ruwheidswaarde variërend in ruimte

In veel gevallen kan echter wel een ruimtelijk variërende ruwheid worden afgeleid, op basis van een directe vertaling van eigenschappen van de rivier en/of door kalibratie voor meer dan één meetstation.

Voorafgaand aan kalibratie kunnen velden met verschillende ruwheidswaarden worden gedefinieerd, wanneer segmenten met duidelijk verschillende eigenschappen te onderscheiden zijn op basis van bijvoorbeeld (lucht)foto's, satellietbeelden, landgebruikkaarten, Lidar-data of bodemmonsters. Vaak wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen hoofdgeul en (begroeide) uiterwaarden, eilanden of zand/grindbanken. In sommige gevallen worden deze ruwheidswaarden vervolgens direct gekalibreerd (bijv. Chu et al. 2022; Lai 2010; Matte, Secretan en Morin 2017; Nelson, Gibsion en Sanchez 2022), maar soms wordt ook een aparte vermenigvuldigingsfactor bepaald per traject, waarbij de trajecten worden bepaald op basis van de locatie van meetstations (Bessar, Matte en Anctil 2020).

Wanneer de ruwheid op voorhand geen duidelijke ruimtelijke variatie vertoont kan deze direct per meettraject worden gekalibreerd. In deze gevallen wordt meestal zowel zomer- als winterbed gekalibreerd. Voorbeelden zijn te vinden in Xu et al. (2017) en Kuriqi en Ardiçliolu (2018).

3.3.3 Ruwheidswaarde variërend in ruimte en tijd

In enkele gevallen wordt naast ruimtelijke variatie van de ruwheidscoëfficiënt ook een variatie in tijd toegepast. Dit kan een meerwaarde opleveren in specifieke gevallen, waarin een temporele variatie in ruwheid fysisch verklaard kan worden. (Bao et al. 2018) vinden bijvoorbeeld een invloed van hysteresis op de ruwheid voor afvoergolven die niet als quasi-uniform beschouwd kunnen worden. Ook wanneer de ruwheid sterk wordt beïnvloed door seizoen afhankelijke vegetatie kan een dynamisch ruwheidsmodel meerwaarde bieden (De Doncker et al. 2009; Keupers, Nguyen Thanh en Willems 2015). Xu et al. (2017) stellen een methode voor om Manning-waarden dynamisch te kalibreren via data-assimilatie in een operationele setting.

We focussen hier op twee voorbeelden van afvoerafhankelijke kalibratie voor rivieren waarvan de karakteristieken vergelijkbaar zijn met die van de Rijn en de Maas.

Bessar, Matte en Anctil (2020) beschrijven de kalibratie, validatie en analyse van onzekerheden voor een 1D-model van de Chaudière in Québec, Canada (bodemverhang 5e-4 binnen het modeldomein). Hun methode en resultaten kunnen als volgt worden samengevat:

- Voorafgaand aan de kalibratie zijn 9 ruwheidscategorieën gedefinieerd op basis van landgebruik. Deze ruwheden zijn vervolgens gekalibreerd in 5 trajecten tussen waterstandstations, totdat de mean absolute error² per station was teruggebracht tot ca. 10 tot 20 cm.
- Bessar et al. maken gebruik van 4 kalibratie- en 2 validatieperioden, met lengtes tussen de 2 en 16 dagen. De kalibratie- en validatieperioden zijn geselecteerd uit de periode mei 2016 – april 2019. Omdat de riviergeometrie in deze periode (blijkbaar) niet significant is veranderd wordt voor alle perioden dezelfde modelschematisatie gebruikt.
- Op basis van de kalibratieperioden worden per afvoerklasse van 100 of 200 m³/s vermenigvuldigingsfactoren bepaald voor de ruwheid (ter vergelijking: de maximale gesimuleerde afvoer is ongeveer 2500 m³/s). Omdat de afvoeren binnen de vier kalibratieperioden overlappen zijn de uiteindelijke kalibratiefactoren bepaald met een combinatie van gewogen middeling en handmatige aanpassingen. Vervolgens zijn de kalibratieperioden nog eens doorgerekend met de resulterende factoren om de modelprestatie te beoordelen.
- De validatieperioden liggen qua afvoer in het bereik van de kalibratie, dus hiermee wordt niet op extrapolatie getest.
- Resulterende kalibratiefactoren zijn in veel gevallen lager dan 1 (gemiddeld ca. 0.7). Dit leidt in sommige gevallen ook tot onrealistisch lage Manning-waarden.
- De modelprestatie (bias, MAE en RMSE) volgend uit de validatie is vergelijkbaar met die voor de kalibratie.
- Naast kalibratie en validatie voeren Bessar et al. een uitgebreide onzekerheidsanalyse uit met behulp van Latin Hypercube Sampling, een variatie op Monte Carlo sampling. Hierin zijn de volgende bronnen van onzekerheid meegenomen:
 - De Qh-relatie voor de bepaling van de bovenstroomse randvoorwaarde (meetfouten in waterstanden en afvoeren en fouten in inter- en extrapolatie);
 - Laterale toestroming;
 - Ruwheidscoëfficiënten.

Als tweede voorbeeld bekijken we een 2D-model in D-HYDRO van de Binnenweser in Duitsland (Yörük et al. 2021). De kalibratie van dit model is zeer vergelijkbaar met de methode die voor de Rijn is gehanteerd in de zesde generatie:

- Voor de ruwheden in het winterbed worden trachytopen gebruikt, in het zomerbed wordt de ruwheid gedefinieerd door de versimpelde formule van Van Rijn (zie paragraaf 2.1), waarbij voor B een waarde van 2.5 is aangenomen, en alleen A is gekalibreerd. Voor de kribvakken is een aparte, constante A-waarde van 1 aangenomen. Deze waarde is gebaseerd op de afvoerverdeling over hoofdgeul en kribvakken. De A-waarde in het zomerbed is direct gekalibreerd op de trajecten tussen waterstandstations. Er is dus geen onderscheid gemaakt in basisruwheden (en bijbehorende trajecten) en kalibratiefactoren en -trajecten.

² $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{i,model} - H_{i,meting}|$ met i de tijdstippen van de beschikbare metingen voor een bepaalde periode en meetlocatie.

- De A-waarden zijn gekalibreerd op verhanglijnen voor een lage, middelhoge en hoge afvoer. Hiervoor zijn drie stationaire modelberekeningen gebruikt. Hierbij werd gestreefd naar een maximaal verschil van 5 à 10 cm tussen model en verhanglijn, en een maximaal verschil van 5 cm op de locaties van vaste meetstations.
- Met de resultaten van de stationaire kalibratie is vervolgens een dynamische kalibratie uitgevoerd. Deze stap is met name bedoeld om de overgangen tussen verschillende A-waarden geleidelijker te maken.
Hierbij is gelet op het verloop van de golf en de piekwaterstanden. De combinatie van deze twee parameters in de kalibratie-eis moet ervoor zorgen dat de modelresultaten robuust worden, dat wil zeggen dat het model voor een groot aantal perioden en een groot afvoerbereik goede resultaten geeft. Ook is een kalibratie op Qh-relaties voor elk meetstation uitgevoerd op basis van modelresultaten voor een synthetische golf.
- Bij afwijkingen tussen modelresultaten en metingen is in eerste instantie gecontroleerd of dit wordt veroorzaakt door onnauwkeurigheden of fouten in de modelschematisatie. Pas als deze uitgesloten konden worden is de ruwheid aangepast. Om deze reden is niet automatisch gekalibreerd en is in detail gekeken naar stroombeelden.
- Voor de validatie is opnieuw gebruik gemaakt van stationaire en dynamische sommen, in hetzelfde afvoerbereik als in de kalibratieperioden. De modelprestatie tijdens de validatie is vergelijkbaar met die tijdens de kalibratie.

4 Analyse verschillen

Ten opzichte van de hierboven geanalyseerde studies is de kalibratie/validatiemethode voor de RWS-riviermodellen zeer uitgebreid. Slechts enkele voorbeelden zijn qua complexiteit vergelijkbaar met de riviermodellen van de zesde generatie. Met het gebruik van op fysica gebaseerde basisruwheden en een afvoerafhankelijke kalibratie zijn de riviermodellen van de zesde generatie state-of-the-art te noemen. Toch zijn op basis van de literatuurstudie enkele kanttekeningen te maken bij de gebruikte kalibratie/validatiemethode. In onderstaande paragrafen wordt hier nader op ingegaan.

4.1 Prestatie bij kalibratie versus validatie

Een opvallend verschil tussen de huidige kalibratiemethode in de zesde generatie en internationale voorbeelden is te zien op het gebied van de prestatie-eisen tijdens de kalibratie. Over het algemeen wordt tijdens de kalibratie gestreefd naar een bias van enkele centimeters per station (Bessar, Matte en Ancil 2020; Chu et al. 2022; Yörük et al. 2021), hoewel in veel gevallen niet (alleen) naar de bias wordt gekeken, maar (ook) naar MAE en/of RMSE. In de bestudeerde voorbeelden zien we doorgaans dat de modelprestatie tijdens de validatie vergelijkbaar is met de prestatie tijdens de kalibratie (Bessar, Matte en Ancil 2020; Chu et al. 2022; Matte, Secretan en Morin 2017; Yörük et al. 2021). Voor de kalibratie van Rijn en Maas is echter een bias-criterium van 5 mm gebruikt per station en per (zeer korte) periode. De kalibratie is daarmee alleen gericht op specifieke momenten. Dit leidt tot bijna perfecte resultaten voor de bias tijdens de kalibratie, maar tijdens de validatie presteert het model beduidend slechter, met bias-waarden van doorgaans enkele centimeters per station (Kosters et al., 2022). Hoewel dit validatieresultaat nog steeds erg goed is, is het de vraag of een dergelijke strenge prestatie-eis tijdens de kalibratie en de beperking tot een enkele indicator niet tot overfitting leidt. Een minder strenge prestatie-eis leidt tot minder aanpassingen in de basisruwheden. Daardoor wordt een meer fysisch realistisch resultaat bereikt, met een mogelijk meer robuuste prestatie tijdens validaties. Ook het meenemen van verschillende typen indicatoren, zoals bias en RMSE, en het beoordelen van de prestatie over langere perioden kan hierbij helpen. Door onderzoek te doen naar modelonzekerheden (zie paragraaf 4.4) kan onderbouwd worden wat een passende combinatie van prestatie-eisen is voor de RWS-riviermodellen.

4.2 Kalibratie van winterbedruwheden

Het kalibreren over de hele breedte van de rivier, in plaats van alleen over het zomerbed, is eerder opgemerkt als mogelijk verbeterpunt voor de RWS-riviermodellen (bijv. Kosters et al., 2022). In de literatuurstudie zijn geen andere voorbeelden gevonden van methoden waarbij slechts een gedeelte van de stromende breedte wordt gekalibreerd. Het compenseren van fouten in de schematisatie van het winterbed met het aanpassen van de zomerbedruwheid beïnvloedt de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. De onderbouwing van deze methode wordt des te meer twijfelachtig in combinatie met het gebruik van verschillende modelschematisaties binnen de kalibratie en validatie (zie paragraaf 4.3). Met de kalibratie van het zomerbed wordt immers onder meer³ gecompenseerd voor fouten in de classificatie van ecotopen en de parametrisatie van de daaraan gekoppelde ruwheden in het winterbed in een specifieke schematisatie (Straatsma en Huthoff 2010). Omdat juist het winterbed sterk verschilt in verschillende schematisaties is het onlogisch om kalibratiefactoren die zijn afgeleid voor één schematisatie dan ook in andere schematisaties toe te passen.

³ Hier wordt slechts één van de vele foutbronnen beschreven. Fouten worden ook geïntroduceerd door de overige onderdelen van de schematisatie, de randvoorwaarden, de discretisatie, de software, etc.

Dit probleem blijft echter bestaan wanneer voor het winterbed ook een kalibratiefactor per meettraject wordt afgeleid. In paragraaf 5.3 worden daarom verschillende opties voorgesteld voor het kalibreren van winterbedruwheden.

4.3 Verschillende modelschematisaties binnen één kalibratie/validatie

Ook van het gebruik van verschillende schematisaties binnen één kalibratie/validatie zijn binnen de literatuurstudie geen voorbeelden gevonden. In veel gevallen worden binnen een kalibratie/validatie historische perioden gebruikt die dicht bij elkaar liggen in de tijd. In dat geval kan worden aangenomen dat tussen de perioden geen significante wijzigingen in het gebied hebben plaatsgevonden, waardoor voor alle simulaties dezelfde schematisatie kan worden gebruikt. Ook gebrek aan data kan een reden zijn om slechts één schematisatie te gebruiken. Wat dat betreft is de methodiek voor RWS-modellen, met het gebruik van GIS-databases die nauwkeurig worden bijgehouden, state-of-the-art. De Engelse leidraad voor rivier- en overstromingsmodellering geeft wel aan dat per kalibratie/validatieperiode specifieke aanpassingen (bijv. in bodemhoogte, kunstwerken of dijkhoogtes) nodig kunnen zijn om een representatieve schematisatie te verkrijgen⁴. Voor de uiteindelijke modelsimulaties (bijv. voor het ontwerp van keringen) moet volgens de leidraad wel een model van de huidige situatie worden gebruikt. Deze werkwijze is vergelijkbaar met de Nederlandse, waarin de gevonden kalibratiefactoren worden toegepast in modellen voor de huidige en toekomstige situatie. Hierbij kan worden aangenomen dat er een bandbreedte bestaat waarbinnen op historische situaties aangepaste schematisaties nog voldoende representatief zijn voor de huidige en toekomstige situatie. Een fundamenteel probleem is dat in Nederland met o.a. Ruimte voor de Rivier zulke grootschalige aanpassingen aan de rivier zijn gedaan dat het twijfelachtig is of historische schematisaties nog binnen deze bandbreedte passen. Dit kan worden getest door periodes met vergelijkbare hydrodynamische condities maar een andere riviergeometrie (bijv. voor en na Ruimte voor de Rivier) te selecteren, en deze door te rekenen met de bijbehorende modelschematisaties, waarbij elke schematisatie wel dezelfde kalibratiefactoren gebruikt. Wanneer een duidelijke correlatie bestaat tussen tijd (ten opzichte van de kalibratieperiode) en modelprestatie, moet worden bepaald welke verslechtering van modelprestatie nog acceptabel wordt geacht. Zowel voor de Rijn (Kosters et al., 2022) als de Maas (De Jong, 2021b) is al aandacht besteed aan deze zogenaamde stationariteit tussen modelschematisaties. Zolang er geen alternatief is voor het gebruik van historische schematisaties (dit geldt met name voor extreme afvoeren met grote terugkeertijden) is het zaak om de onzekerheden die dit met zich meebrengt te onderzoeken en expliciet te maken (zie paragraaf 4.4).

4.4 Analyse van onzekerheden

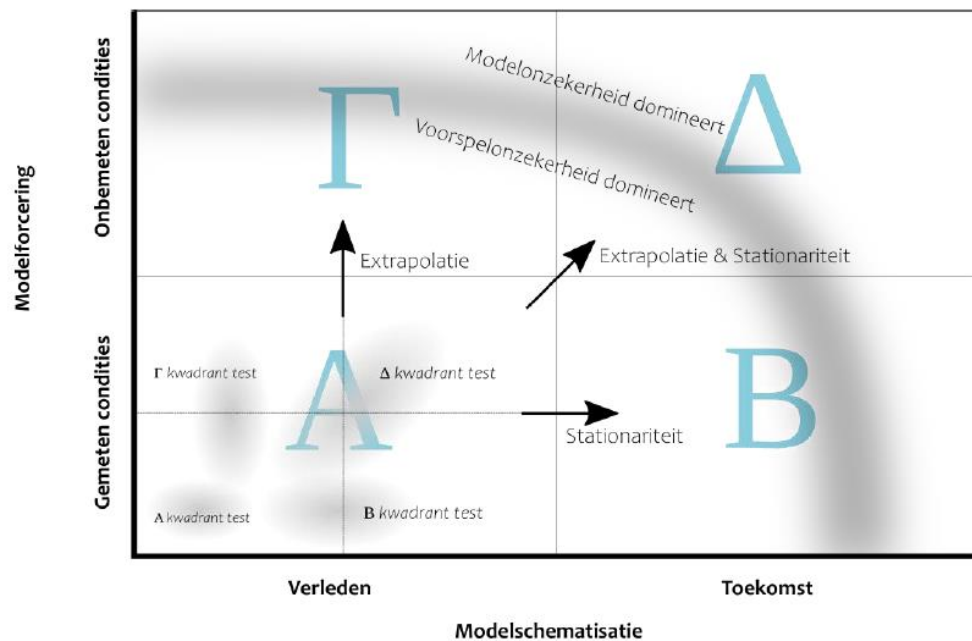
In verschillende bronnen wordt het onderzoeken van (model)onzekerheden genoemd als cruciaal onderdeel van modelontwikkeling (Apel et al. 2004; Bessar, Matte en Anctil 2020). Tevens worden verschillende methoden aangereikt om onzekerheden in beeld te brengen (Apel et al. 2004; Bessar, Matte en Anctil 2020; Meert, Pereira en Willems 2018).

Het kennen en expliciet benoemen van onzekerheden is van belang bij de interpretatie en het gebruik van modelresultaten, zeker als dit gebeurt in de context van wet- en regelgeving (zoals bij RWS-modellen het geval is). Het is daarom opvallend dat hier bij de ontwikkeling van de zesde-generatiemodellen weinig aandacht aan is besteed. Berends et al. (2021) hebben een methode voorgesteld waarmee de onzekerheid van RWS-stromingsmodellen explicieter kan worden meegenomen in de modelontwikkeling.

⁴ <https://www.gov.uk/government/publications/river-modelling-technical-standards-and-assessment/hydraulic-modelling-best-practice-model-approach#performance-testing-your-hydraulic-models>

Dit rapport legt de focus op het uitbreiden en beter documenteren van deterministische kalibratie- en validatieresultaten, aansluitend bij de huidige praktijk van RWS-modelontwikkeling. Onzekerheden zouden volgens de voorgestelde methode in beeld moeten worden gebracht binnen elk kwadrant van de onzekerheidsmatrix (Berends, 2019), zie Figuur 4.1. Dit kan praktisch ingevuld worden door voor elk kwadrant een kalibratie en validatie uit te voeren, waarbij steeds een andere subset van de beschikbare data wordt gebruikt.

Andere methoden voor het kwantificeren van modelonzekerheid (zoals Monte-Carloanalyse) lijken op dit moment minder geschikt voor toepassing binnen RWS-modelontwikkeling, vanwege de vaak enorme rekenlast die deze methoden vergen. Chavarrías (2023) stelt echter dat toegang tot cloud computing de mogelijkheid biedt om ook rekenintensieve methoden in te zetten voor onzekerheidsanalyse van RWS-modellen.



Figuur 4.1 De onzekerheidsmatrix, naar Berends (2019).

4.5 Geschiktheid voor toepassing

De meeste riviermodellen worden ontwikkeld voor één toepassing, bijvoorbeeld voor het bepalen van overstromingskansen (Bessar, Matte en Anctil 2020; Xu et al. 2017). De modelontwikkeling kan in dat geval toegespitst worden op een goede modelprestatie binnen die specifieke toepassing. Modellen die worden ontwikkeld in het kader van hoogwaterveiligheid moeten bijvoorbeeld vooral goed presteren voor extreme afvoeren. Een afvoerafhankelijke kalibratie, waarin ook specifiek naar lage en middelhoge afvoeren wordt gekeken is in deze gevallen minder relevant. In hydrodynamische modellen die als basis dienen voor morfologische studies zijn juist met name stroomsnelheden voor middelhoge afvoeren van belang.

Het uitgangspunt van de RWS-riviermodellen is echter juist dat één gekalibreerd model voor alle RWS-toepassingen (zie paragraaf 5.1) kan worden gebruikt. Dit betekent dat compromissen gesloten moeten worden tussen de optimale kalibratie/validatiemethode per toepassing, zodat het uiteindelijke model voor alle toepassingen zo goed mogelijk presteert.

Historisch gezien is de ontwikkeling van RWS-riviermodellen gestart vanuit het oogpunt van hoogwaterveiligheid. Later zijn daar andere toepassingen bijgekomen, zoals genoemd in paragraaf 5.1. De gebruikte kalibratie/validatiemethode, oorspronkelijk gericht op de modelprestatie bij hoogwater, is slechts deels aangepast op deze nieuwe toepassingen. Zo is het aantal afvoerniveaus waarop gekalibreerd wordt uitgebreid, zodat ook lage en middelhoge afvoeren worden meegenomen, maar wordt nog steeds alleen op tijdreeksen van waterstanden op LMW-stations gekalibreerd en niet op variabelen die voor bepaalde toepassingen interessanter zijn (zoals stroomsnelheden). Daarbij wordt opgemerkt dat uitbreiding van de set van indicatoren voor de modelprestatie ook nuttig is voor de toepassing voor hoogwaterveiligheid, omdat het de kans op overfitting verkleint en een meer fysisch realistisch resultaat tot gevolg heeft. Het model wordt daardoor robuuster.

Voor de ontwikkeling van een nieuwe generatie RWS-modellen wordt aanbevolen de afweging tussen verschillende kalibratie/validatiemethoden expliciet te maken. Dit houdt in dat de toepassingen op een rij moeten worden gezet, met per toepassing de belangrijkste modelvariabelen. Vervolgens wordt per toepassing een optimale kalibratiemethode bedacht, gegeven de beschikbare data. De laatste stap omvat het kiezen van één methode die voor alle toepassingen samen tot een optimale modelprestatie leidt. De uitkomst van deze analyse kan ook zijn dat het niet mogelijk is om met één kalibratie/validatiemethode tot een acceptabele modelprestatie te komen voor elke toepassing. In dat geval kan worden gekozen voor de ontwikkeling van verschillende modellen voor verschillende toepassingen. Een aanzet voor een dergelijke analyse wordt gedaan in paragraaf 5.1.

5 Mogelijke verbeteringen kalibratie/validatiemethode

Op basis van de uitkomsten van hoofdstuk 3 en 4 worden een aantal verbeterpunten voorgesteld voor de kalibratie en validatie van RWS-riviermodellen. Deze verbeterpunten zijn op dezelfde manier ingedeeld als in hoofdstuk 4, maar nu gesorteerd in volgorde van uitvoering. Omdat het gebruik van verschillende modelschematisaties binnen kalibratie/validatie (zie paragraaf 4.3) op dit moment niet te voorkomen lijkt komt dit onderwerp niet voor in dit hoofdstuk. Wel is een paragraaf toegevoegd over het minimaliseren van de kans op menselijke fouten in het kalibratie/validatieproces.

5.1 Geschiktheid voor toepassing

Tabel 5.1 geeft een overzicht van relevante kalibratie/validatievariabelen per modeltoepassing. Hieruit blijkt dat er binnen de RWS-toepassingen voor riviermodellen grofweg 5 variabelen zijn die relevant zijn voor kalibratie/validatie:

- Waterstanden (in het gehele bereik, en specifiek bij extreme afvoeren)
- Stroomsnelheden
- Afvoer (incl. toestromingen, onttrekkingen, berging en terugstroming)
- Afvoerverdeling zomer/winterbed
- Afvoerverdeling takken

De huidige kalibratie/validatiemethode is gericht op het zo goed mogelijk simuleren van waterstanden, afvoerverdeling over verschillende riviertakken en het afvoerverloop langs de takken, alle in het bemeten bereik. Onderstaande paragrafen gaan in op geschikte kalibratie/validatiemethoden voor de overige variabelen. Vervolgens wordt een mogelijke kalibratie/validatiemethode geformuleerd waarin de eisen vanuit de verschillende toepassingen zijn afgewogen, om zo tot een optimaal kalibratie/validatieresultaat te komen voor alle toepassingen samen. Toepassingen met dezelfde relevante variabelen zijn in de tabel samengevoegd.

Voor alle toepassingen geldt dat een goede kalibratie alleen mogelijk is met goede randvoorwaarden in het model, met name voor de afvoer. Hieraan moet voorafgaand aan de kalibratie voldoende aandacht worden besteed.

Tabel 5.1 Overzicht van toepassingen RWS-riviermodellen en bijbehorende relevante variabelen voor kalibratie/validatie.

Toepassing	Relevante variabelen voor kalibratie/validatie
Operationele voorspelling	<ul style="list-style-type: none">• Waterstanden (gehele bereik)• Overstroomd gebied/afvoerverdeling zomer/winterbed• Afvoerverdeling takken
Verkenningen en planstudies, vergunningverlening	<ul style="list-style-type: none">• Waterstanden (gehele bereik)• Stroomsnelheden• Afvoerverdeling zomer/winterbed• Afvoerverdeling takken
Beoordeling en ontwerp primaire keringen (BOI)	<ul style="list-style-type: none">• Waterstanden (extreem, onbemeten bereik)• Afvoerverdeling takken
Basis voor morfologische modellen	<ul style="list-style-type: none">• Stroomsnelheden (gehele bereik, maar met name bij veelvoorkomende afvoeren)

Toepassing	Relevante variabelen voor kalibratie/validatie
	<ul style="list-style-type: none"> Waterstanden (met name in het bereik waarin uiterwaarden/nevengeulen net overstromen, omdat dit de afvoerdeling tussen zomer/winterbed en daarmee de stroomsnelheden sterk beïnvloedt). Afvoerdeling zomer/winterbed Afvoerdeling takken
Basis voor ecologische en waterkwaliteitsmodellen	<ul style="list-style-type: none"> Stroomsnelheden (gehele bereik, nadrukkelijk ook bij lage afvoeren) Afvoerdeling takken Afvoerdeling zomer/winterbed

5.1.1 Waterstanden

Voor waterstandskalibratie wordt het modeldomein normaal gesproken opgesplitst in kalibratietrajecten, waarvan de grenzen op de meetlocaties liggen (zie paragraaf 2.2.1). Deze methode is in principe geschikt voor nauwkeurige simulatie van waterstanden. Abrupte overgangen in ruwheid op de grenzen van kalibratietrajecten kunnen echter tot onrealistische snelheidsgradiënten leiden. Dit is onwenselijk voor morfologische en waterkwaliteitstoepassingen (Becker et al., 2023). Het is voor deze toepassingen wel mogelijk om kalibratietrajecten te gebruiken, maar de overgangen tussen trajecten moeten dan zo geleidelijk mogelijk verlopen. Becker et al. (2023) doen een voorstel voor de praktische invulling hiervan. Een alternatief voor of aanvulling op het kalibreren van waterstanden op vaste metingen is het kalibreren op verhanglijnen. Omdat verhanglijnen bestaan uit metingen op een groot aantal locaties langs de rivier kan op basis hiervan een meer geleidelijk verloop van ruwheden worden bepaald.

5.1.2 Stroomsnelheden

Voor het zo goed mogelijk weergeven van stroomsnelheden zijn ten eerste snelheidsmetingen nodig. Dit kunnen ADCP-metingen zijn, maar ook uit andere databronnen kunnen stroomsnelheden worden afgeleid. Een voorbeeld is het afleiden van stroomsnelheid aan het wateroppervlak uit camera- of radarbeelden.

Het is mogelijk om waterstanden en stroomsnelheden gelijktijdig automatisch te kalibreren door een kostenfunctie te ontwerpen waarin beide variabelen zijn meegenomen (Vanlede et al. 2015). De kostenfunctie kan een combinatie van prestatieparameters bevatten (bijvoorbeeld bias van waterstanden en RMSE van snelheden), waaraan weegfactoren worden toegekend. Gewichten kunnen worden toegekend op basis van verwachte nauwkeurigheid van de metingen, of op basis van het belang voor de beoogde toepassing(en).

Voor kalibratie van stroomsnelheden/afvoer in het winterbed kan de winterbedruwheid worden gebruikt. Hier wordt nader op ingegaan in paragraaf 5.3.

5.1.3 Afvoerdeling zomer/winterbed

Voor morfologische en ecologische toepassingen is de afvoerdeling tussen zomer- en winterbed (en kribvakken) belangrijk. Dit geldt ook voor het verkennen en toetsen van maatregelen, bijvoorbeeld voor rivierversuiming. De afvoerdeling zomer/winterbed hangt in belangrijke mate samen met de stroomsnelheid, en ook met de waterstand. De verwachting is dat met een goede prestatie voor die twee variabelen ook de afvoerdeling goed gerepresenteerd wordt.

Naast stroomsnelheidsmetingen kunnen overstromingskaarten (bijv. o.b.v. luchtfoto's) helpen bij de kalibratie/validatie van de afvoerverdeling zomer/winterbed. Wanneer uiterwaarden net overstromen is het in veel gevallen niet mogelijk om hier stroomsnelheden te meten vanwege de geringe diepte. Bovendien zullen de stroomsnelheden in deze gevallen zeer laag zijn.

Overstromingskaarten kunnen ook helpen om het overstroomde gebied beter te kunnen inschatten. Dit is met name in operationele setting belangrijk en hangt, naast een goede weergave van de bodem en de ruwheid, ook af van de representatie van geometrische elementen zoals kades, drempels en inlaatkunstwerken zoals (kleine) sluizen en duikers. Op basis van informatie uit onder meer overstromingskaarten kunnen kunstwerken, waarvan het beheer (i.e. wanneer ze open en dicht worden gezet) niet altijd bekend is, beter worden gerepresenteerd.

5.1.4 Afvoerverdeling takken

Voor de Rijntakken is een juiste representatie van de afvoerverdeling over de takken zeer belangrijk, omdat deze zowel bij laag- als hoogwater gebonden is aan beleidsmatige streefwaarden. De instelling van de regelwerken en het ontwerp van maatregelen die de afvoerverdeling beïnvloeden worden in belangrijke mate bepaald door modeluitkomsten, dus het is cruciaal dat deze zo goed mogelijk overeenkomen met de werkelijkheid. Overigens is bekend dat de afvoergegevens die als modelrandvoorwaarde worden gebruikt of waarmee de modelresultaten worden vergeleken een relatief grote onzekerheid kennen (Twiinstra et al. 2020). Deze onzekerheid komt o.a. voort uit de metingen zelf en uit het fitten van een Qh/Qf-relatie door de metingen. De doorwerking hiervan op de modelresultaten kan nader onderzocht worden in een onzekerheidsanalyse, zie paragraaf 0.

De bodemruwheid in het Rijntakkenmodel wordt al gekalibreerd op de afvoerverdeling over de takken, tegelijk met de waterstanden in het splitsingspuntengebied en op de Boven-Rijn. Zoals in paragraaf 5.1.2 al werd genoemd (maar dan m.b.t. stroomsnelheden) kan de afvoerverdeling over de takken ook worden opgenomen in de kostenfunctie voor kalibratie van het hele Rijntakkenmodel.

5.1.5 Conclusie

De huidige kalibratiemethode is gebaseerd op gegevens over waterstanden en afvoerverdeling over de riviertakken. Hiermee wordt gestreefd naar een zo goed mogelijk resultaat voor toepassingen in het hoogwaterveiligheidsdomein (operationele voorspelling en ontwerp primaire keringen), maar voor maatregelstudies en morfologische/ecologische toepassingen is deze kalibratie onvolledig. Door meer typen data mee te nemen in kalibratie en validatie, en geen abrupte ruwheidsovergangen toe te staan, kan de huidige methode worden verbeterd voor deze toepassingen. Bovendien kan het model op deze manier robuuster worden gemaakt, ook voor toepassingen in het hoogwaterveiligheidsdomein.

De praktische invulling hiervan en de specifieke keuzes die voorliggen moeten worden bepaald op basis van testen. Hoofdstuk 7 doet hiervoor een eerste aanzet. Zoals al genoemd in paragraaf 4.5 kan uit deze testen ook blijken dat het niet mogelijk is om met één kalibratie/validatie voor alle toepassingen een acceptabel resultaat te bereiken. In dit geval moet de keuze voor slechts één gekalibreerd model voor alle toepassingen worden heroverwogen.

5.2 Analyse van onzekerheden

Om meer inzicht te krijgen in het effect van verschillende invoerparameters op de modelresultaten wordt een gevoeligheidsanalyse aanbevolen als eerste stap. Op basis van de resultaten van een gevoeligheidsanalyse kan bepaald worden welke parameters het best gebruikt kunnen worden voor kalibratie, aan welke invoerparameters het meeste aandacht moet worden besteed in de modelopzet en welke metingen het meest effectief bijdragen aan het verbeteren van het model.

In eerdere studies is al veel aandacht besteed aan de gevoeligheid van modelresultaten voor verschillende onderdelen van de invoer, zie bijvoorbeeld Tijssen et al. (2014), De Jong en Yossef (2016), Becker et al. (2023), Spruyt, Domhof en de Jong (2023) en Straatsma en Huthoff (2010). Bij het uitvoeren van een nieuwe gevoeligheidsanalyse moet zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van bestaande resultaten.

Daarnaast wordt aanbevolen een roosterconvergentie-analyse uit te voeren. Hiermee wordt het verband tussen roosterresolutie en modelnauwkeurigheid in beeld gebracht. De analyse maakt duidelijk welke fout geïntroduceerd wordt bij de keuze voor een bepaalde modelresolutie, die vaak wordt ingegeven door de maximaal toelaatbare rekentijd.

Vervolgens wordt, in navolging van Berends et al. (2021), aanbevolen om de modelkalibratie/validatie zó uit te voeren, dat apart getest kan worden op extrapolatie (Γ -kwadranttest), stationariteit (B-kwadranttest) en de combinatie daarvan (Δ -kwadranttest). Met de kalibratie/validatiemethode van de zesde generatie is (impliciet) al getest op stationariteit, door afvoerniveaus te kalibreren op basis van een recente periode, en te valideren op basis van een meer historische periode (of andersom). Om het model ook op extrapolatie te kunnen beoordelen moet ten eerste een (bij voorkeur recente) periode worden gekozen die 1) als stationair beschouwd kan worden (i.e. geen grote interventies binnen deze periode) en 2) verschillende piekafvoeren bevat. Het model moet vervolgens gekalibreerd worden op bijvoorbeeld de één-na-hoogste afvoer binnen de periode, en gevalideerd worden op de hoogste gemeten afvoer van de periode. Dit impliceert dat op veel lagere afvoeren kan worden gekalibreerd dan in de zesde generatie. Deze beperking maakt het des te belangrijker om te streven naar een model dat een vergelijkbare prestatie heeft in kalibratie en validatie (zie ook paragraaf 0). Dit wordt ook wel robuustheid genoemd.

5.3 Kalibratie van winterbedruwheden

Er zijn verschillende mogelijkheden om de ruwheid van het winterbed te kalibreren. De eerste, die het minste aanpassing behoeft aan de huidige kalibratiemethode, is het doortrekken van de bestaande kalibratiepolygonen naar het winterbed. De kalibratiepolygonen worden dan nog steeds begrensd door de locaties van waterstandsstations, maar omvatten zowel zomer- als winterbed. Bij lage afvoeren wordt het winterbed automatisch uitgesloten van kalibratie doordat het winterbed niet meestroomt en de kalibratiefactor daar dus ook geen effect heeft.

Een nadeel van deze methode is dat deze geen mogelijkheid biedt om de afvoerverdeling zomer/winterbed te kalibreren met de ruwheid. Deze mogelijkheid is er wel wanneer, in plaats van het doortrekken van de bestaande polygonen, nieuwe polygonen worden gedefinieerd voor het winterbed (nog steeds begrensd door de waterstandsstations). In dat geval zouden voor de lage afvoeren (\leq zomerbedvullend) alleen kalibratiefactoren voor de zomerbedpolygonen kunnen worden afgeleid. Wanneer er bij hogere afvoeren naast waterstanden ook stroomsnelheidsmetingen beschikbaar zijn kunnen de winter- en zomerbedpolygonen allebei worden gekalibreerd. Als naast waterstanden geen extra informatie beschikbaar is kunnen de polygonen samen (als één polygoon) worden

gekalibreerd (dit is feitelijk hetzelfde als het doortrekken van de zomerbedpolygonen), of kunnen alleen de polygonen in het winterbed gekalibreerd worden. In het laatste geval wordt de ruwheid van het zomerbed voor afvoeren > zomerbedvullend constant gehouden. Daarmee wordt impliciet aangenomen dat de onzekerheid in de ruwheid van het winterbed domineert over de onzekerheid in de afvoerafhankelijkheid van de zomerbedruwheid (de zomerbedkalibratiefactor). Deze aanname moet getoetst worden met een gevoeligheidsanalyse (paragraaf 0).

In beide hierboven beschreven opties wordt aangenomen dat de met één modelschematisatie gevonden kalibratiefactoren toegepast kunnen worden in een andere schematisatie. Deze aanpak is echter twijfelachtig (zie uitleg in paragraaf 4.3). Om de stationariteit van de modellen te verbeteren kan worden overwogen om ruwheidsklassen in het winterbed direct te kalibreren. Hiermee wordt ook ongelijke behandeling bij vergunningverlening voorkomen (zie beschrijving aan het begin van hoofdstuk 2). Kanttekeningen hierbij zijn:

- 1 Deze methode berust op de aanname dat de ruwheid per ruwheidsklasse consistent over- of onderschat wordt. Dit hoeft echter niet het geval te zijn, omdat:
 - a Vegetatie binnen één ruwheidsklasse nog steeds kan variëren.
 - b Vegetatiekaarten maar eens in de ca. 6 jaar worden gemaakt, omdat hiervoor luchtfoto's vanuit een vliegtuig gemaakt moeten worden. Binnen deze periode kan vegetatie echter significant veranderen.
 - c Uit onderzoek bekend is dat de ecotopenclassificatie niet 100% correct is. Schattingen van de classificatienauwkeurigheid lopen uiteen van ca. 70 tot 90% (Straatsma en Huthoff 2010).
 - d Met de kalibratie van de (winterbed)ruwheid ook (lokale) fouten in andere modelparameters of de geometrie worden gecompenseerd.Deze aanname kan worden onderzocht door het uitvoeren van een test (zie bijlage A).
- 2 Het aantal onbekenden in de kalibratie kan niet groter zijn dan het aantal metingen, omdat de uitkomst anders onbepaald is. Als we er bijvoorbeeld vanuit gaan dat we kalibreren op x LMW-locaties, dan kunnen we:
 - a Alleen de x ruwheidsklassen kalibreren die het meeste invloed hebben op het modelresultaat (zie gevoeligheidsanalyse paragraaf 0).
 - b De ruwheidsklassen aggregeren zodat we x klassen overhouden. Dit kan bijvoorbeeld op basis van de vegetatielegger.

Een derde mogelijkheid, gebruikt door Duits en Visser (1999) voor de Maas, is het meenemen van het zomerbed als één onbekende in de kalibratie bij hoge afvoeren. Hierbij wordt de zomerbedruwheid als geheel verhoogd of verlaagd, waarbij de ruwheidsverhouding tussen de verschillende trajecten (bepaald bij een afvoer \leq zomerbedvullend) wel behouden blijft. Hierbij wordt dus aangenomen dat deze verhouding niet afhankelijk is van de afvoer.

Los van de kalibratiemethode wordt aanbevolen kritisch te kijken naar het aantal ruwheidsklassen dat momenteel in gebruik is. Mogelijk is de onzekerheid in de ruwheid van de verschillende klassen zo groot dat het aggregeren van ruwheidsklassen geen achteruitgang in modelresultaten oplevert. Ook dit kan worden geverifieerd met een test (bijlage A). Aggregatie wordt in dat geval aanbevolen om schijnnaauwkeurigheid en onnodige complexiteit te voorkomen.

5.4 Prestatie bij kalibratie versus validatie

Zoals genoemd in paragraaf 4.1 is het ten eerste belangrijk een goed onderbouwde prestatie-eis te formuleren voor de kalibratie. De robuustheid in modelresultaten kan worden vergroot door:

- Minder aanpassingen te doen aan de vooraf gedefinieerde ruwheden. Dit kan worden bewerkstelligd door de prestatie-eis minder streng te maken, maar ook door grenzen te definiëren waarbinnen kalibratiefactoren gevarieerd mogen worden.
- In de prestatie-eis meerdere indicatoren (niet alleen bias, maar bijv. ook RMSE) te combineren.

Daarnaast moet uitgezocht worden hoeveel onbekenden in de kalibratie (kalibratiepolygonen en afvoerniveaus) nodig zijn om het gewenste validatieresultaat te behalen.

Dit is in wezen een A-kwadranttest (Berends et al., 2021). Ook dit kan de robuustheid van het model vergroten, terwijl de rekenlast tijdens de kalibratie wordt verkleind. Daar staat tegenover dat de bepaling van het minimaal benodigde aantal onbekenden op zichzelf rekenintensief is.

5.5 Complexiteit en FAIR-principes

Uit de in hoofdstuk 3 en 4 beschreven literatuurstudie blijkt dat de RWS-riviermodellen state-of-the-art zijn, maar ook relatief complex, o.a. wat betreft de kalibratie/validatiemethode. Bij toenemende complexiteit neemt de kans op menselijke fouten echter toe, zowel bij het opzetten van modelschematisaties als het kalibreren/valideren ervan. Dit kan leiden tot een significante verslechtering van de modelprestatie. Onnodige complexiteit moet daarom worden voorkomen. Dat betekent onder andere:

- Selecteer zo weinig mogelijk verschillende perioden (en dus modelschematisaties) voor kalibratie/validatie. Dit kan door o.a. kritisch te kijken naar het aantal benodigde afvoerniveaus (zie paragraaf 0).
- Minimaliseer het aantal stappen in de te doorlopen workflow. Een voorbeeld hiervan is het niet eerst los kalibreren van riviertakken om ze vervolgens samen te voegen.
- Vereenvoudig de modellen waar mogelijk. Zie bijvoorbeeld de aanbeveling om het aggregeren van ruwheidsklassen te testen in paragraaf 5.3.

Daarnaast wordt aanbevolen de FAIR-principes te gebruiken bij het ontwerpen van de kalibratie/validatiemethodiek. FAIR staat voor findable, accessible, interoperable en reusable. Wanneer in- en uitvoer voldoet aan deze principes wordt de kans op fouten verkleind en de herleidbaarheid van resultaten vergroot. Hiervoor is het ten eerste belangrijk dat Deltares en RWS afspraken maken over data-eigenaarschap en de verdeling van verantwoordelijkheden voor het beschikbaar maken en houden van data en modelresultaten. Ook de voor- en nabewerking van data en resultaten moet hierbij herleidbaar zijn.

Daarnaast maakt het zoveel mogelijk automatiseren van de workflow het makkelijker om te voldoen aan de FAIR-principes. Denk daarbij aan:

- Het automatiseren van de sequentiële kalibratie van afvoerniveaus;
- Het automatisch genereren van modelinvoer (bijv. randvoorwaarden);
- Het automatiseren van visualisatie van in- en uitvoer.

Ook duidelijke, toegankelijke documentatie vergroot de herbruikbaarheid van de resultaten en verkleint de kans op onjuist gebruik van de modellen of onjuiste interpretatie van de resultaten. Hierbij kan worden overwogen (ook) in het Engels te rapporteren, om de methode en de resultaten voor een zo groot mogelijke groep mensen begrijpelijk te maken.

6 Conclusies

De kalibratie/validatiemethode voor de RWS-riviermodellen is zeer uitgebreid. In de uitgevoerde literatuurstudie zijn slechts enkele methoden gevonden die qua complexiteit vergelijkbaar zijn met de riviermodellen van de zesde generatie. Met het gebruik van op fysica gebaseerde basisruwheden en een afvoerafhankelijke kalibratie zijn de riviermodellen van de zesde generatie state-of-the-art te noemen. Toch zijn op basis van de literatuurstudie enkele kanttekeningen te maken bij de gebruikte kalibratie/validatiemethode:

- De prestatie-eis tijdens kalibratie is zeer streng (5 mm per station per periode) en wordt gesteld over een vaak korte periode (uren tot dagen). Bij de validatie presteren de modellen beduidend slechter. Dit kan duiden op overfitting. Het is belangrijk een **goed onderbouwde prestatie-eis te formuleren voor de kalibratie**. Een minder strenge eis voor de kalibratie en het combineren van verschillende prestatie-indicatoren (zoals bias en RMSE) kan ervoor zorgen dat het model in andere simulaties, bijvoorbeeld de validatie, beter presteert. Daarnaast moet uitgezocht worden **hoeveel onbekenden in de kalibratie** (kalibratiepolygonen en afvoerniveaus) nodig zijn om het gewenste validatieresultaat te behalen.
- In de RWS-riviermodellen van de zesde generatie is alleen de zomerbedruwheid gekalibreerd. In de literatuurstudie zijn geen andere voorbeelden gevonden van methoden waarbij slechts een gedeelte van de stromende breedte wordt gekalibreerd. Het compenseren van fouten in de schematisatie van het winterbed met het aanpassen van de zomerbedruwheid beïnvloedt de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. Er zijn verschillende mogelijkheden om de **ruwheid van het winterbed te kalibreren**. De eerste, die de minste aanpassing behoeft aan de huidige kalibratiemethode, is het doortrekken van de bestaande kalibratiepolygonen naar het winterbed. Een tweede optie is het definiëren van aparte polygonen in het winterbed. Daarmee wordt het mogelijk om op de afvoerverdeling zomerbed/winterbed te kalibreren (wanneer hiervoor metingen beschikbaar zijn). Ten derde kunnen ruwheidsklassen direct gekalibreerd worden. Hiervoor moeten de ruwheidsklassen in hoge mate geaggregeerd worden, maar het kan een betere stationariteit van modellen opleveren.
- Het kennen en expliciet benoemen van onzekerheden is van belang bij de interpretatie en het gebruik van modelresultaten, zeker als dit gebeurt in de context van wet- en regelgeving (zoals bij RWS-modellen het geval is). Het is daarom opvallend dat hier bij de ontwikkeling van de zesde-generatiemodellen weinig aandacht aan is besteed. Om meer inzicht te krijgen in het effect van verschillende invoerparameters op de modelresultaten wordt een **gevoeligheidsanalyse** aanbevolen als eerste stap. Daarnaast wordt aanbevolen een **roosterconvergentie-analyse** uit te voeren. Hiermee wordt het verband tussen roosterresolutie en modelnauwkeurigheid in beeld gebracht. Vervolgens wordt aanbevolen om de modelkalibratie/validatie zó uit te voeren, dat apart getest kan worden op **extrapolatie, stationariteit en de combinatie daarvan**.
- De huidige kalibratiemethode is gebaseerd op gegevens over waterstanden en afvoerverdeling over de riviertakken. Dit levert goede resultaten op voor toepassingen in het hoogwaterveiligheidsdomein (operationele voorspelling en ontwerp primaire keringen), maar voor maatregelstudies en morfologische/ecologische toepassingen is deze kalibratie onvolledig. Door **meer typen data mee te nemen** in kalibratie en validatie, en **geen abrupte ruwheidsovergangen** toe te staan kan de huidige methode worden verbeterd voor deze toepassingen. Dit helpt daarnaast om de modellen robuuster te maken.
- De grote complexiteit van de RWS-modellen vergroot de kans op menselijke fouten tijdens modelopzet, kalibratie/validatie en gebruik.

Onnodige complexiteit moet daarom worden voorkomen. Daarnaast wordt aanbevolen de **FAIR-principes** te hanteren bij het ontwerpen van de kalibratie/validatiemethodiek. Hiervoor is verdere **automatisering** van de workflow en duidelijkheid over de verdeling van **verantwoordelijkheden** nodig.

Met verschillende experimenten moeten bovenstaande aanbevelingen getoetst en in meer detail uitgewerkt worden.

7 Aanbevelingen

Dit rapport geeft een overkoepelend overzicht van mogelijke verbeteringen van de kalibratie en validatie van riviermodellen voor Rijkswaterstaat. Sommige verbetermogelijkheden bestaan slechts uit kleine aanpassingen aan huidige methoden en vergen weinig werk. Voor andere voorstellen is veel meer tijd (en/of budget) nodig, bijvoorbeeld omdat het gaat om grote onderzoeken of omdat eerst metingen uitgevoerd moeten worden. De bedoeling van dit hoofdstuk is om op een rij te zetten welke aanpassingen of experimenten nu al uitgevoerd kunnen worden en welke zaken mogelijk later. Hierbij wordt ook gelet op een logische volgorde van aanpassingen, zodat latere onderzoeken gebruik kunnen maken van verbeteringen uit eerdere stappen.

7.1 Korte termijn

- Een logische eerste stap is het zoveel mogelijk vereenvoudigen en automatiseren van het kalibratieproces, zodat de kalibratie (en validatie) makkelijk herhaald kan worden in latere onderzoeken. In paragraaf 5.5 is beschreven hoe dit kan worden aangepakt.
- Vervolgens kunnen verschillende variaties op de huidige kalibratie/validatiemethode worden getest. Hierbij kunnen de volgende parameters worden aangepast:
 - De prestatie-eis voor kalibratie met bijbehorende prestatie-indicatoren (zoals bias en standaarddeviatie)
 - Afvoerniveaus
 - Kalibratietrajecten (in het zomerbed)
 - Aantal en lengte van kalibratieperioden
 - KalibratievenstersHet belangrijkste criterium voor het beoordelen van de aanpassingen is in welke mate de robuustheid van het model vergroot wordt. Een maat hiervoor is het verschil in prestatie tussen kalibratie en validatie. Ook rekentijd en complexiteit van de workflow moeten beschouwd worden.
- Andere mogelijke verbeteringen die relatief eenvoudig getest kunnen worden zijn:
 - Het doortrekken van de bestaande kalibratiepolygoon naar het winterbed, zodat ook het winterbed wordt meegenomen in de kalibratie (wanneer het meestroomt).
 - Zomerbedruwheid kalibreren zonder abrupte overgangen. Dit vergt wel aanpassingen in Baseline, zie het voorstel van Becker et al. (2023), maar kan in de testfase met scripts worden opgelost.
 - Vervolgens wordt het makkelijker om op stroomsnelheden en verhanglijnen (of Lidarmetingen) te kalibreren (dit vergt immers ook geleidelijke overgangen in ruwheid). Voor een test zijn hiervoor voldoende meetgegevens beschikbaar, maar voor daadwerkelijke implementatie zijn meer metingen nodig (zie paragraaf 7.2.1).
 - Kalibreren van het winterbed op basis van ruwheidsklassen (na aggregatie).
- Ten slotte kunnen ook de aanbevolen gevoeligheidsanalyse en roosterconvergentie-analyse op relatief korte termijn worden uitgevoerd. Het testen van verschillende opties voor filtering van de zomerbedligging kan hier onderdeel van zijn.

7.2 Lange termijn

Voor een aantal mogelijke verbeteringen van de kalibratie/validatiemethode zijn metingen nodig die nog niet (in voldoende mate) beschikbaar zijn. Paragraaf 7.2.1 bespreekt welke metingen uitgevoerd moeten worden en geeft hierin een prioritering aan. Paragraaf 7.2.2 bevat aanbevelingen die relevant zijn bij de modelontwikkelingen (opzet, kalibratie en validatie) van de volgende (zevende) generatie.

7.2.1 Metingen

- De afvoer door zomer- en winterbed is de belangrijkste variabele waarvoor meer metingen nodig zijn. Paragraaf 5.1 laat zien dat deze variabele voor bijna alle modeltoepassingen relevant is, terwijl we op dit moment niet goed weten hoe goed deze afvoerverdeling in de modellen gerepresenteerd wordt. Metingen van de afvoerverdeling over zomer- en winterbed zijn dus ten eerste relevant om bestaande modellen op te valideren en waar mogelijk te verbeteren. Daarnaast kunnen met deze gegevens verschillende opties voor het kalibreren van winterbedruwheden getest worden (opties 2a en 3b in bijlage A). Hiervoor zijn regelmatige (ADCP-)campagnes nodig waarbij in elk geval de totale afvoer per tak wordt gemeten, en de afvoer door het zomerbed op verschillende plekken langs de tak. Dit moet voor zoveel mogelijk verschillende condities gebeuren. In navolging van Twijnstra et al. (2020) bevelen we aan afvoermetingen in verschillende takken zoveel mogelijk op dezelfde dag uit te voeren, zodat een sluitende waterbalans als extra relatie meegenomen kan worden in de afvoerbepaling. Dit kan helpen nauwkeuriger Qf-relaties te bepalen, wat vervolgens weer leidt tot betere schattingen van de afvoerverdeling zomer/winterbed (wanneer zomerbedafvoer bekend is).
- Voor kalibratie met een geleidelijk verloop van ruwheden langs de tak kan gebruik van verhanglijnen interessant zijn. Verhanglijnen zijn nu beperkt beschikbaar. Aanbevolen wordt om regelmatig en bij zoveel mogelijk verschillende afvoeren verhanglijnmetingen uit te voeren. Wanneer uit een eerste test blijkt dat Lidarmetingen op een vergelijkbare manier gebruikt kunnen worden in de kalibratie kan er ook voor worden gekozen hier meer in te investeren.
- Daarnaast wordt aanbevolen naar nieuwe meettechnieken te kijken, of innovatief gebruik van bestaande metingen. Een voorbeeld, al genoemd in paragraaf 5.1.2, is het afleiden van stroomsnelheid aan het wateroppervlak uit camera- of radarbeelden.

7.2.2 Modelopzet zevende generatie

- De aanbeveling om de FAIR-principes te hanteren bij het opzetten van de kalibratie/validatiemethodiek en de uitvoering daarvan is met name relevant wanneer wordt gestart met de ontwikkelingen voor de zevende generatie. Hierop kan al wel voorgesorteerd worden door de modelontwikkeling van de zesde generatie vast te evalueren aan de hand van de FAIR-principes, zodat verbeterpunten geïdentificeerd kunnen worden. Relevante vragen hierbij zijn:
 - Was voldoende duidelijk wie voor welke data verantwoordelijk was?
 - Zijn modelinvoer en resultaten voldoende toegankelijk?
 - Is alle data herleidbaar en herbruikbaar?
- Voor de zevende generatie wordt aanbevolen de kalibratie- en validatieperioden zó te verdelen dat getest kan worden op extrapolatie, stationariteit en de combinatie daarvan. Het meest logisch is om dit pas te doen wanneer overige verbeteringen aan kalibratie en validatie zijn doorgevoerd.

8 Referenties

- Apel, H., A. H. Thieken, B. Merz, and G. Blöschl. 2004. "Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty." *Natural Hazards and Earth System Science* 4(2): 295–308.
- Bao, Weimin et al. 2018. "A Hydraulic Friction Model for One-Dimensional Unsteady Channel Flows with Experimental Demonstration." *Water (Switzerland)* 10(1).
- Becker, A., Kusters, A., Nunes de Alencar Osorio, A., Chavarrías, V. en Ottevanger, W. (2023). Morphological model for the river Rhine. First model of the Waal branch. Deltares rapport 11209261-003-ZWS-0002.
- Berends, K. (2019). Human Intervention in Rivers. PhD thesis, Universiteit Twente.
<https://doi.org/10.3990/1.9789036548823>.
- Berends, K., Diermanse, F. en de Jong, J. (2021). Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat. Deltares rapport 11206813-018-ZWS-0003.
- Berends, K., Dijkstra, J., Spruyt, A. en Latella, M. (2022). State of the art and research trends in fluvial vegetation resistance modelling. With a focus on implementation in Rijkswaterstaat hydraulic models. Deltares rapport 11208033-018-ZWS-0002.
- Bessar, Mohammed Amine, Pascal Matte, and François Anctil. 2020. "Uncertainty Analysis of a 1D River Hydraulic Model with Adaptive Calibration." *Water (Switzerland)* 12(2).
- Chavarrías, V. (2023). Brute force for assessing model uncertainty. Deltares memo d.d. 20 maart 2023.
- Chow, V.T., 1959, Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill Book Co., 680 p.
- Chu, Kai, Alexander Breugem, Li Wang, and Boudewijn Decrop. 2022. "Automatic Calibration of a Continental Shelf Model of the North Sea Using Data Assimilation Algorithm." : 4637–46.
- Dam, G. et al. 2008. "Long Term Process-Based Morphological Model of the Western Scheldt Estuary." *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007 - Proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics 2*: 1077–84.
- Van der Deijl, E. (2023). Validatie hoogwater Maas juli 2021. Deltares rapport 11208053-002-ZWS-0006.
- Domhof, B.C.A., K.D. Berends, A. Spruyt, and J.J. Warmink. 2018. "Discharge and Location Dependency Calibrated Main Channel Roughness." *RiverFlow*.
- De Doncker, Liesbet et al. 2009. "Determination of the Manning Roughness Coefficient Influenced by Vegetation in the River Aa and Biebrza River." *Environmental Fluid Mechanics* 9(5): 549–67.
- Duits, M.T. en Visser, M. (1999). Inregeling ruwheden WAQUA-model Maas.
- Fread, D.L. 1985. "Channel Routing." In *Hydrological Forecasting*, eds. M.G. Anderson and T.P. Burt. , 437–503.
- Gradussen, B. (2023). Validatie Waalmodel hoogwater 2021. Validatie afvoeren en stroomsnelheden in D-HYDRO. Deltares rapport 11209233-003-ZWS-0023.

- De Jong, J. (2021a). Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014.
- De Jong, J. (2021b). Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren. Zesde-generatie modellering Maas. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0012.
- De Jong, J. en Yossef, M. (2016). Riviermodellen in D-HYDRO – Pilot-applicatie Rijntakken. Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de zesde-generatie modellen van RWS. Deltares rapport 1230071-011-ZWS-0017.
- Kadhim Hameed, Luay, and Salah Tawfeek Ali. 2013. "Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through Calibration Using HEC-RAS Model." *Jordan Journal of Civil Engineering* 7(1): 44–53.
- Keupers, Ingrid, Thuy Nguyen Thanh, and Patrick Willems. 2015. "Modelling the Time Variance of the River Bed Roughness Coefficient for Improved Simulation of Water Levels." *International Journal of River Basin Management* 13(2): 167–78. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2014.999782>.
- Kosters, A., Spruyt, A. en Niesten, I. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0012.
- Kosters, A. en Berends, K. (2022). Validatie Rijntakkenmodellen hoogwater 2018. 2D D-HYDRO en 1D SOBEK.
- Kuriqi, Alban, and Mehmet Ardiçliolu. 2018. "Investigation of Hydraulic Regime at Middle Part of the Loire River in Context of Floods and Low Flow Events." *Pollack Periodica* 13(1): 145–56.
- Lai, Yong G. 2010. "Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh." *Journal of Hydraulic Engineering* 136(1): 12–23.
- van Maren, Dirk Sebastiaan, and Katherine Cronin. 2016. "Uncertainty in Complex Three-Dimensional Sediment Transport Models: Equifinality in a Model Application of the Ems Estuary, the Netherlands." *Ocean Dynamics* 66(12): 1665–79. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-016-1000-9>.
- Matte, Pascal, Yves Secretan, and Jean Morin. 2017. "Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. I: Model Setup, Calibration, and Validation." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 143(5): 1–15.
- Meert, Pieter, Fernando Pereira, and Patrick Willems. 2018. "Surrogate Modeling-Based Calibration of Hydrodynamic River Model Parameters." *Journal of Hydro-Environment Research* 19(March): 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.02.003>.
- Nelson, Alex, Stanford Gibsaon, and Alex Sanchez. 2022. "Development of a Two-Dimensional HEC-RAS Sediment Model for the Chippewa River, Wisconsin, for Software Development and Sediment Trend Analysis." (June): 1–10.
- Parhi, Prabeer Kumar, R. N. Sankhua, and G. P. Roy. 2012. "Calibration of Channel Roughness for Mahanadi River, (India) Using HEC-RAS Model." *Journal of Water Resource and Protection* 04(10): 847–50.
- Spruyt, A., Domhof, B. en De Jong, J. (2023). Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijntakken. Effect nieuwe generatie, modelinstellingen en beno-actualisaties. Deltares rapport 11209233-003-ZWS-0004.
- Straatsma, Menno, and Fredrik Huthoff. 2010. "The Effect of Uncertain Floodplain Roughness in Hydrodynamic Flood Simulations." *Water Resources and Environmental Research* (July).

- Tijssen, A., Becker, A., Stuparu, D. en Yossef, M. (2014). Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper River Area. Deltares rapport 1207807-002-HYE-0009.
- Twijnstra, J. J. et al. 2020. "Water Balance in the Dutch River Rhine and Rating Curve Uncertainty." *River Flow 2020 - Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics* (June): 2171–78.
- Vanlede, J et al. 2009. *Verbetering Randvoorwaardenmodel Deelrapport 2: Afregeling van Het 2D Scheldemodel*.
- Vanlede, J, S Smolders, T Maximova, and M J Teles. 2015. "The Unstructured Scaldis Model: A New 3D High Resolution Model for Hydrodynamics and Sediment Transport in the Tidal Scheldt." *Scheldt Estuary: physics and integrated management - Special Session on of the 36th IAHR WORLD CONGRESS, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands* (July): 100.
- Vidal, Jean Philippe, Sabine Moisan, Jean Baptiste Faure, and Denis Dartus. 2007. "River Model Calibration, from Guidelines to Operational Support Tools." *Environmental Modelling and Software* 22(11): 1628–40.
- Xu, Xingya et al. 2017. "A Real-Time Probabilistic Channel Flood-Forecasting Model Based on the Bayesian Particle Filter Approach." *Environmental Modelling and Software* 88: 151–67.
- Yörük, A (Hydrotec) et al. 2021. *Erstellung Eines Delft3D Flexible Mesh-Modells Der Binnenweser von Hann. Münden Bis Bremen*. Aachen.

A Kalibratie van winterbedruwheden – uitwerking methoden

Voor de kalibratie van winterbedruwheden wordt aanbevolen de drie opties gepresenteerd in paragraaf 5.3 te testen:

- 1 Doortrekken bestaande kalibratiepolygonen naar het winterbed;
- 2 Aparte kalibratiepolygonen in het winterbed
 - a Zomer- en winterbedruwheden bij hoge afvoeren apart kalibreren, op waterstand en stroomsnelheid/afvoerdeling. Voor een eerste test kunnen bijvoorbeeld de ADCP-metingen tijdens het hoogwater 2021 in de Maas en de Waal worden gebruikt.
 - b Bij hoge afvoeren alleen de winterbedruwheden kalibreren, kalibratiefactor in het zomerbed wordt overgenomen van een lager afvoerniveau.
- 3 Ruwheidsklassen in het winterbed direct kalibreren. Dit vergt relatief veel inspanning, maar kan mogelijk veel opleveren. Hiervoor moeten de volgende stappen worden doorlopen:
 1. Herclassificatie van vegetatie in maximaal 10 à 20 klassen, bijvoorbeeld volgens de vegetatielegger (.ttd, _trachytopes.arl);
 2. Definitie van kalibratiepolygonen met één kalibratiefactor per ruwheidsklasse (.cld, _calibration.cll);
 3. Uitvoeren testkalibratie.Ook hierbij bestaat de optie om a) alleen de winterbedruwheden te kalibreren bij hoge afvoeren, of b) ook het zomerbed mee te nemen. In het laatste geval is 1) meer aggregatie van ruwheidsklassen nodig om het aantal onbekenden gelijk te houden, of zijn 2) extra metingen nodig met betrekking tot stroomsnelheden of afvoerdeling zomer/winterbed.

Met het oog op rekestijd wordt aanbevolen de opties te testen met een takmodel van de Rijn en/of een traject van de Maas. Daarbij wordt aanbevolen het gekozen traject ook op de huidige wijze (alleen zomerbed) te kalibreren, zodat de nieuwe opties goed beoordeeld kunnen worden. Vervolgens moeten de gekalibreerde modellen ook gevalideerd worden op een geschikte hoogwaterperiode.

Het verdient aanbeveling de aanpassingen niet meteen te combineren met andere in dit rapport voorgestelde, inhoudelijke verbeteringen (bijv. het versoepelen van de bias-eis tijdens kalibratie). Praktische verbeteringen zoals verdere automatisering van de workflow kunnen wel worden doorgevoerd. Wanneer niet alle drie de opties getest kunnen worden kunnen opties 2a en 3b2 (toevoegen van nieuwe metingen) eerst weggelaten worden.

De testkalibraties kunnen worden uitgevoerd met OpenDA. Daarbij wordt aanbevolen OpenDA zo in te stellen dat aanpassingen die weinig invloed op het resultaat hebben tot een hogere waarde van de kostenfunctie leiden (`weakParameterConstraint="true"`). Dit is een aanbeveling uit de kalibratie van de zesde generatie (zie bijv. Kusters et al., 2022).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl