

Ruimtelijk schaalbare hydrologische modelparameters uit open-source omgevingsdata: een voorbeeld voor de Rijn

RUBEN IMHOFF, WILLEM VAN VERSEVELD, BART VAN OSNABRUGGE EN ALBRECHT WEERTS

Artikel

Ruimtelijk gedistribueerde hydrologische (neerslag-afvoer)modellen vervangen steeds vaker hun gelumpde tegenhangers. Naast de potentie van deze modellen, komen ze met het probleem dat iedere rastercel een set parameterwaarden vereist, wat het kalibreren van deze modellen haast onmogelijk maakt. Hier testen we het gebruik van (pedo)transfer-functies om de parameterwaarden van het conceptuele hydrologische model wflow_sbm te schatten met open-source omgevingsdata. Door gebruik te maken van specifieke opschaalregels per parameter, kunnen de parameters afgeleid worden op de dataresolutie en gebruikt worden op elke gewenste modelschaal. Deze aanpak leidt tot afvoer- en verdampingssimulaties voor het Rijnstroomgebied die goed overeenkomen met afvoermetingen en onafhankelijke verdampingssimulaties. We vinden consistente parametervelden op de vier geteste resoluties (1,2, 2,4, 3,6 en 4,8 km), een vereiste voor een schaalbaar model. Gesimuleerde verdampingsfluxen op deze vier resoluties zijn vergelijkbaar (afwijkingen tot maximaal 30%) en in mindere mate geldt dit ook voor verticale bodemfluxen. Het ontwikkelde wflow_sbm model geeft een systematische onderschatting van de voorjaar- en zomerafvoer in de Alpen, wat te verklaren is door bias in de forcering in de wintermaanden. Een verbeterpunt is de schaalbaarheid van de gesimuleerde afvoer, welke nu alleen schaalbaar is voor de hoofdloop van de Rijn. Een schaalafhankelijke afleiding van het rivier- en laterale drainagenetwerk zou dit in de toekomst moeten voorkomen.

Inleiding

Met het oog op de verwachte hogere winterafvoeren in de Rijn als gevolg van klimaatverandering, is er een toenemende focus op de prestaties en procesrepresentatie van onze operationele hydrologische modellen. Op dit moment wordt het semi-gedistribueerde hydrologische model HBV-96 (Lindström e.a., 1997) operationeel gebruikt door Rijkswaterstaat. De initiële keuze en ontwikkeling van dit model stammen uit de jaren '90 in navolging van de hoogwaters in 1993 en 1995. Binnen het Europese Horizon2020-project IMPREX (Van den Hurk e.a., 2016) werd de focus gelegd op het verbeteren van de procesrepresentatie in hydrologische modellen voor onder andere de Rijn. Dit met het doel om meer vertrouwen te krijgen in zowel onze operationele modellen als het gebruik van deze modellen voor klimaat- en landgebruiksscenario's.

Het gebruik van ruimtelijk gedistribueerde (gerasterde) modellen is een logische stap, omdat deze modellen optimaal gebruik kunnen maken van de hoge resolutie

gerasterde data die tegenwoordig vrij beschikbaar is, soms al op resoluties kleiner dan 1 km. Denk daarbij aan de meteorologische forcering, satelliet vegetatie- en landgebruiks-informatie, en bodemkaarten.

Deze transitie vindt echter niet probleemloos plaats. In gedistribueerde hydrologische modellen heeft iedere rastercel een set parameterwaarden en om iedere cel representatief voor zijn omgeving te maken, wordt het vinden van de juiste parameterwaarden een vrijwel onmogelijk multidimensionaal probleem. Een interessante ontwikkeling is de Multischaalbare Parameter Regionalisatie (MPR) methodiek (Samaniego e.a., 2010). In deze aanpak worden regionalisatiefuncties geselecteerd; functies met gekalibreerde coëfficiënten en variabelen in de vorm van hoge resolutie omgevingsdata, bijvoorbeeld organisch stofgehalte, zandfractie, bladoppervlakte-index (leaf area index, LAI) etc. Met een regionalisatiefunctie worden vervolgens de parameterwaarden per cel geschat aan de hand van afgeleide relaties tussen de parameter en omgevingsfactoren. Op deze manier worden niet alle parameters per cel gekalibreerd, maar worden de coëfficiënten van een set regionalisatiefuncties gekalibreerd. Dit verlaagt het kalibratieprobleem aanzienlijk en een bijkomend voordeel is dat afgeleide regionalisatiefuncties in theorie ook toepasbaar zijn in andere, niet-bemeten, gebieden.

In de MPR-methodiek worden de coëfficiënten van de regionalisatiefuncties op de dataresolutie afgeleid, welke vaak een fijnere resolutie heeft dan het model. Een tweede stap in de MPR-methodiek is dan ook om de parameterelden op te schalen naar de modelresolutie middels opschaalprocedures. Het is aangetoond dat deze tweestapsprocedure ervoor zorgt dat modelresultaten vergelijkbaar blijven tussen verschillende ruimtelijke resoluties, wat niet het geval is wanneer parameters afzonderlijk worden afgeleid voor elke resolutie (Samaniego e.a., 2010). Wat overblijft voor de modelleur is het vinden van de juiste regionalisatiefuncties en het kalibreren van bijbehorende coëfficiënten. In een recente versie van dit werk (Rakovec e.a., 2016) zijn dit toch nog 53 coëfficiënten. Deze worden dan wel voor het hele domein gekalibreerd op basis van meerdere afvoerpunten in het domein en eventueel andere informatie zoals geschatte actuele verdamping.

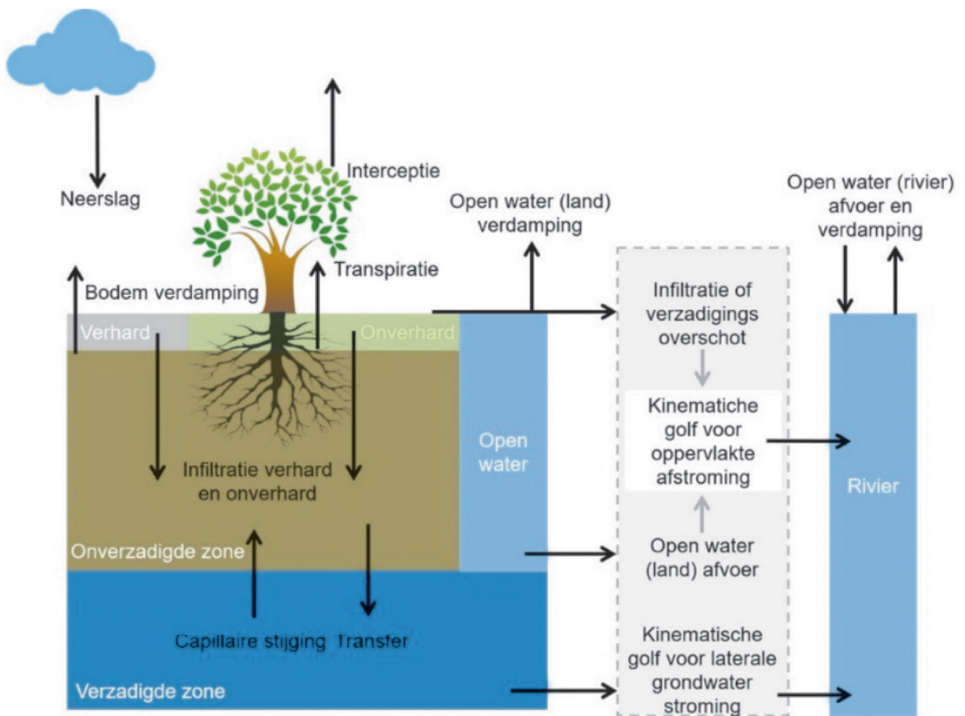
Om dit aantal nog verder te verlagen, zouden zogenaamde (pedo)transferfuncties (PTFs) gebruikt kunnen worden als regionalisatiefunctie. Dit zijn empirische relaties tussen fysische bodemeigenschappen, zoals de porositeit, en eerder genoemde omgevingsfactoren (zandfractie, organisch stofgehalte, etc.). De coëfficiënten van de regionalisatiefunctie zijn dan 'bekend'. Een bijkomend voordeel is dat PTFs in het laboratorium zijn afgeleid en daardoor niet modelafhankelijk zijn. Van Looy e.a. (2017) geven een goed overzicht van de grote hoeveelheid PTFs die over de afgelopen tientallen jaren zijn afgeleid. In feite is dit dan ook niet een nieuwe gedachte, maar eerder een herontdekking van een traditioneel idee met de huidige generatie ruimtelijke data, ruimtelijk hydrologische modellen en inzichten in het schalen van parameters tussen ruimtelijke resoluties.

In dit onderzoek testen we het gebruik van een geselecteerd aantal PTFs om de parameterwaarden van het ruimtelijk gedistribueerde hydrologische model `wflow_sbm` (Schellekens e.a., 2020) te schatten voor het Rijnstroomgebied. Daarbij gebruiken

we geen verdere kalibratie van de parameters of regionalisatiefunctie-coëfficiënten. Op deze manier is de parametrisatie niet modelafhankelijk en kunnen we ons beter op de modelprocessen richten. We evalueren deze aanpak aan de hand van drie vragen: (1) Kunnen we alle gevoelige parameters van `wflow_sbm` schatten met PTFs? (2) Wat is de kwaliteit van dit model op de hoogste resolutie (1,2 km)? (3) Leidt deze aanpak tot een schaalafhankelijk model met consistente gesimuleerde fluxen op de geteste modelresoluties?

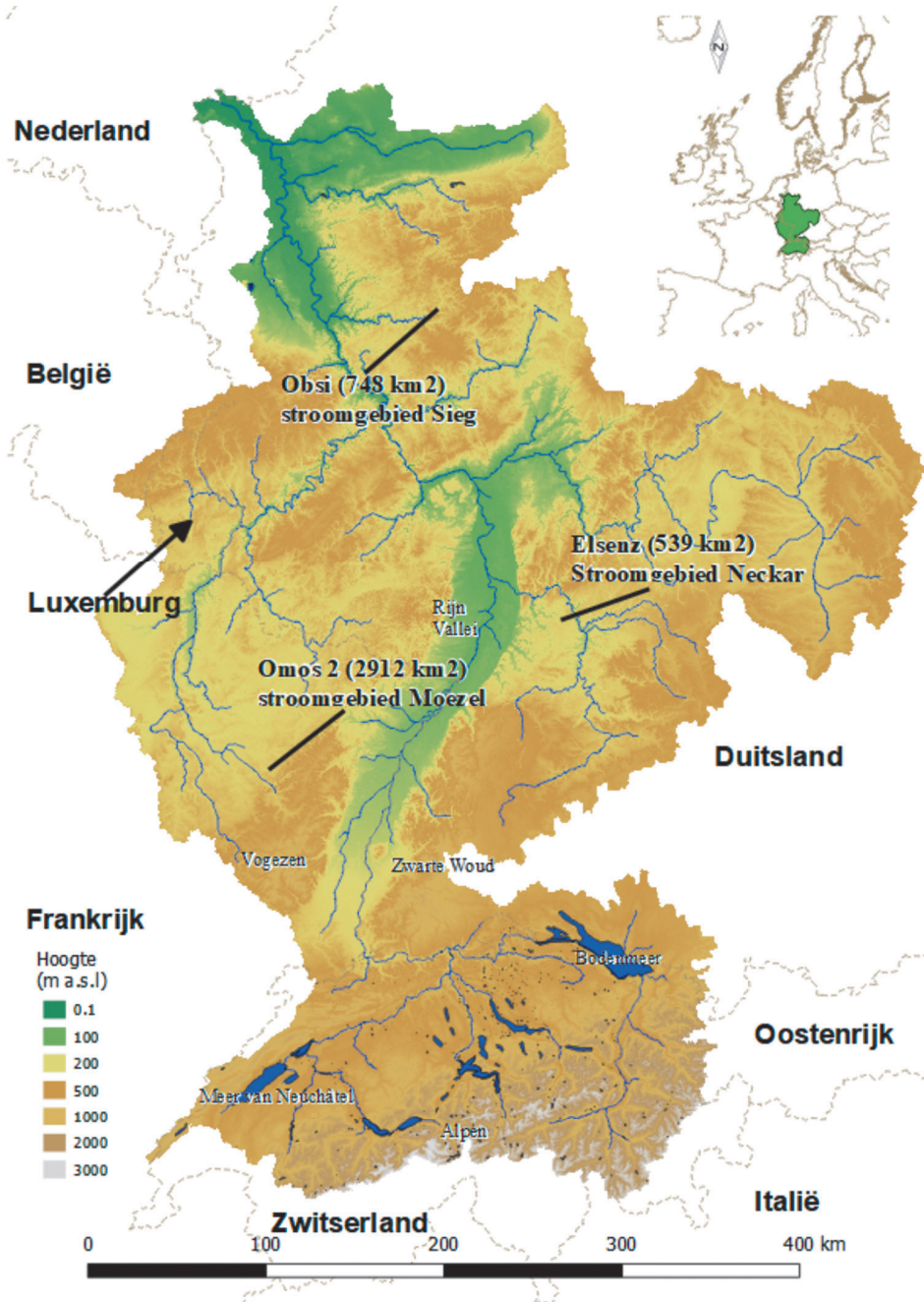
Procesbeschrijving en parametrisatie van het hydrologisch model `wflow_sbm`

`wflow_sbm` is een hydrologisch model op basis van het `wflow`-framework ontwikkeld door Deltares. De modeltaal is Python-PCRaster, wat momenteel wordt omgezet in Python-Julia. Het modelconcept is gebaseerd op `Topog_SBM` (Vertessy en Elsenbeer, 1999) en is in feite een bakjesmodel waarin meerdere lagen in de grond kunnen worden gedefinieerd. In tegenstelling tot `Topog_SBM`, vindt in `wflow_sbm` een kinematische golf-implementatie plaats voor laterale grond- en oppervlaktestroming, en rivierstroming, op een PCell D8 netwerk (Karszenberg e.a., 2010). Wat betreft de kinematische golf implementatie is `wflow_sbm` vergelijkbaar met G2G (Bell e.a., 2007) en TOPKAPI (Todini en Ciarapica, 2002). Een voordeel van `wflow_sbm` is dat de parameters een vereenvoudigde representatie geven van fysische bodem- en vegetatieprocessen, waardoor de toepassing van PTFs gemakkelijk wordt. In het model is de bodem gescheiden in een verzadigde en onverzadigde zone per bodemlaag, waarbij de wateruitwis-



Afbeelding 1 Een schematisch overzicht van de fluxen en processen die gerepresenteerd zijn in het conceptuele hydrologische model `wflow_sbm` (Schellekens e.a., 2020).

seling tussen deze zones wordt gesimuleerd met de Brooks-Corey vergelijking (Brook en Corey, 1964). Verder simuleert het model verdampings- en interceptiefluxen met bijbehorende reductie in droge situaties, en worden ijs-aangroei en -smeltprocessen in de gletsjers in de Alpen meegenomen.



Afbeelding 2 Het Rijnstroomgebied met daarin de drie sub-stroomgebieden Obsi, Omos 2 en Elsenz, welke in de gevoeligheidsanalyse en de resultaten worden gebruikt.

Om de schaalbaarheid van de parametrisatie te testen, hebben we wflow_sbm afgeleid op vier ruimtelijke resoluties (1,2; 2,4; 3,6 en 4,8 km). De hoogste modelresolutie (1,2 km) is gebaseerd op de resolutie van de beschikbare meteorologische forcering, welke als input dient voor het model. Deze dataset, bestaande uit hoge resolutie data van neerslag, potentiële verdamping en temperatuur, is als onderdeel van het IMPREX-project gecreëerd door Van Osnabrugge e.a. (2017, 2019). Verder zijn er vier bodemlagen (0-10, 10-40, 40-120, 120 – 200 cm, of tot maximaal de diepte van gesteente of een ondoorlatende laag) toegepast.

Parametrisatie en opschaalmethodes

Zoals vermeld in de inleiding, zijn PTFs gebruikt voor de schatting van de parameters voor het Rijnstroomgebied (zie Tabel 1 voor de gebruikte modelparameters). In Imhoff e.a. (2020) wordt de volledige lijst met gebruikte functies getoond. Een belangrijk aspect in het toepassen van deze PTFs is de aanwezigheid van hoge resolutie omgevingsdata, zoals bijvoorbeeld de ISRIC SoilGrids database (Hengl e.a., 2017). Met de PTFs en de hoge resolutie omgevingsdata als variabelen, hebben we parameters afgeleid op de dataresolutie (vaak 100, 250 of 300 m). Daarna zijn deze parametervelden opgeschaald naar de vier modelresoluties. Voor bijna alle parameters is het aritmetisch gemiddelde (ook wel rekenkundig gemiddelde genoemd) hiervoor gebruikt, waarbij de gemiddelde parameterwaarde wordt gebruikt van de rastercellen die in de grotere, opgeschaalde rastercel vallen. De fractie van de cel die in de opgeschaalde cel valt, wordt hierin meegenomen. Enkel de verzadigde doorlatendheid (*KsatVer*) en de *c*-parameter, de exponent in de wateruitwisseling tussen verzadigde en onverzadigde zones in de Brooks-Corey vergelijkingen, worden opgeschaald met het aritmetisch gemiddelde van de natuurlijke logaritme vanwege hun lognormale verdeling.

Experimentele aanpak

Om de modelopzet te testen, hebben we het model voor de Rijn gedraaid van 1998 tot en met 2015, met een tijdstap van zes uur.

Gevoeligheidsanalyse

We zijn begonnen met een gevoeligheidsanalyse om de gevoelige modelparameters te identificeren en daaruit op te kunnen maken of we alle gevoelige parameters kunnen schatten met beschikbare PTFs. De gebruikte analyse was een zogenaamde Latin Hypercube One-factor-At-a-Time-analyse (Van Griensven e.a., 2006) met 100 LH-punten (dit is een systematische selectieprocedure, waardoor de aanpak efficiënter wordt). De LH-OAT is toegepast voor drie bovenstroomse stroomgebieden in de Rijn voor de periode oktober 2014 tot en met december 2015. De drie stroomgebieden zijn: Obsi (in het Sieg-stroomgebied), Omos 2 (Moezel) en Elsenz (Neckar), zie Afbeelding 2.

Modelvalidatie

De kwaliteit van het model in het al dan niet juist simuleren van fluxen is op twee manieren beoordeeld. Ten eerste hebben we de gesimuleerde rivierafvoer vergeleken met afvoermetingen van 174 verschillende stations in het Rijnstroomgebied. Daarbij hebben we ook de waterstanden van de acht grootste meren in Zuid-Duitsland en Zwitserland gevalideerd. Ten tweede vergelijken we

gemodelleerde verdamping met onafhankelijk geschatte verdampingsfluxen van het DMET product van de Land Surface Analysis Satellite Application Facility (Trigo e.a., 2011). DMET is een fysisch-gebaseerd bodem-vegetatie-atmosfeer-uitwisselingsmodel waarmee onder andere verdampings-schattingen voor Europa en Afrika worden berekend. Het is daarmee gebaseerd op andere principes en data wat deze model-model vergelijking van verdamping nuttig maakt.

Voor de validatie van de afvoer- en evapotranspiratiesimulaties, hebben we de Kling-Gupta efficiency (KGE) score gebruikt (Gupta e.a., 2009). Deze score is een combinatie van drie scores:

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1) + (\alpha - 1) + (\beta - 1)} \quad (1)$$

Waarbij:

ρ : Pearson's correlatie.

α : $\sigma_{sim} / \sigma_{obs}$, maat voor de relatieve variabiliteit in de gesimuleerde en geobserveerde waarden.

β : De afwijking (bias).

De score gaat van 1, een perfecte fit tussen model en observaties, naar $-\infty$. Bij een KGE van -0,41 presteert het model even goed als wanneer de gemiddelde afvoer als voorspelling zou worden gebruikt (Gupta e.a., 2009; Knoben e.a., 2019).

Schaalbaarheid model

Het juist opschalen van de geschatte parameterelden naar de modelresoluties zou, in theorie, moeten leiden tot een schaalbaar model. Om dit te testen, hebben we (1) de gemiddelde parameterwaarden en de standaard deviaties daarvan vergeleken voor de vier resoluties, en (2) de relatieve fout berekend tussen de gesimuleerde fluxen op de hoogste resolutie (1,2 km) en de grovere resoluties.

Resultaten

Gevoeligheidsanalyse

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de volgende negen parameters regelmatig of zelfs altijd in de top 5 meest gevoelige parameter per stroomgebied voorkomen: *c*, *Kext*, *KsatHorFrac*, *M*, *RootingDepth*, *SI*, *Swood*, θ_s en *TT* (Tabel 1). Voor zeven van deze parameters hebben we een PTF uit de literatuur, maar voor *KsatHorFrac* (een factor toegepast op de verticale doorlatendheid voor schatting van de horizontale verzadigde doorlatendheid) en *TT* (de temperatuur waarop neerslag als sneeuw valt) is er geen PTF beschikbaar. Beide parameters zijn erg conceptueel en daardoor lastig te linken aan omgevingsfactoren.

Om geen verdere kalibratie nodig te hebben, zijn beide parameters vastgezet op een specifieke waarde die gebaseerd is op de literatuurwaarden. Voor *KsatHorFrac* is dit 250 (Todini en Ciarapica, 2002; Bell e.a., 2007) en voor *TT* is dit 1,3 °C (Tobin e.a., 2013).

Opvallend is de hoge gevoeligheid van de interceptieparameters, voornamelijk *Swood* (de houtfractie van de vegetatie). Deze parameters hebben een directe invloed op de actuele verdamping en daarmee ook indirect op (de vertraging in)

de afvoer. Belangrijk om te vermelden is dat alle drie de stroomgebieden een hoge bebossingsgraad hebben, waardoor het effect van deze parameters sterker naar voren komt.

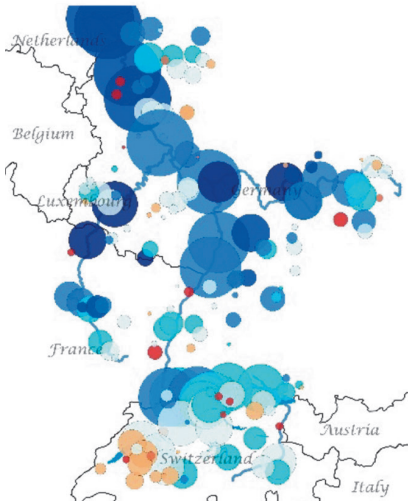
Tabel 1 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse met daarin de relatieve rank (van hoog naar laag) van de parameters. De rank 1 geeft dus de gevoeligste parameter weer op basis van de afvoer- (Q) dan wel verdampingsfluxen (ET). De top 5 is grijs gekleurd en met een vinkje is aangegeven of de parameter een toegepaste PTF heeft.

Parameter		Stroomgebied						
		Elsenz		Obisi		Omos 2		PTF
Naam	Betekenis	Q	ET	Q	ET	Q	ET	
<i>Bodemparameters</i>								
c	Coëfficiënt in Brooks-Corey vergelijkingen	15	5	15	8	15	8	✓
KsatHor-Frac	Horizontale verz. factor toegepast op KsatVer	6	11	7	9	5	12	
KsatVer	Verticale verzadigde doorlatendheid	6	12	9	11	9	14	✓
M	Exponentiële afname KsatVer met de diepte	4	1	3	1	6	1	✓
SoilThickness	Bodemdiepte	10	8	12	6	12	9	✓
θ_r	Rest porositeit	13	10	14	12	13	10	✓
θ_s	Verzadigde porositeit	8	4	10	5	11	7	✓
<i>Transpiratieparameters</i>								
CapScale	Factor in de capillaire stijgingsmodule	17	17	17	17	17	17	
Rootdist-par	Krommingswaarde van raakpunt tussen wortels en grondwater	16	16	16	16	16	16	
Rooting-Depth	Worteldiepte	14	2	13	3	14	2	✓
<i>Interceptieparameters</i>								
Kext	Extinctiecoëfficiënt in de bladerdek-dichtheidsvergelijking	5	9	5	10	4	6	✓
SI	Specifieke berging blad	3	6	4	7	2	5	✓
Swood	De houtfractie van de vegetatie	1	3	2	2	1	3	✓
<i>Verticale fluxuitwisseling</i>								
Infilt-CapPath	Infiltratiecapaciteit van stedelijke gebieden	17	17	17	17	17	17	
Infilt-CapSoil	Infiltratiecapaciteit van de bodem	17	17	17	17	17	17	
Max-Leakage	Wegzijing	9	13	11	15	10	15	
PathFrac	Fractie stedelijk gebied	17	17	17	17	17	17	✓
<i>Routingparameters</i>								
N	Manning's N voor stroming over land	17	17	17	17	17	17	✓
N_River	Manning's N voor rivierafvoer	17	17	17	17	17	17	✓
<i>Sneeuwparameters</i>								
TT	Temperatuur waarop neerslag valt als sneeuw	2	7	1	4	3	4	
TTI	Smelt- en vriestemperatuur	11	14	8	13	7	11	
WHC	Fractie water opgeslagen in sneeuwvolume	12	15	6	14	8	13	

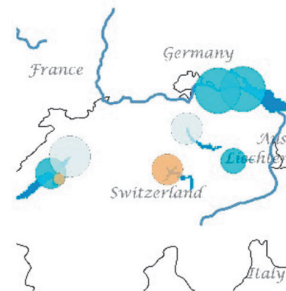
Modelvalidatie

Als we de kwaliteit van de gesimuleerde modelafvoeren bekijken (Afbeelding 3a), dan valt meteen op dat gesimuleerde afvoeren redelijk overeenkomen met de observaties voor de hoofdloop van de Rijn (goed te herkennen aan de grote bollen) en de zijstromen van de Rijn in het centrale en benedenstroomse gebied

a) **KGE per rivier**



b) **KGE per meer**



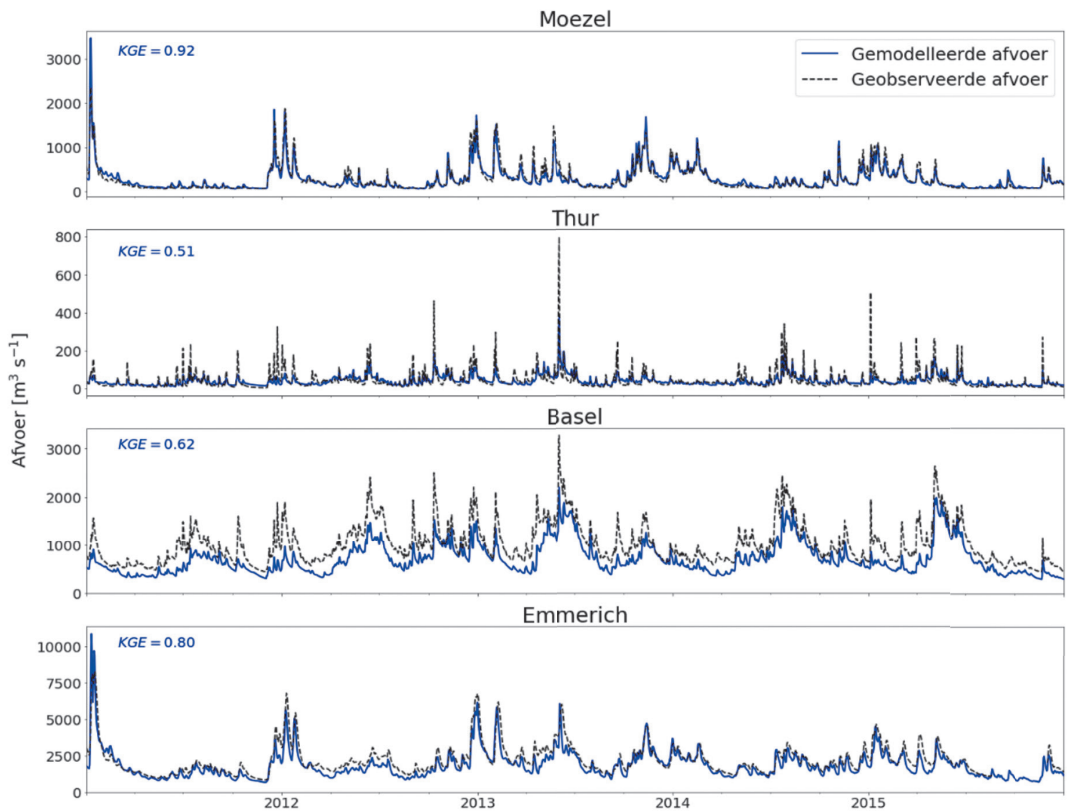
Afbeelding 3 Vergelijking tussen geobserveerde en gesimuleerde rivierafvoeren (a) en meerwaterstanden (b) voor de volledige simulatieperiode. De KGE is gebruikt als een maat voor de overkomst tussen observaties en simulaties. De grote van de bollen is een relatieve maat voor de grootte van de rivierafvoer en de hoogte van de waterstand.

(bijvoorbeeld de Moezel, Main en Ruhr). In dit gebied variëren de KGE-waarden over het algemeen tussen de 0,6 en 0,9, met een KGE van 0,82 nabij Lobith (0,80 nabij Emmerich, zie ook Afbeelding 4), wat duidt op een vrij goede overeenkomst tussen model en observaties.

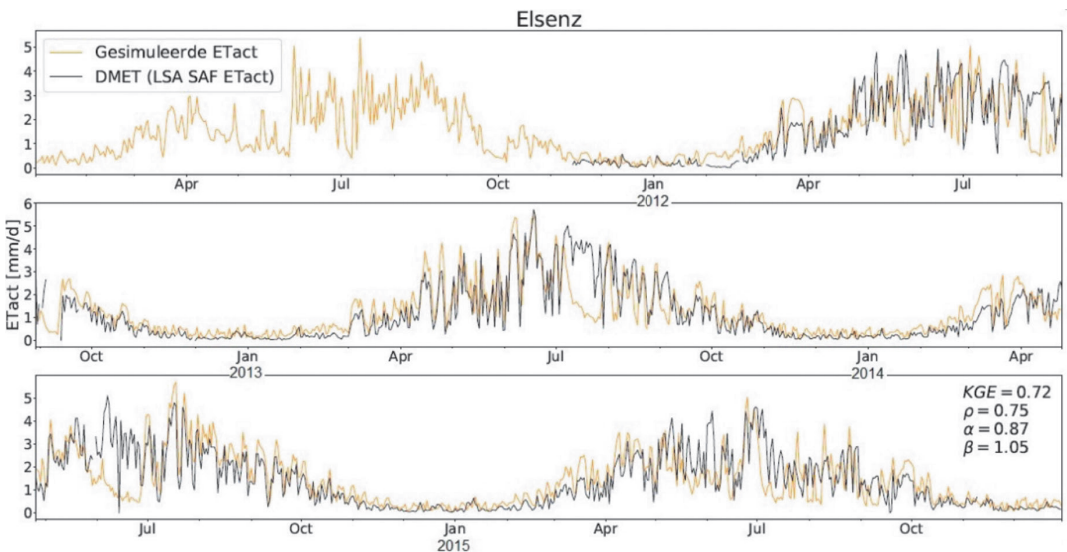
Dit beeld is echter anders in een deel van de Alpen (voornamelijk in het westen van Zwitserland). Hier vindt een systematische onderschatting plaats van de afvoerfluxen, oplopend tot $500 - 1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nabij Basel (Afbeelding 4). Dit is ook terug te zien in de KGE-waarden van de waterstandsimulaties voor de meren (vaak lager dan 0,6 in dit gebied). Een aantal processen die mogelijk tot dit effect kunnen leiden, worden kort aangestipt in de discussie.

Afbeelding 5 toont dat de simulaties van dagelijkse evapotranspiratie aardig overeenkomen met het DMET product voor het Elsenz stroomgebied (KGE = 0,72). Dit geldt ook voor de stroomgebieden Obsi (KGE = 0,72) en Omos 2 (KGE = 0,62). Een opvallende uitschieter voor de Elsenz is de aanzienlijk lagere gesimuleerde actuele verdamping van wflow_sbm in juli-augustus 2013, vergeleken met DMET. In deze periode was het erg droog en leidde de ondiepe bodems in combinatie met de geschatte worteldiepte tot mogelijk te lage actuele verdampingswaarden. De schattingen van het DMET product lijken echter ook te hoog vergeleken met schattingen van de DWD voor dit gebied, waarin ook een afnemende trend te zien is (DWD Climate Data Center, 2019).

Ruimtelijk komen de wflow_sbm simulaties en de DMET-schattingen echter minder overeen, met vooral verschillen in het Rijndal en omliggende heuvelruggen (hier niet getoond, maar zie Afbeelding 5 in Imhoff e.a., 2020).



Afbeelding 4 Hydrografen van geobserveerde (zwart) en gesimuleerde rivierafvoeren (blauw) voor de Moezel, de Thur en twee punten in de hoofdloop van de Rijn (Basel en Emmerich).



Afbeelding 5 Tijdsreefs van stroomgebiedsgemiddelde gesimuleerde dagelijkse evapotranspiratie voor de Elsenz (groen). Deze waarden zijn vergeleken met de DMET-schattingen (zwart).

Concluderend: de modelsimulaties komen vrij goed overeen met onafhankelijke afvoermetingen en evapotranspiratieschattingen in DMET. Er zijn echter voornamelijk in het Zwitserse deel van de Alpen systematische afwijkingen in de modelafvoeren aanwezig.

Schaalbaarheid model

Voor een schaalbaar model moeten de parameterelden naadloze overgangen tonen (niet het geval wanneer de parameters per sub-stroomgebied worden afgeleid) en consistente waarden hebben op verschillende resoluties. Voor de verticale doorlatendheid (K_{satVer}) en de verzadigde porositeit (θ_s), zijn de parameterwaarden op het eerste oog hetzelfde voor de vier resoluties (Afbeelding 6). Dit zou niet het geval zijn wanneer de parameters direct op de modelresolutie worden afgeleid (een mooi voorbeeld hiervan is weergegeven in Samaniego e.a., 2010). De verdelingen van de parameterwaarden in Afbeelding 6 blijven ook nagenoeg gelijk, met een constant gemiddelde en standaard deviatie voor θ_s (Afbeelding 6m - 6p) en enkel een lichte afname in het gemiddelde (van 6,31 naar 6,30 log mm d⁻¹) en de standaard deviatie (van 1,01 naar 1,00 log mm d⁻¹) voor K_{satVer} (Afbeelding 6e - 6h).

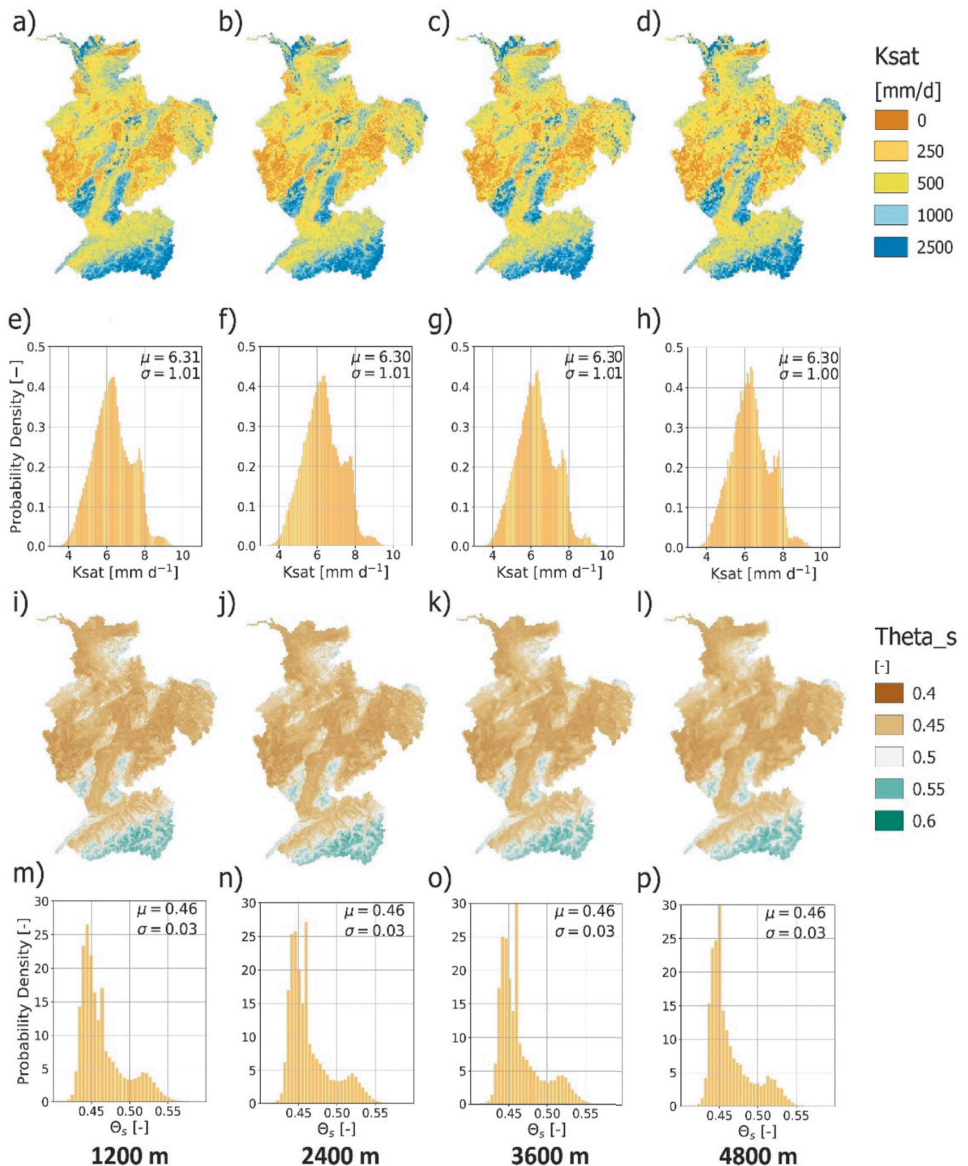
Het resultaat hiervan is dat de gesimuleerde evapotranspiratiefluxen behouden blijven op de vier geteste resoluties (Afbeelding 7a - 7j). De relatieve fout tussen de grovere resoluties en de fijnste resolutie is meestal kleiner dan 10% (Afbeelding 7e - 7g), met een enkele uitzondering van rond de 30%. Dit vindt voornamelijk plaats in gebieden met relatief lage verdampingsfluxen, zoals de Alpen, wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de afwezigheid van juist opgeschaalde parameterwaarden voor de gletsjer- en sneeuwparameters. Veel van deze variabiliteit vindt echter binnen individuele rastercellen plaats en toont geen ruimtelijk patroon. Als we de sub-stroomgebiedsgemiddelde verdamping op de vier resoluties met elkaar vergelijken (Afbeelding 7h - 7j), dan wordt de relatieve fout nagenoeg nul.

Voor de verticale stroming in de bodem, is het fluxbehoud op de vier resoluties minder sterk aanwezig met relatieve fouten rond de 30% en uitschieters tot meer dan 50%. De meeste fouten komen voor in het gebied van de Rijnvallei, rond de hoofdloop van de Rijn, maar bijvoorbeeld ook rond de Main en Moezel. De absolute fout is echter vaak vrij laag in deze gebieden (circa 0,1 mm d⁻¹) en vindt voornamelijk plaats door een verandering van netto opwaartse stroming naar netto wegzijging (of andersom). We verwachten dat dit veroorzaakt wordt door problemen in het opschalen van het drainagenetwerk (zie de paragraaf hieronder). Gelijkelijk aan de gesimuleerde evapotranspiratiefluxen, zijn ook hier de sub-stroomgebiedsgemiddelde fluxen beter behouden op de vier resoluties (Afbeelding 7r - 7t).

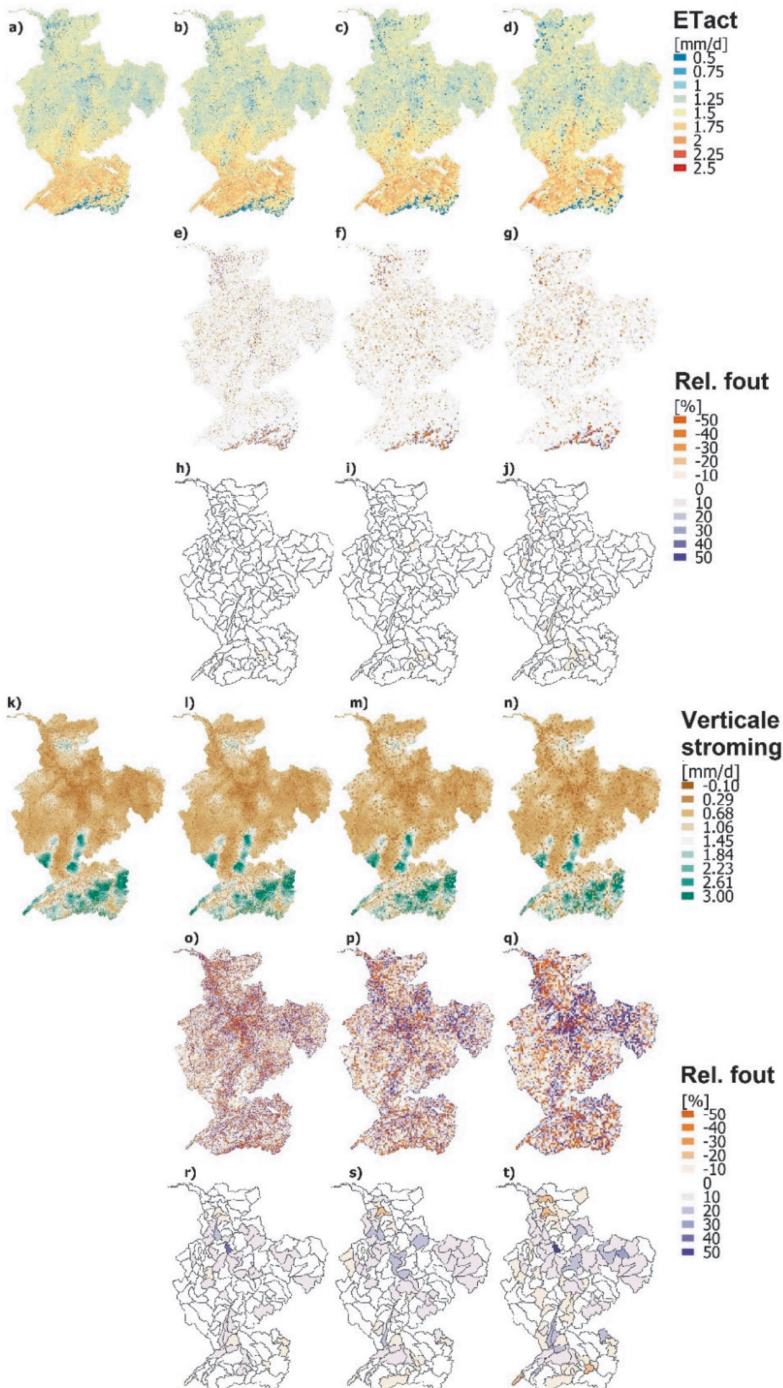
Fluxbehoud vinden we echter niet voor de gemodelleerde laterale (grondwater) stromingen en rivierafvoeren (hier niet getoond, maar zie Afbeelding 9 en S7 in Imhoff e.a., 2020). De rivierafvoeren in de hoofdloop van de Rijn zijn wel consistent op de vier resoluties, maar dit is niet het geval voor kleinere zijstromen. We verwachten dat dit veroorzaakt wordt doordat de rivier- en drainagenetwer-

ken nog niet schaalonafhankelijk worden afgeleid. Vooral waar het netwerk een hoge dichtheid heeft, geeft dat problemen.

Kortom, de geteste aanpak leidt tot consistente parameterelden op verschillende resoluties. Dit resulteert in behouden fluxsimulaties op vier geteste resoluties voor de evapotranspiratie en in mindere mate voor de verticale bodemfluxen. Laterale (grond)waterstromingen en rivierafvoeren worden echter



Afbeelding 6 Parameterschattingen op de vier resoluties met daaronder histogrammen die de verdeling van de parameterwaarden weergeven voor (a-h) de horizontale doorlatendheid (Ksat-Ver) en (i-p) de verzadigde porositeit (θ_s). In de histogrammen van KsatVer (e-h) zijn de lognormale-waarden van de parameter weergegeven.



Afbeelding 7 Gemodelleerde dagelijks gemiddelde evapotranspiratie op de vier resoluties: (a) 1,2, (b) 2,4, (c) 3,6 en (d) 4,8 km. (e-g) De relatieve fout tussen een van de grovere resoluties (b-d) en de modelwaarden op de hoogste resolutie (a). Daaronder (h-j), dezelfde relatieve fout, maar dan van de sub-stroomgebiedsgemiddelde fluxen. Idem voor (k-t), maar dit zijn de waarden voor de verticale fluxen.

nog niet goed behouden, naar verwachting door het niet schaalonafhankelijk afleiden van de rivier- en drainagenetwerken.

Discussiepunten

We zijn van mening dat de overgang naar ruimtelijk gedistribueerde modellen veel voordelen met zich meebrengt, ook met het oog op studies naar landgebruiks- en klimaatverandering. Zoals vermeld, komt deze overgang wel met een enorme uitdaging op het gebied van modelparametrisatie. Ook moet het nut van een fijnmazig model worden afgewogen tegen hogere kosten in reken capaciteit om dat model te kunnen draaien. Met de hier gepresenteerde aanpak proberen we een nieuwe kijk te geven op het parametriseren van hydrologische modellen door gebruik te maken van literatuur PTFs en opschaalprocedures. Door te letten op de schaalbaarheid, wordt het mogelijk om dynamisch keuzes te maken over de gewenste ruimtelijke resolutie.

Bij het gebruik van deze PTFs is het belangrijk om je bewust te zijn van de schaal waarop deze functies origineel zijn afgeleid in het laboratorium, vaak zo'n 100 cm³. De vraag is dan ook of het überhaupt mogelijk is om deze functies te gebruiken op dataresoluties van 100 x 100 meter of meer (Samaniego e.a., 2017; Van Looy e.a., 2017). Met een constante toename in de beschikbaarheid van hoge resolutie omgevingsdatasets is dit in ieder geval het proberen waard. Zeker wanneer hydrologische modellen ook steeds beter worden in het representeren van fysische processen. De huidige resultaten met wflow_sbm zijn hoe dan ook veelbelovend.

Een voordeel van de (pedo)transferaanpak is dat het de focus verplaatst van kalibratie en modelprestaties naar procesrepresentatie en bijbehorende limieten. Verbeterpunten van een model kunnen op deze manier makkelijker worden geïdentificeerd. In vervolgstudies zou er zeker ook gekeken moeten worden naar de modelgevoeligheid van de PTF-keuze (er zijn er genoeg beschikbaar in de literatuur). Enkele benodigde model- en procesverbeteringen, worden hieronder kort toegelicht.

Verbeterde afvoersimulaties

De afvoersimulaties voor de Alpen behoeven nog verbeteringen. Aan de hand van de resultaten en verdere tests, zien we vijf verbeterpunten:

1. De representatie van de meren. In de huidige opzet worden de afvoeren van de meren expliciet gemodelleerd met reservoiroperatieschema's, wat voor de meeste meren werkt, maar voor een aantal lijken de schema's niet overeen te komen met de werkelijk gehanteerde schema's.
2. De wflow_sbm modelparameters die nog een hoge mate van conceptualisatie hebben, zoals de sneeuw- en gletsjerparameters, en de factor op de horizontale verzadigde doorlatendheid. Die laatste compenseert nu voor meerdere processen in de bodem (anisotropie, preferente stroming) en modelresolutie (stromingslengte naar rivier). Deze parameters hebben een PTF of gekalibreerde regionalisatiefunctie nodig (bijvoorbeeld Kumar e.a., 2013), om ze ook ruimtelijk gedistribueerd mee te kunnen nemen. Lagere waarden voor *KsatHorFrac* geven in ieder geval aanzienlijk betere resultaten in de Alpen (zie ook Afbeelding S9 in Imhoff e.a., 2020).

3. De gebruikte meteorologische forcering. Voornamelijk in het Zwitserse deel van de Rijn is de regenmeterdichtheid niet afdoende voor de hoge neerslagvariabiliteit in de Alpen. Dit wordt ook vermeldt in Van Osnabrugge e.a. (2017) en is een belangrijke reden voor de systematische afvoeronderschatting.
4. De modelresolutie. We verwachten dat met een hogere modelresolutie de variabiliteit in hydrologische processen in de Alpen beter kan worden gepresenteerd.
5. Het beter afleiden en opschalen van de rivier- en drainagenetwerken (zie de volgende paragraaf).

Schaalbaarheid model

Om wflow_sbm volledig schaalbaar te maken, is het noodzakelijk om ook de rivier- en drainagenetwerken juist op te schalen. Dit zou een structurele verandering betekenen in de huidige geautomatiseerde afleiding van deze netwerken, iets wat tot nu toe plaatsvindt met behulp van PCRaster (Karssenbergh e.a., 2010). Idealiter worden deze processen gerepresenteerd op een subgridschaal, omdat lokale laterale stromingsrichtingen de werkelijke processen waarschijnlijk niet meer juist representeren op bijvoorbeeld 1,2 x 1,2 km, vooral voor kleine bergachtige stroompjes. In de literatuur zijn nog geen goede voorbeelden van een dergelijke aanpak voor een model dat ook laterale (grond)waterstromingen meeneemt. Voor wflow_sbm is onderzoek hiernaar inmiddels in gang gezet.

Conclusies

De stap naar hoge resolutie ruimtelijk gedistribueerde hydrologische modellen vraagt om een nieuwe kijk op modelparametrisatie, omdat kalibratie van alle parameters per rastercel simpelweg een vrijwel onmogelijk multidimensionaal probleem is. In deze studie hebben we de parameterwaarden voor het conceptuele hydrologische model wflow_sbm geschat met zogenaamde (pedo)transferfuncties (PTFs). Dit zijn empirische vergelijkingen met omgevingsfactoren, welke vaak op hoge resolutie vrij beschikbaar zijn. Deze functies hebben we toegepast volgens de hoofdlijnen van de Multischaalbare Paramater Regionalisatie methodiek (MPR; Samiego e.a., 2010), wat vereist dat de parameters op de dataresolutie afgeleid worden, gevolgd door een opschalingsstap naar de modelresolutie.

Deze aanpak hebben we toegepast op vier resoluties (1,2; 2,4; 3,6 en 4,8 km) in het Rijnstroomgebied om daarmee de volgende vragen te kunnen beantwoorden: (1) Kunnen we alle gevoelige parameters van wflow_sbm schatten met PTFs? (2) Wat is de kwaliteit van dit model op de hoogste resolutie (1,2 km)? (3) Leidt deze aanpak tot een schaalonafhankelijk model met consistente gesimuleerde fluxen op de geteste modelresoluties?

Op twee parameters na hebben we met PTFs alle gevoelige parameters van het wflow_sbm kunnen schatten. Deze twee en de overige, minder gevoelige, parameters hebben we een vaste (literatuur)waarde gegeven.

De modelkwaliteit is daarbij veelbelovend. Modelafvoeren komen vrij goed overeen met afvoermetingen, voornamelijk in het centrale en benedenstroomse deel

van het Rijnstroomgebied (KGE-waarden tussen de 0,6 en 0,9), evenals gesimuleerde evapotranspiratie vergeleken met schattingen van het onafhankelijke DMET product (op ruimtelijk vlak komen de twee echter minder overeen). Wel zijn er in het Zwitserse deel van de Alpen systematische afwijkingen in de modelafvoeren in het voorjaar en vroege zomer aanwezig, iets wat we voornamelijk kunnen toewijzen aan de onderschattingen in het neerslagproduct in de winter.

De resultaten laten duidelijk zien dat met de gevolgde methodiek consistente parametervelden op verschillende resoluties kunnen worden afgeleid. Het resultaat daarvan is dat gesimuleerde verdampingsfluxen behouden blijven op de vier resoluties. Voor de verticale stroming in de bodemlagen is dit in mindere mate ook het geval, maar wel zien we dat nabij de grotere rivierlopen afwijkingen van rond de 30% voorkomen. Eenzelfde beeld zien we niet voor gemodelleerde laterale (grondwater)stromingen en rivierafvoeren, alhoewel de rivierafvoeren in de hoofdloop van de Rijn wel consistent blijven op de vier resoluties. De reden hiervoor is dat deze gemodelleerde processen erg afhankelijk zijn van het juist schaalonafhankelijk afleiden van de rivier- en drainagenetwerken. Vooral waar het netwerk een hoge dichtheid heeft, is dit nu nog een probleem. In de literatuur zijn nog geen voorbeelden van een dergelijke aanpak voor een hydrologisch model dat laterale (grondwater)stroming meeneemt, maar voor wflow_sbm is dat op dit moment lopende.

Software beschikbaarheid en overige informatie:

Het neerslag-afvoermodel wflow_sbm is gratis beschikbaar via <https://github.com/openstreams/wflow> (GNU General Public License v3.0).

Dit artikel is gebaseerd op het gelijknamige Engelstalige artikel (Imhoff e.a., 2020) in het tijdschrift Water Resources Research, welke vrij beschikbaar is via <https://doi.org/10.1029/2019WR026807>. Dit MSc onderzoek werd uitgevoerd in het kader van H2020 IMPREX (grant nummer 641811).

Literatuur

- Bell, V.A., A.L. Kay, R.G. Jones en R.J. Moore** (2007) Development of a high-resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 11(1), pag 532-549.
- Brooks, R. en T. Corey** (1964) Hydraulic properties of porous media; in: *Hydrology papers, Colorado State University*, vol 7, pag 26-28.
- DWD Climate Data Center** (2019) Calculated daily values for different characteristic elements of soil and crops, Version v19.3; Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Germany.
- Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz en G.F. Martinez** (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling; in: *Journal of Hydrology*, vol 377(1), pag 80-91.
- Hengl, T., J.M. de Jesus, G.B.M. Heuvelink, M.R. Gonzalez, M. Kilibarda, A. Blagotić e.a.** (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning; in: *PLoS ONE*, vol 12(2), pag e0169748.

- Imhoff, R.O., W.J. van Versveld, B. van Osnabrugge en A.H. Weerts** (2020) Scaling point-scale (pedo) transfer functions to seamless large-domain parameter estimates for high-resolution distributed hydrologic modeling: An example for the Rhine River; in: *Water Resources Research*, vol 56, pag e2019WR026807.
- Karsenberg, D., O. Schmitz, P. Salamon, K. de Jong en M.F.P. Bierkens** (2010) A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation; in: *Environmental Modelling & Software*, vol 25(4), pag 489-502.
- Knoben, W.J.M., J.E. Freer, R.A. Woods** (2019) Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 23(10), pag 4323-4331.
- Kumar, R., L. Samaniego en S. Attinger** (2013) Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations; in: *Water Resources Research*, vol 49, pag 360-379.
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin en S. Bergström** (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model; in: *Journal of Hydrology*, vol 201(1-4), pag 272-288.
- Van den Hurk, B.J.J.M., L.M. Bouwer, C. Buontempo, R. Döscher, E. Erçin, C. Hananel, J.E. Hunink, E. Kjellström, B. Klein, M. Manez, F. Pappenberger, L. Pouget, M.H. Ramos, P.J. Ward, A.H. Weerts en J.B. Wijngaard** (2016) Improving predictions and management of hydrological extremes through climate services: www.imprex.eu; in: *Climate Services*, vol 1, pag 6-11.
- Samaniego, L., R. Kumar en S. Attinger** (2010) Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale; in: *Water Resources Research*, vol 46, pag W05523.
- Samaniego, L., R. Kumar, S. Thober, O. Rakovec, M. Zink, N. Wanders, S. Eisner, H. Müller Schmied, E.H. Sutanudjaja, K. Warrach-Sagi en S. Attinger** (2017) Toward seamless hydrologic predictions across spatial scales; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 21(9), pag 4323-4346.
- Schellekens, J., W. van Verseveld, M. Visser, H. Winsemius, T. Euser, L. Bouaziz, C. Thiange, S. de Vries, H. Boisgontier, D. Eilander, D. Tolleenaar, A. Weerts, F. Baart, P. Hazenberg, A. Lutz, C. ten Velden, M. Jansen en I. Benedict** (2020) openstreams/wflow: unstable-master; <https://github.com/openstreams/wflow>.
- Rakovec, O., R. Kumar, J. Mai, M. Cuntz, S. Thober, M. Zink, S. Attinger, D. Schäfer, M. Schrön en L. Samaniego** (2016) Multiscale and multivariate evaluation of water fluxes and states over European river basins; in: *Journal of Hydrometeorology*, vol 17(1), pag 287-307.
- Tobin, C., B. Schaeffli, L. Nicótina, S. Simoni, G. Barrenetxea en R. Smith** (2013) Improving the degree-daymethod for sub-dailymelt simulations with physically-based diurnal variations; in: *Advances in Water Resources*, vol 55, pag 149-164.
- Todini, E. en L. Ciarapica** (2002) The TOPKAPI model; in: V.P. Singh en D.K. Frevert (red) *Mathematical models of large watershed hydrology*; Water Resources Publications, Littleton, Colorado, Verenigde Staten, pag 471-506.

- Trigo, I.F., C.C. Dacamara, P. Viterbo, J.L. Rouiean, F. Olesen, C. Barroso, F. Camacho-de-Coca, D. Carrer, S.C. Freitas, J. García-Haro, B. Geiger, F. Gellens-Meulenberghs, N. Ghilain, J. Meliá, L. Pessanha, N. Siljamo en A. Arboleda** (2011) The Satellite Application Facility for Land Surface Analysis; in: *International Journal of Remote Sensing*, vol 32(10), pag 2725-2744.
- Van Looy, K., J. Bouma, M. Herbst, J. Koestel, B. Minasny, U. Mishra, ... en H. Vereecken** (2017) Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives; in: *Review of Geophysics*, vol 55, pag 1199-1256.
- Van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio en R. Srinivassan** (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models; in: *Journal of Hydrology*, vol 324(1), pag 10-23.
- Van Osnabrugge, B., A.H. Weerts en R. Uijlenhoet** (2017) genRE: A method to extend gridded precipitation climatology data sets in near real-time for hydrological forecasting purposes; in: *Water Resources Research*, vol 54, pag 9284-9303.
- Van Osnabrugge, B., R. Uijlenhoet en A.H. Weerts** (2019) Contribution of potential evaporation forecasts to 10-day streamflow forecast skill for the Rhine River; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 23(3), pag 1453-1467.
- Vertessy, R.A. en H. Elsenbeer** (1999) Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment: Effects of model parameterization; in: *Water Resources Research*, vol 35(7), pag 2173-2187.

Summary Spatially scalable hydrological model parameters estimated from open-source environmental data: an example for the Rhine River

A transition is present from lumped to spatially distributed hydrological (rainfall-runoff) models. Despite the potential of these 'gridded' models, they have as major disadvantage that every grid cell now requires a set of parameter values, which makes model calibration an issue. Here, we test the use of (pedo)transfer-functions in combination with open-source environmental data to estimate the parameter values of the conceptual hydrological model wflow_sbm. By making use of parameter specific upscaling rules, parameters can be derived at the data resolution and used on every desired model resolution. For the Rhine, this approach results in discharge and evapotranspiration simulations that agree with discharge measurements and evapotranspiration simulations of an independent model. Consistent parameter fields are obtained at the four tested model resolutions (1.2, 2.4, 3.6 and 4.8 km), which is a prerequisite of a scalable model. This results in preserved simulated evapotranspiration fluxes on these resolutions and to a lesser extent this also holds for the vertical soil fluxes (differences of not more than 30%). The wflow_sbm model, however, systematically underestimates spring and summer discharges in the Alps, due to a biased forcing during winter. The main model improvement is the scalability of the simulated discharge, which is currently only scalable for the main course of the Rhine. A scale independent process of river and lateral drainage network derivation should prevent this in the future.

Auteurs

RUBEN IMHOFF

Deltares / Wageningen Universiteit
Ruben.Imhoff@deltares.nl

WILLEM VAN VERSEVELD

Deltares
Willem.vanVerseveld@deltares.nl

BART VAN OSNABRUGGE

Deltares / Wageningen Universiteit
Bart.vanOsnobrugge@deltares.nl

ALBRECHT WEERTS

Deltares / Wageningen Universiteit
Albrecht.Weerts@deltares.nl