

Parameterverdelingen voor conceptuele hydrologische modellen inschatten op basis van veldmetingen

NICOLETTE VAN DER TAK

Dit onderzoek beschrijft methodes om parameterverdelingen voor conceptuele hydrologische modellen in te schatten op basis van veldmetingen. De ontwikkelde methodes gaan uit van de potentiële verdamping, neerslag en debietreeks van een stroomgebied. Voor het bepalen van de parameters maakt elke methode gebruik van specifieke perioden in de meetreeks. Deze geselecteerde periodes worden vervolgens gekoppeld aan modelonderdelen. Door de parameterwaarden direct van meetgegevens af te leiden neemt de onzekerheid in het model af. Daarnaast is de equifinaliteit, het aantal verschillende sets met vergelijkbare uitkomsten, afgenomen door gebruik te maken van de ontwikkelde methodes.

Dit extended abstract is een samenvatting van de master scriptie 'The challenge of parameter uncertainty: Finding parameter distributions from hydrological field data for conceptual rainfall-runoff models'. Succesvol verdedigd op 7 december 2018 aan de TU Delft. De afstudeercommissie bestond uit Dr. MSc. habil. M. Hrachowitz, ir. S.E. van den Driest-van der Kruijs, Dr. T.A. Bogaard en Prof. Dr. ir. T.J. Heimovaara. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Antea Group Nederland. De volledige scriptie is te vinden op <http://resolver.tudelft.nl/uuid:c8eabdf4-ee65-4fdf-bf78-99d630d34cbb>.

Artikel

Inleiding

Conceptuele hydrologische modellen simuleren de beweging van het water door de hydrologische cyclus en beschrijven daarbij het niet-lineaire verband tussen neerslag, verdamping en beek- of rivierafvoer. Deze modellen zijn een abstracte en wiskundige benadering van een stroomgebied en de bijbehorende karakteristieken, zoals topografie en geologie (Gharari, 2016).

Het goed weergeven van het stroomgebied in een model is een uitdaging vanwege verschillende onzekerheden, onderverdeeld in twee hoofdcategorieën: gegevensonzekerheden en modelonzekerheden (Renard e.a., 2010). Gegevensonzekerheid komt voort uit meetfouten, maar ook de interpretatie van de gegevens draagt bij aan de totale gegevensonzekerheid. Modelonzekerheid is tweeledig: de onzekerheid over de representatie van het stroomgebied in een abstracte modelstructuur en onzekerheid in de parameterwaarden. In conceptuele modellen geven parameters specifieke karakteristieken of eigenschappen weer van het stroomgebied, zoals de maximale waterberging in de ondergrond. De modelonzekerheid in de parameters ontstaat omdat parameters een integra-

tie zijn van de ruimtelijke variatie op de schaal van het model en dus niet gebaseerd zijn op beschikbare observaties (Hrachowitz en Clark, 2017).

De modellen worden gekalibreerd om de parameterwaarden te vinden. Tijdens het kalibratieproces wordt voor elke parameter eerst een initiële parameterverdeling vastgesteld. Deze bevat mogelijke parameterwaarden voor een stroomgebied en is gebaseerd op literatuurwaarden of op basis van ervaring. Deze eerste parameterverdeling is geschikt voor verschillende stroomgebieden met vergelijkbare kenmerken. Om een waarschijnlijke set parameterwaarden voor een specifiek stroomgebied vast te stellen vindt er een wiskundige optimalisatie plaats. De initiële parameterverdeling is vaak breed waardoor tijdens de kalibratie verschillende parametersets gevonden worden die vergelijkbare modelprestaties opleveren. Dit wordt het probleem van equifinaliteit genoemd (Beven, 1993).

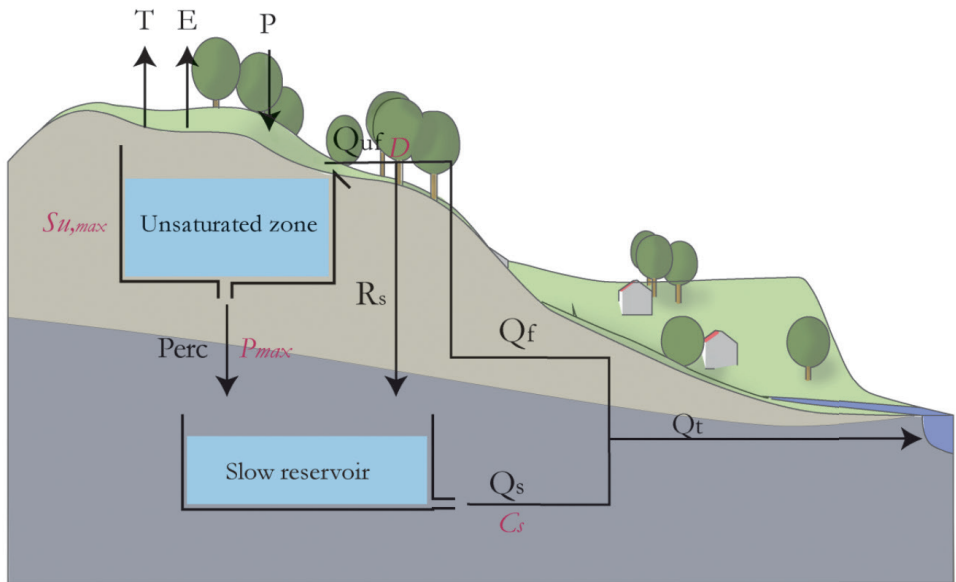
De focus van dit onderzoek ligt op het verkleinen van de parameteronzekerheid. Verschillende studies, zoals Freer e.a. (2004) en Euser e.a. (2013), zijn uitgevoerd om de fysische betekenis van parameters te vergroten. Het gebruik van beperkingen voor de parameters met betrekking tot onderlinge relaties verhoogt de betrouwbaarheid van modellen buiten de kalibratieperiode. Dit is aangetoond in het onderzoek van Gharari e.a. (2014). Een voorbeeld van een parameterbeperking in een model met parallelle landschapseenheden (gedistribueerd conceptueel model) is dat de maximale berging op het hoger gelegen deel van een stuwval groter moet zijn dan die van het weiland naast de rivier. Het gebruik van de beperkingen voorkomt dat het model de vrijheid krijgt om de beste overeenkomst buiten aannemelijke parameterverbanden te vinden in de kalibratieperiode. Methodes voor het vinden van parameterwaarden die de ruimtelijke variatie op de schaal van het stroomgebied weergeven, zijn nog nauwelijks gevonden.

Doel

De doelstelling van het onderzoek is om te bepalen in hoeverre een schatting gemaakt kan worden voor waarschijnlijke parameterverdelingen voor een gegeven modelstructuur op basis van potentiële verdamping, en neerslag- en afvoergegevens van een stroomgebied. Het doel is om tijdens de kalibratie geen traditionele initiële parameterverdeling te gebruiken die gebaseerd is op literatuur of ervaring maar een afgeleide, initiële parameterverdeling met de waarschijnlijke parameterwaarden afgeleid uit de vooraf beschikbare gegevens van het stroomgebied.

Ontwikkelde methodes

In het onderzoek zijn zes verschillende methodes ontwikkeld voor het bepalen van vier parameters (rode parameters in Afbeelding 1). Elke methode selecteert specifieke perioden in een gegevensreeks waar dominante hydrologische processen actief zijn. Aan deze hydrologische processen kunnen dan modelonderdelen worden gekoppeld en dus ook een specifieke parameter.



Afbeelding 1 Het gebruikte model in deze studie, in het rood zijn de parameters weergegeven bij de bijbehorende (zwarte) fluxen. T =transpiratie, E =verdamping, P =neerslag, Q_{uf} =overschrijding van de maximale grondwater berging, R_s =preferente stroombanen richting het grondwater, Q_f =snelle laterale hydrologische processen, $Perc$ =percolatie, Q_s =basisafvoer, Q_t =totale afvoer

De eerste twee ontwikkelde methodes bepalen de parameterverdeling voor de grondwaterafvoerconstante (C_s) van het langzame reservoir. Beide methoden richten zich op langdurig droge periodes, waarbij de aanname is dat alle afvoer afkomstig is van het langzame reservoir. De methodes zijn gebaseerd op het idee van de Master Recession Curve van Lamb en Beven (1997) en de studie waarin iteratief de berging-afvoerrelatie bepaald wordt van Fenicia e.a. (2006).

Om de parameterverdeling van de maximale percolatiesnelheid (P_{max}) te bepalen is een derde methodiek ontwikkeld. Die richt zich op periodes met relatief lage afvoeren zonder piekafvoeren. In deze methode is gebruik gemaakt van de eerder bepaalde C_s parameterverdeling. Het gemeten debiet is gescheiden in een basisafvoer vanuit het langzame reservoir en afvoer door percolatie.

De vierde en vijfde methode zijn ontwikkeld om op basis van waterbalansen de maximale berging in de onverzadigde zone ($S_{U,max}$) te bepalen. De *bound method* vindt zijn oorsprong in de publicatie van McMillan e.a. (2011). De waterbalans wordt berekend in periodes zonder piekafvoeren. De ondergrens van de parameterverdeling is bepaald als de totale som van de regenval min alle mogelijke verliezen. In de winter is de potentiële verdamping het laagst en daarom wordt deze periode gebruikt om de ondergrens te berekenen. Periodes uit de zomer worden voor de bovengrens van de parameterverdeling gebruikt. Dit is de som van de regenval min een klein deel van het waterverlies. De *inter-peak method* richt zich op geselecteerde periodes tussen twee duidelijke, onafhankelijke piekafvoeren. Door middel van een stelsel van vergelijkingen kan het

bergingsverloop bepaald worden tussen de twee piekafvoeren. De maximale berging ($S_{U,max}$) is vervolgens berekend door het oplossen van het stelsel.

De zesde en laatste methode is ontwikkeld voor de verdelingsparameter (D). D reguleert hoe het water, dat niet geborgen kan worden in de onverzadigde zone, verdeeld wordt over verschillende snelle stroomprocessen. Voor het bepalen van de parameter D zijn onafhankelijke piekmomenten geselecteerd. Net zoals de P_{max} methode gebruikt deze methode de eerder bepaalde C_s verdeling om de verschillende stromen te scheiden.

Onderzoeksopzet

De ontwikkelde methoden zijn getest met synthetische afvoergegevens. Voor deze synthetische afvoergegevens zijn sets van gekozen parameters en een tijdreeks van zowel potentiële verdamping en neerslag gebruikt. Met dit experiment zijn de gevonden parameterverdelingen van de methodes gevalideerd. Dit is mogelijk omdat de originele parameters van de afvoergegevens bekend zijn. In de synthetische gegevens zijn alle vormen van onzekerheid uitgesloten.

Het effect van gegevensonzekerheid op de methodes is apart onderzocht in een gevoeligheidsstudie. Hier zijn dezelfde synthetische gegevens gebruikt, alleen is deze bewerkt om gegevensonzekerheid te simuleren. De validatie van de methode is opnieuw gebaseerd op de originele parameters van de synthetische gegevens.

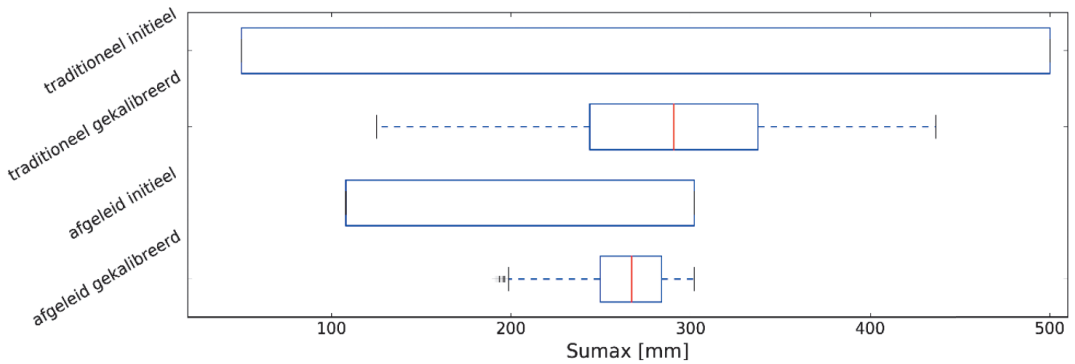
Als laatste zijn de methodes toegepast op meetgegevens van het Kervidy-Naizin stroomgebied in Frankrijk waar de parameters niet bekend zijn. De resultaten kunnen dus niet gevalideerd worden. Inzicht in het functioneren van de ontwikkelde methodes is verkregen door een vergelijking te maken tussen de kalibratie-uitkomsten van een traditionele initiële parameterverdelingen en de afgeleide, initiële parameterverdelingen van de ontwikkelde methodes. Er is gebruik gemaakt van een Monte Carlo-steekproefkalibratie. De Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) methode is toegepast om de modelonzekerheid en equifinaliteit te onderzoeken. In de GLUE-methode zijn model parametersets die voldoen aan een minimale modelprestatie toegevoegd aan een gekalibreerde parameterverdeling. Het uitgangspunt van deze methode is dat er niet één optimale parameterset bestaat.

Resultaten van de ontwikkelde methodes

De resultaten van het synthetische experiment tonen aan dat alle parameterwaarden van het onderzochte model gevonden kunnen worden door de ontwikkelde methodes. Uit de gevoeligheidsstudie is gebleken dat de methode om de P_{max} te vinden gevoelig is voor gegevensonzekerheid. De gevonden ondergrens van de parameterverdeling voor de P_{max} was een overschatting van de originele parameter van de synthetische gegevens. De gevonden P_{max} parameterverdelingen uit de methode bevatte dus niet de originele parameter van de synthetische gegevens.

Als laatste zijn de methodes toegepast op Franse meetgegevens om parameterverdelingen te vinden. In Afbeelding 2 zijn de traditionele initiële parameterver-

deling en de afgeleide, initiële parameterverdeling getoond. Daarnaast zijn de gekalibreerde parameterverdelingen van de GLUE methode getoond. De totale bandbreedte van de afgeleide gekalibreerde parameterverdeling is significant smaller dan de gekalibreerde parameterverdelingen van de traditionele methode. De equifinaliteit, het aantal verschillende sets met vergelijkbare uitkomsten, is dus afgenomen door gebruik te maken van de ontwikkelde methodes.



Afbeelding 2 Het is duidelijk zichtbaar dat voor zowel de initiële als de gekalibreerde verdelingen de afgeleide variant een stuk smaller is dan traditionele variant.

Met de GLUE-methode is daarnaast een onzekerheidsinterval berekend rond de gemodelleerde afvoer. Het totale oppervlak van het onzekerheidsinterval is gehalveerd door gebruik te maken van de in dit onderzoek ontwikkelde methodes.

Met de vergelijking tussen de kalibratieresultaten van de traditionele initiële parameterverdeling met de afgeleide initiële parameterverdeling, blijkt dat de modelprestatie niet significant is afgenomen. Dit geeft een indicatie dat het model passend is voor het stroomgebied. Door gebruik te maken van de gevonden parameterverdelingen heeft het model geen vrijheid meer om tijdens het kalibratieproces voor ongeschikte modelaannames te compenseren. Als de prestatie wel significant afneemt dan is dit een indicatie dat belangrijke hydrologische processen niet zijn opgenomen in het model.

Conclusie

Potentiële verdamping, neerslag en afvoerdata van een stroomgebied kunnen gebruikt worden om initiële parameterverdelingen te vinden voor een conceptueel hydrologisch model. Het concept van dit onderzoek was om specifieke perioden in een gegevensreeks te gebruiken waar dominante hydrologische processen actief zijn. De parameteridentificatiemethodes koppelen specifieke modelonderdelen aan het geobserveerde hydrologische proces. Het heeft voordelen om voor de kalibratie gebruik te maken van de ontwikkelde methodes van dit onderzoek om een afgeleide initiële parameterverdeling te bepalen. Het grootste voordeel is de afname van equifinaliteit en de model- en parameteronzekerheid. Daarnaast is er meer zekerheid over de mate waarin de modelaannames passend zijn voor een stroomgebied.

Literatuur

- Beven K.J.** (1993) Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling; in: *Advances in Water Resources*, vol 16, pag 41-51.
- Euser, T., Winsemius, H. C., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Uhlenbrook, S., en Savenije, H. H.G.** (2013) A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 17, pag 1893-1912.
- Fenicia, F., Savenije, H. H.G., Matgen, P., en Pfister, L.** (2006) Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 10, pag 139-150
- Freer, J., McMillan, H., McDonnell, J., en Beven, K.** (2004) Constraining dynamic TOPMODEL responses for imprecise water table information using fuzzy rule based performance measures; in: *Journal of Hydrology*, vol 291, pag 254-277.
- Gharari, S.** (2016) On the role of model structure in hydrological modeling: Understanding models; doctoral thesis, TU Delft.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gao, H. en Savenije, H.H.G.** (2014) Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 18, pag 4839-4859.
- Hrachowitz, M. en Clark, M. P.** (2017) HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 21, pag 3953 - 3973.
- Lamb, R., en Beven, K.** (1997) Using interactive recession curve analysis to specify a general catchment storage model; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 1, pag 101-113.
- McMillan, H. K., Clark, M. P., Bowden, W. B., Duncan, M., en Woods, R. A.** (2011) Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 1. Diagnostic tests for model structure; in: *Hydrological Processes*, vol 25, pag 511-522.
- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M. en Franks, S. W.** (2010) Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors; in: *Water Resources Research*, vol 46, pag W05521.

Summary The challenge of parameter uncertainty: Finding parameter distributions from hydrological field data for conceptual rainfall-runoff models

Conceptual hydrological model parameters represent characteristics of a catchment. Finding adequate parameter values based on field observations, which represent the heterogeneity of a catchment on the spatial resolution and scale of the model, is considered challenging since the scale of the observations does not meet the scale of the parameters. The objective of this thesis is to analyse the extent to which it is possible to make an estimation of parameter distributions, based on field observations (the precipitation, evaporation and discharge) and a given hydrological model structure. The goal is to avoid the use of uninformed prior parameter distributions during calibration by using available field data to generate informed prior distributions.

In this research, six different expert-knowledge inverse modelling methods are developed to find four parameter distributions. Each method uses sub-periods in the data and is associated with the parameter of the model component representing that specific type of sub-period. To test the methods, the study was conducted in a synthetic environment, where discharge data was produced by a model driven by real rainfall data and potential evaporation data. All forms of uncertainty were excluded in this test. The effect of data uncertainty in the methods was investigated by conducting a sensitivity analysis. The same synthetic data was used; it was however corrupted to simulate data uncertainty. Last, an application of the methods upon real measured data was executed. The performance of the methods to find parameter distributions can no longer be assessed since in the real world the “correct” parameter values are not known. However, a comparison of the informed prior parameter distributions with uninformed prior parameter distributions were made with a Monte-Carlo sampling strategy calibration.

In the synthetic experiment, all parameter distributions of the investigated model were correctly determined using the expert-knowledge inverse modelling methods. The sensitivity analysis revealed that the method to determine the maximum percolation rate parameter (P_{max}) distribution was most sensitive to data uncertainty. The determined P_{max} parameter distributions did not include the original parameter of the corrupted synthetic data. In real-world application, an uncertainty interval was constructed with the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation method. The total area of the constructed uncertainty interval using the calibration results of the informed prior parameter distributions was less than half than the uncertainty interval constructed using the uninformed prior parameter distributions. The posterior parameter distributions of the informed parameter distributions was two to five times smaller than for the uninformed parameter distribution. The model performance of both calibrations did not deviate significantly, indicating a sufficient model structure for the catchment and an adequate performance of the methods to find parameters.

Auteur

NICOLETTE VAN DER TAK
Technische Universiteit Delft
nicolettevdtak@hotmail.com

