

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Gelleszun, Marlene; Kreye, Phillip; Meon, Günter**

## **Robuste Parameterschätzung und eine effiziente Unsicherheitsanalyse in großskaligen hydrologischen Modellanwendungen**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107082>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gelleszun, Marlene; Kreye, Phillip; Meon, Günter (2020): Robuste Parameterschätzung und eine effiziente Unsicherheitsanalyse in großskaligen hydrologischen Modellanwendungen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 383-392.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Robuste Parameterschätzung und eine effiziente Unsicherheitsanalyse in großskaligen hydrologischen Modellanwendungen

Marlene Gelleszun  
Phillip Kreye  
Günter Meon

Die Parameterschätzung in großskaligen hydrologischen Modellen geht insbesondere bei Anwendung moderner, rechenintensiver Optimierungsalgorithmen mit großen Herausforderungen einher. Um dieser Diskrepanz zu begegnen, wurde eine lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, bei der im Gegensatz zu der klassischen multikriteriellen Optimierung die Anforderungen an die Zielgrößen bereits im Vorfeld der Kalibrierung formuliert werden. Für ein Untersuchungsgebiet konnten mit Hilfe der entwickelten Optimierungsstrategie sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Neben einem ausgewogenen Wasserhaushalt wurde auch die Saisonalität sowohl in der Kalibrierung, als auch in der Validierung realitätsnah abgebildet. Für eine Überprüfung der Methode wurden für drei unterschiedliche Einzugsgebiete synthetische Ganglinien erzeugt, an denen das Verfahren getestet wurde. Alle fünf Parametersets wurden mit weniger als 10% der Rechenzeit, die von einem globalen multikriteriellen Optimierungsalgorithmus benötigt wurde, ermittelt.

Mit Hilfe der zeiteffizienten FOSM-Methode (First Order Second Moment), welche auf dem allgemeinen Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz basiert, wurden die Unsicherheiten der Parameter und die Konfidenzintervalle der Abflusssimulationen ermittelt.

Stichworte: Parameterschätzung in hydrologischen Modellen, Unsicherheitsanalyse, FOSM-Methode, lexikografische Kalibrierungsstrategie

## 1 Einleitung

Für zahlreiche Aufgaben in der hydrologischen Praxis werden Wasserhaushaltskomponenten über lange Zeiträume untersucht. Im Gegensatz zur Analyse von Einzelereignissen können für Extremwertstatistiken oder Klimafolgenforschungen auf der Meso- bis Makroskala nur dann verlässliche Aussagen getroffen werden, wenn das verwendete hydrologische Modell in der

Lage ist, den gesamten Zeitraum plausibel abzubilden. Für die Parameterschätzung derartiger Modelle haben sich bei wissenschaftlichen Fragestellungen in den letzten Jahren zunehmend komplexe semi- bis vollautomatische, meist multikriterielle Optimierungsmethoden etabliert (Efstratiadis und Koutsoyiannis 2010). In der planerischen und operationellen Ingenieurspraxis ist eine Umsetzung dieser Methoden oft nicht möglich, was in erster Linie durch die Diskrepanz zwischen der hohen Modellauflösung, der Modellkomplexität und den rechenaufwändigen Optimierungsmethoden begründet ist. Es wurde eine auf Präferenzordnungen basierende lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, die zeiteffizient ist und robuste Parameter liefert.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI

Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI wurde im Zuge einer Kooperation der TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz) und dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH, Braunschweig, entwickelt (LWI-HYWAG und IfW 2012). Es handelt sich um ein deterministisches hydrologisches, vektorbasiertes Modellsystem mit einer GIS-Schnittstelle. Es wird für wissenschaftliche Fragestellungen (Hölscher et al. 2012) und für die operationelle Hochwasservorhersage in Niedersachsen sowie in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten erfolgreich eingesetzt (Meon et al. 2014). Die räumliche Differenzierung erfolgt in vier Ebenen: Hydrotöpfe, Teilflächen, Teileinzugsgebiete und Gesamteinzugsgebiet. Der modulare Aufbau ermöglicht eine an die Fragestellung angepasste Auswahl der Berechnungsansätze mit verschiedenen Verfahren zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse (vgl. LWI-HYWAG und IfW 2012).

In der vorliegenden Studie wurden die sechs nachfolgend aufgelisteten Kalibrierungsparameter verwendet. Sie gelten für Teileinzugsgebiete und wirken flächendifferenziert auf Hydrotopbasis. Die Parameter  $k_i$ ,  $k_u$  und  $k_b$  sind der Abflusskonzentration zuzuordnen und wirken auf Teilflächenbasis.

- $k_{initial}$ : Startfülle des Bodenspeichers. Ein Wert von Null steht für mittlere Verhältnisse (Feldkapazität).
- $N_{Dis}$ : Parameter zur Beeinflussung der Disaggregation des Tagesniederschlags auf Stundenwerte. Ein Wert kleiner als der Standard-

wert erhöht, ein größerer Wert verringert die Niederschlagsintensitäten.

- FET: Konstante zur Beeinflussung der Reduktion der potentiellen ET. Ein kleinerer Wert als der Standardwert bewirkt eine erhöhte aktuelle ET und damit ein kleineres Abflussvolumen.
- $K_i$ ,  $K_u$  und  $K_b$ : Speicherkonstanten für den Zwischenabfluss, Grundwasserabfluss und langsamen Grundwasserabfluss. Größere Werte als die Standardwerte verzögern den Gebietsabfluss stärker.

## 2.2 Untersuchungsgebiete

Zur Validierung der Methode wurden drei Modellgebiete in Norddeutschland betrachtet. Die räumliche Einordnung der Gebiete sowie deren wesentliche Eigenschaften können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

**Tabelle 1:** Gebietseigenschaften der drei Modellgebiete Neuenburg, Göttingen und Hellwege.

	<b>Neuenburg</b>	<b>Göttingen</b>	<b>Hellwege</b>
Pegelkoordinaten (Rechts/Hoch) [m]	3430540/ 5918870	3563668/ 5713486	3513861/ 5882633
Gewässer	Zeteler Tief	Leine	Wümme
Größe [km <sup>2</sup> ]	28	628	907
Dominante Landnutzung	45% Acker, 35% Wiesen und Weiden, 10% Wald, 10% Sonst.	58% Acker, 28% Wald, 8% Wiesen und Weiden, 5% Stadt, 1% Sonst.	37% Acker, 32% Wiesen und Weiden, 21% Wald, 10% Sonst.
Bodeninformationen	57% kultivierte Moorböden, 37% Rein- und Lehmsande, 6% Sonst.	60% Lehmschluffe, 35% Lehmsande, 5% Sonst.	80% Rein- und Lehmsande, 20% kultivierte Moorböden
Höhe ü. NN [m]	3,5-14,5	145-467	12-121
MQ (1960-90) [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	0,25*	5,62	9,91
$\bar{N}$ (1960-90) [mm]	818 (Station Varel)	645 (Station Göttingen)	796 (Station Rotenburg)

$\bar{T}$ (1960-90) [°C]	8,7 (Station Friesoythe-Altenoythe)	8,7 (Station Göttingen)	8,7 (Station Rotenburg)
Anzahl Hydrotope	175	1531	1778

\*Mittel über 1980-2010

### 2.3 Parameterschätzung

Optimierungsaufgaben können sich auf eine einzelne Zielfunktion beziehen (in der Hydrologie meist der Gebietsabfluss) oder mehrere Zielkriterien berücksichtigen, was als multikriterielle Optimierung bezeichnet wird. Bei der multikriteriellen Optimierung ist das Ergebnis eine Vielzahl von pareto-optimalen Parametersets, welche im Postprocessing evaluiert werden müssen (Madsen und Khu 2006). Bei beiden Optimierungsansätzen wird zwischen lokalen und globalen Optimierungsverfahren unterschieden, wobei globale Verfahren immer einen höheren Rechenaufwand bedeuten aber im Gegenzug eine von den Startwerten unabhängige Parameterschätzung liefern (vgl. z.B. Efstratiadis und Koutsoyiannis 2010). Aufgrund der Rechenintensität besteht ein grundsätzlicher Konflikt zwischen hochaufgelösten hydrologischen Modellen in Verbindung mit komplexen Optimierungsalgorithmen (Zhang et al. 2009). Es wurde daher eine lexikografische Kalibrierungsstrategie entwickelt, bei der die Präferenzordnung der zu erreichenden Ziele bereits im Vorfeld der Optimierung durch spezifische Zielfunktionen festgelegt wurde (vgl. Gelleszun et al. 2017). Die größte Herausforderung der lexikografischen Kalibrierung besteht in der sinnvollen Unterteilung der Parameter in kleinere Parameteruntergruppen, für die geeignete Zielfunktionen entwickelt werden müssen. Durch diese Zuordnung wird das Expertenwissen bereits in die Kalibrierung einbezogen. Das sukzessive Abarbeiten der Zielfunktionen verkleinert den Suchraum und ermöglicht den Einsatz lokaler, effizienter Optimierungsverfahren.

Es wurde die ableitungsfreie Downhill-Simplex-Methode nach Nelder und Mead (1965) verwendet. Ein Simplex ist ein geometrisches Konstrukt aus einer Menge von  $n+1$  Punkten im  $n$ -dimensionalen Parameterraum. Je kleiner die Dimension des Parameterraums ist, desto zuverlässiger konvergiert das Verfahren.

In Anlehnung an die Anforderungen der Aufgabenstellung wurde die nachfolgende Präferenzordnung mit der übergeordneten Zielgröße „bobbachteter Gebietsabfluss“ festgelegt:

1. Gesamtvolumen (Parameter  $\theta_{\text{initial}}$ , Zielfunktion: Summe der quadratischen Abweichung aus den kumulierten Zeitreihen des beobachteten und simulierten Abflusses für die ersten fünf Monate des Simulationszeitraums. Parameter FET: Betrag des Volumenfehlers)
2. Wellenform und Scheitel der Abflussganglinien (Parameter  $k_i$ ,  $k_u$ : Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970))
3. Saisonalität (Parameter  $k_b$ : RMSE der logarithmierten Zeitreihen multipliziert mit dem RMSE der Abflüsse (beobachtet, simuliert), die jeweils unterhalb des 35% Perzentils der Unterschreitungsdauerlinie liegen.  $k_u$ ,  $k_b$ ,  $N_{\text{Dis}}$ : Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970) berechnet aus den logarithmierten Zeitreihen)

## 2.4 Unsicherheitsanalyse

Eine Unsicherheitsanalyse kann verschiedene Aspekte innerhalb der Modellkette berücksichtigen. Viele Ansätze beruhen auf stochastischen Verfahren, wie beispielsweise Monte Carlo-Simulationen (Ajami et al. 2007). Weil diese Zufallsexperimente im Kontext der hydrologischen Modellierung sehr zeitaufwändig sind, wurde in dieser Studie auf approximative Verfahren zurückgegriffen. Mithilfe der FOSM-Methode (First Order Second Moment) wurden die Parameterunsicherheiten und die Konfidenzintervalle der Simulationen quantifiziert. Die FOSM-Methode basiert auf dem allgemeinen Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz (z.B. Witte und Schmidt 2004, Seite 149):

$$C_{yy} = AC_{xx}A^T$$

Die Kovarianzmatrix  $C_{xx}$  enthält die Varianzen und Kovarianzen der Modellparameter, die a-priori abzuschätzen sind. Für die vorliegende Studie wurde  $C_{xx}$  näherungsweise empirisch entsprechend nachfolgender Gleichung berechnet:

$$C_{xx} = s_f^2(A^T A)^{-1}$$

Die Matrix  $A$  wird als Jacobi-, Sensitivitäts- oder Funktionalmatrix bezeichnet, sie enthält die partiellen Ableitungen des Modells nach den Parametern. Im Allgemeinen kann ein hydrologisches Modell nicht analytisch nach den Parametern abgeleitet werden. Folglich wird für die Berechnung der Jacobi-Matrix  $A$  auf eine numerische Ableitung (zentrale Differenzen) im Parameteroptimum zurückgegriffen (vgl. Maskey und Guinot 2003). Die Kovarianzmatrix  $C_{yy}$  ( $m \times m$ ) der berechneten Zufallsgröße  $y$  (im vorliegenden Fall der simulierte Abfluss) enthält auf der Diagonalen die Varianzen von  $y$ , die auch direkt nach Gleichung 2 berechnet werden können:

$$\text{var}(y) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ij} a_{ik} c_{jk}$$

$a_{ij}$ : Elemente von  $A$   
 $c_{ij}$ : Elemente von  $C_{xx}$

Im letzten Schritt der Optimierung wurde die Modelleffizienz der logarithmierten Abflüsse maximiert. Demzufolge wurden die Unsicherheiten auf Basis der logarithmierten Abflussdaten quantifiziert. Im Anschluss erfolgte die Umkehroperation die Potenzierung der berechneten Konfidenz- und Vorhersageintervalle.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Überprüfung der lexikografischen Kalibrierungsstrategie auf Grundlage synthetischer Abflussganglinien

Es wurden fünf unterschiedliche Parametersets (bestehend aus je sechs Parametern) generiert, auf deren Basis für jedes der drei Untersuchungsgebiete Abflussganglinien über 20 Jahre erzeugt wurden. Die erhaltenen simulierten Abflüsse dienten anschließend als „synthetische Beobachtung“, um den originalen Parametersatz mit dem entwickelten Verfahren zu identifizieren.

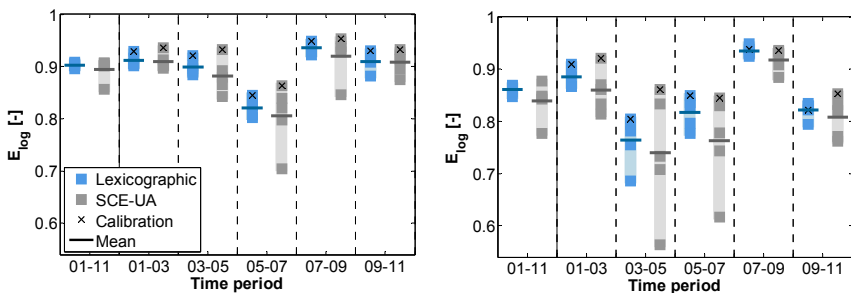
Die Startwerte sowie die oberen und unteren Grenzwerte wurden für alle fünf Parametersets gleich gewählt. Nach durchschnittlich 131 Iterationen wurden alle Parametersets mit Hilfe der lexikografischen Kalibrierungsstrategie ausreichend genau ermittelt. Als Vergleich wurde für das kleinste Untersuchungsgebiet Neuenburg ein globaler Optimierungsalgorithmus (SCE-UA nach Duan et al. (1992) mit Standardeinstellungen) angewendet. Alle Parameter wurden simultan nach ca. 1900 Iterationen identifiziert. Hier zeigt sich ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil der entwickelten lexikografischen Kalibrierungsstrategie.

#### 3.2 Überprüfung der Robustheit der Parameterschätzung

Neben der Effizienz einer Parameterschätzung stand auch die Plausibilität der optimierten Parameter im Fokus. Als Merkmal für die Plausibilität wurden die Ähnlichkeiten von Parametersätzen für das gleiche Untersuchungsgebiet für unterschiedliche Zeiträume untersucht.

Dafür wurde die historische Abflussganglinie in fünf äquidistante Zeitintervalle von je zwei Jahren unterteilt, für die dann jeweils die Parameterschätzung erfolgte. Die optimierten Parametersätze der einzelnen Zeitintervalle wurden

anschließend auf die jeweils andern Zeitintervalle sowie den gesamten Zeitraum angewendet. Anschließend wurden Gütemaße zur Quantifizierung der  $\ddot{Y}$ hnlichkeiten berechnet (z.B. Nash-Sutcliffe-Koeffizient der logarithmierten Zeitreihen). Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass das globale Optimierungsverfahren in der Kalibrierungsphase bessere Gütemaße erzielt, als das lexikografische Verfahren. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Gütekriterien für die Validierungszeiträume nach der lexikografischen Kalibrierung im Mittel höher sind und eine kleinere Spannweite aufweisen, was die Robustheit der Methode aufzeigt.



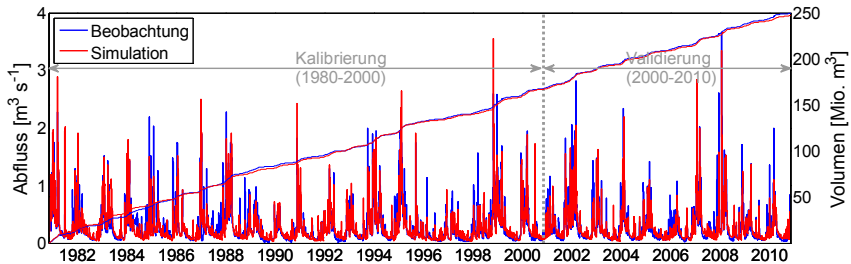
**Abbildung 1:** Links: Reckershausen, Rechts: Hellwege. Kreuzvalidierung der Kalibrierungsergebnisse. In blau sind die Ergebnisse der lexikografischen Kalibrierungsstrategie dargestellt, in grau die des globalen SCE-UA-Algorithmus.

Neben den  $\ddot{Y}$ hnlichkeiten der Gütekriterien wurden auch die  $\ddot{Y}$ hnlichkeiten der Parametersets der fünf Zeiträume untersucht. Die Parameter nach der lexikografischen Kalibrierungsstrategie wiesen deutlich höhere  $\ddot{Y}$ hnlichkeiten zueinander auf, als die Parameter der globalen Optimierung, was für eine hohe gebietsbezogene Repräsentativität der ermittelten Parameter spricht.

### 3.3 Anwendung der lexikografischen Kalibrierungsstrategie am Pegel Neuenburg

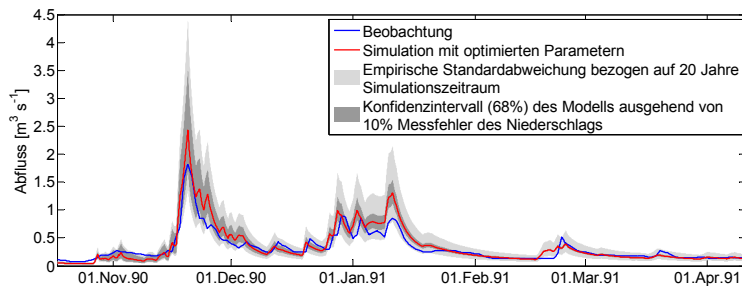
Die nachfolgende Abbildung zeigt die Gang- und Summenlinien des beobachteten und simulierten Abflusses auf Grundlage der optimierten Parameter am Pegel Neuenburg. Die Präferenzvorgabe „Volumenfehler“ wurde eingehalten (hohe  $\ddot{Y}$ hnlichkeiten der Summenlinien). Wellenform und Abflussscheitel als zweite Präferenzvorgabe werden ebenfalls erfüllt, was sich durch einen Nash-Sutcliffe Koeffizient von 0,78 in der Kalibrierung und 0,80 in der Validierung bemerkbar macht.





**Abbildung 2:** Gang- und Summenlinien der beobachteten und simulierten Zeitreihen für die Kalibrierung und Validierung am Pegel Neuenburg an dem Zeteler Tief.

Für die Bewertung der dritten Präferenz „Saisonalität“ wurden Dauerlinien und langjährige Tagesmittelwerte herangezogen. Es zeigten sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen den beobachteten und simulierten Abflüssen. Die FOSM-Methode lieferte plausible Konfidenzintervalle der Abflussganglinien (vgl. nachfolgende Abbildung) und kann bei rechenintensiven Modell-anwendungen als Alternative zu zufallsbasierten Methoden in Betracht gezogen werden.



**Abbildung 3:** Detailausschnitt (Kalibrierungsperiode) der beobachteten und simulierten Zeitreihen sowie die empirische Standardabweichung und die Unsicherheiten des Modells, ausgehend von einem zehnprozentigen Niederschlagsfehler am Pegel Neuenburg an dem Zeteler Tief.

## 4 Diskussion und Ausblick

Anwendungen von hochentwickelten hydrologischen Modellen mit komplexen Optimierungsverfahren sind in der operationellen Hydrologie wegen des enormen Rechenaufwands sehr problematisch (Zhang et al. 2009). Durch diese Diskrepanz motiviert wurde eine auf Präferenzordnungen beruhende,

lexikografische Kalibrierungsstrategie vorgestellt. Anhand zweier methodischer Ansätze wurde das Verfahren überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren repräsentative und robuste Parametersätze für drei unterschiedliche Einzugsgebiete mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand lieferte.

Das durch den lexikografischen Ansatz ermittelte Parameterset für den Pegel Neuenburg ist aus hydrologischer Sicht plausibel. Der beobachtete Abfluss konnte für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für alle Anforderungspunkte sehr gut wiedergegeben werden. Die a priori festgelegte Präferenzordnung von Gesamtvolumen, Wellenform und Saisonalität konnte erfüllt werden. Unter der Prämisse des geringen Rechenbedarfs wurden Unsicherheiten der Parameter, des Modells und der Modellvorhersage approximativ bestimmt.

Durch die Aufteilung der Parameter in Untergruppen und das sukzessive Vorgehen wird der Parameter-Suchraum insgesamt verkleinert. Im Vergleich zur klassischen multikriteriellen Optimierung werden weniger als 10% der Iterationen benötigt.

## 5 Literatur

- Ajami, N. K., Q. Duan & S. Sorooshian (2007): An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. - *Water Resources Research* 43 (1).
- Duan, Q., S. Sorooshian & V. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. - *Water Resources Research* 28 (4), 1015–1031.
- Efstratiadis, A. & D. Koutsoyiannis (2010): One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. - *Hydrological Sciences Journal* 55 (1), 58–78.
- Gelleszun, M., P. Kreye & G. Meon (2017): Representative parameter estimation for hydrological models using a lexicographic calibration strategy. *Journal of Hydrology*, 553, 722–734.
- Hölscher, J., U. Petry, M. Bertram, M. Anhalt, S. Schmidke, U. Haberlandt et al. (2012): Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. 1. Aufl. Norden: NLWKN (Oberirdische Gewässer, 33).
- LWI-HYWAG und IfW (2012): Panta Rhei Benutzerhandbuch - Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht). Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz am Leichtweiß-Institut für Wasserbau

- der TU Braunschweig in Kooperation mit dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH, Braunschweig.
- Madsen, H. & S. Khu (2006): On the use of Pareto optimization for multi-criteria calibration of hydrological models. - IAHS PUBLICATION 304, 93.
- Maskey, S. & V. Guinot (2003): Improved first-order second moment method for uncertainty estimation in flood forecasting. - Hydrological Sciences Journal 48 (2), 183–196.
- Meon, G., M. Päscht & N. V. Phuoc (2014): EWATEC-COAST: Technologies for Environmental and Water Protection of Coastal Regions in Vietnam. Contributions to 4th International Conference for Environment and Natural Resources -- ICENR 2014. 1., Aufl. Göttingen, Niedersachs: Cuvillier, E (HYWAG Schriftenreihe, 1).
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles.
- Nelder, J. A. & R. Mead (1965): A simplex method for function minimization. - The computer journal 7 (4), 308–313.
- Witte, B. & H. Schmidt (2004): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Wichmann.
- Zhang, X., R. Srinivasan, K. Zhao & M. van Liew (2009): Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. - Hydrological Processes 23 (3), 430–441.

M.Sc. Marlene Gelleszun  
Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Dr.-Ing. Phillip Kreye

Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft  
und Gewässerschutz; Leichtweiß-Institut  
für Wasserbau

Technische Universität Braunschweig Beet-  
hovenstraße 51a  
38106 Braunschweig

(vormals TU Braunschweig)  
BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung  
mbH

Abteilung Sicherheitsuntersuchungen  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

Tel.: +49 531 3913953  
Fax: +49 531 3913955  
E-Mail: m.gelleszun@tu-bs.de  
g.meon@tu-bs.de

Tel.: +49 5171 4317  
E-Mail: Phillip.Kreye@bge.de