

## Unsichere Kalibrierung von Modellen der Siedlungsentwässerung

Manfred Kleidorfer, Christian Urich, Michael Mair und Wolfgang Rauch

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik,  
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck

**Kurzfassung:** Die Verwendung numerischer Modelle in der Siedlungsentwässerung ist eine weitverbreitete Methode in Wissenschaft und Praxis zur Bearbeitungen von Fragestellungen bei denen Messungen nicht mehr ausreichen. Die Modellierung dient der Verbesserung des Systemverständnisses und wird für Bauwerksplanungen, Optimierungs- und Prognoseaufgaben eingesetzt. Modelle sind hier jedoch eine Abstraktion der Realität in mathematische Gleichungen und somit von Unsicherheiten aus unterschiedlichen Quellen beeinflusst. In diesem Artikel werden anhand ausgewählter Beispiele die Einflüsse von Unsicherheiten auf die Modellierungsergebnisse aufgezeigt, dies sind Beispiele zum Einfluss von Unsicherheiten in den Niederschlagsdaten, in der Verfügbarkeit von Kalibrierungsdaten sowie in der Modellstruktur.

**Key-Words:** Unsicherheiten, Modellierung, Kanalsystem, Datenverfügbarkeit

### 1 Einleitung

In der Siedlungsentwässerung unterstützen numerische Simulationsmodelle Planung und Betrieb von Infrastruktureinrichtungen wie beispielsweise von Kanalisationssystemen, Kläranlagen, Infiltrationsanlagen oder Regenwasserbehandlungsanlagen. Sie sind dabei ein geeignetes Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung wie umfangreiche Investitionsmittel am besten eingesetzt werden können. (alleine in Österreich wurden im Durchschnitt der Jahre 1993 bis 2000 jährlich ca. 780 Mio. € in die Abwasserentsorgung investiert). Die Anwendungen von Modellierungsaufgaben in der Siedlungswasserwirtschaft sind dabei vielfältig.

Übliche Aufgabenstellungen sind beispielsweise Verbesserung des Prozessverständnisses, Bemessung-, Optimierungs- oder Prognoseaufgaben.

In den letzten Jahrzehnten ist mit steigender Rechenkapazität moderner Computer die Komplexität der verwendeten Modelle rasant angestiegen und immer mehr Prozesse werden immer genauer abgebildet. Modelle sind dabei jedoch immer eine vereinfachte Abbildung der Realität und beschreiben real auftretende physikalische Prozesse nie vollständig. Zusätzlich werden Modelle oft im Kontext begrenzter Datenverfügbarkeit, unsicherer Daten und unklarer Randbedingungen bzw. Szenarien verwendet. Beispielsweise ist die Aufzeichnung von Niederschlagsdaten – die treibende Kraft in Fragestellungen der Siedlungsentwässerung – nicht nur von Messungenauigkeiten gekennzeichnet, sondern ebenso schlagen sich Vereinfachungen der räumlichen Niederschlagsverteilungen in Punktmessungen durch Unsicherheiten in den Modellergebnissen nieder. Modellierung ist daher immer ein unsicherer Vorgang und es ist weitläufig anerkannt, dass eine Modellkalibrierung sowie die Unsicherheitsanalyse einen wichtigen Teil der Modellierungsaufgabe darstellt (Beck, 1987; Bertrand-Krajewski *et al.*, 2002; Harremoes, 2003; Beven, 2009).

Auf wissenschaftlicher Ebene ist die Behandlung der Unsicherheiten in der Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme, vor allem in der Modellierung natürlicher Einzugsgebiete (z. B. Kavetski *et al.*, 2006 oder Gallagher und Doherty, 2007) oder in der Grundwassermodellierung (z. B. Keating *et al.*, 2010) schon lange ein bedeutendes Thema, in dem bereits seit einigen Jahrzehnten Untersuchungen durchgeführt werden.

In der Siedlungsentwässerung (Modellierung von Kanalsystemen) hat die Unsicherheitsbetrachtung allerdings eine kürzere Geschichte und mit Zunahme der Verwendung von Modellen in Planungsaufgaben eine immer größer werdende Bedeutung. Hierbei werden Methoden aus verwandten Gebieten übertragen und entsprechenden den Erfordernissen der Siedlungswasserwirtschaft adaptiert. Die wissenschaftliche Relevanz dieses Themas zeigt sich unter anderem in den Aktivitäten der „International Working Group on Data and Models“ der IWA/IAHR „Specialist Group on Urban Drainage“, welche regelmäßig Workshops

zum Thema Unsicherheiten in der Siedlungswasserwirtschaft veranstaltet (Deletic *et al.*, 2009) und einige der gängigsten verwendeten Methoden vergleicht (Dotto *et al.*, eingereicht zu Water Research). Ebenso wird derzeit in einem Vergleich mit anderen wasserwirtschaftlichen Disziplinen versucht, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den verschiedenen Anwendungen aufzuarbeiten (Vanrolleghem *et al.*, 2011, angenommen).

Genauso zeigt sich aber auch die praktische Relevanz des Themas Unsicherheiten in der Siedlungsentwässerung (Kleidorfer, 2010, Rauch *et al.*, 2010). Beispielsweise schätzen Hoppe und Gruening (2007), dass der Einfluss der Unsicherheiten der Eingangsdaten in Modelle der Siedlungsentwässerung die Auswirkungen von geplanten (und durch das Modell überprüften Maßnahmen) oft übersteigt.

In diesem Artikel sollen einige Beispiele von Unsicherheiten in der Modellierung von Systemen der Siedlungsentwässerung dargestellt sowie die Relevanz für die praktischen Anwendungen gezeigt werden. Der Schwerpunkt dieses Artikels besteht dabei nicht in der vollständigen Beschreibung der verwendeten Methoden sondern in der Präsentation einiger exemplarischer Ergebnisse. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden und der vollständigen Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen findet sich in Kleidorfer (2010) bzw. in sonstiger referenzierter Literatur.

## 2 Quellen und Einteilung von Unsicherheiten

In der Literatur sind verschiedene Einteilungen und Klassifizierungen von Unsicherheitsquellen zu finden (z. B. Deletic *et al.*, 2009; Refsgaard *et al.*, 2007; Van Der Keur *et al.*, 2008; Walker *et al.*, 2005). Obwohl die Benennungen variieren, lassen sich prinzipiell zwei Klassifizierungen unterscheiden, zum einen Unsicherheiten nach Unsicherheitsquellen (z. B. in Eingangsdaten, Modellparametern, Modellstruktur) und zum anderen nach ihrer Art (z. B. statistische Unsicherheiten, Szenario-unsicherheiten). Wichtig ist dabei, dass Unsicherheiten auch außerhalb unserer Vorstellung evident sind. Von Van Der Keur *et al.* (2008) wird dies als „total ignorance“, also völlige Unkenntnis bezeichnet. Diese Art

von Unsicherheiten tritt beispielsweise auf, wenn bestimmte Prozesse nicht bekannt sind oder wenn im Falle von Zukunftsprognosen nicht abgeschätzt werden kann, wie etwaige neue (derzeit noch unbekannte) Technologien eine Zukunftsprognose beeinflussen kann. Eine Einschätzung oder gar statistische Beschreibung dieser Unsicherheit ist naturgemäß nicht möglich und wird deshalb üblicherweise in klassisch-technischen Untersuchungen auch nicht durchgeführt.

Deletic *et al.* (2009) unterscheiden drei Hauptgruppen von Unsicherheiten speziell in der Siedlungsentwässerung:

- Unsicherheiten von Eingangsdaten
- Unsicherheiten der Kalibrierung
- Unsicherheiten der Modellstruktur

Dazu kommen in der Prognoseanwendung von Modellen noch Unsicherheiten in der Einschätzung zukünftiger Entwicklungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung, Landnutzungsänderung, Klimawandel). In Abschnitt 4 werden Beispiele für jede der oben erwähnten Unsicherheitsgruppen gezeigt.

### **3 Methoden zur Einschätzung von Unsicherheiten**

Die Analyse des Einflusses von Unsicherheiten verschiedener Quellen auf die Modellierungsergebnisse kann prinzipiell in zwei Verfahrensgruppen unterschieden werden, die sich je nach verfügbarer Datenlage und Fragestellung ergänzen. Dies ist (a) die „Vorwärtsmodellierung“ bei der ausgehend von (gegebenen Unsicherheiten) in Daten, Parametern oder Randbedingungen der Einfluss auf das Modellergebnis ermittelt wird und (b) die „inverse Modellierung“ bei der durch einen Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten die Unsicherheiten z. B. in Daten oder Parametern ermittelt werden. Oft werden diese beiden Verfahren kombiniert angewendet, indem zuerst in der inversen Modellierung anhand einer Referenz-, oder Kalibrierungsperiode (zu der Messdaten verfügbar sind) die Unsicherheiten in Parametern ermittelt werden. An-

schließlich werden in der Vorwärtsmodellierung diese Ergebnisse im Prognosezeitraum (zu dem keine Messdaten verfügbar sind) auf die Modellergebnisse übertragen.

Die Verfahren sind vielfältig und reichen für die Vorwärtsmodellierung von einfachen Fehlerfortpflanzungsgleichungen für lineare Modelle bis hin zu Monte-Carlo basierten Methoden, bei denen Parametersätze zufällig aus einer (vorher bestimmten oder abgeschätzten) Parameterverteilung ausgewählt werden. Für Monte-Carlo Methoden sind oft eine Vielzahl von Simulationsläufen notwendig, wobei die Ergebnisse anschließend statistisch ausgewertet werden.

In der inversen Modellierung ist das Ziel meist eine Bestimmung der Modellparameter (oder deren Verteilung). Übliche Kalibrierungsaufgaben (z. B. Kleidorfer *et al.*, 2008) zur Bestimmung des Parametersatzes, der zur bestmöglichen Übereinstimmung von Messdaten und Simulationsergebnissen führt, zählt daher genauso dazu, wie aufwendigere Methoden zur Bestimmung der Parameterverteilung. Dotto *et al.* (eingereicht zu Water Research) vergleichen beispielsweise vier Verfahren zur Ermittlung solcher Verteilungen. Eine Übersicht über die meist verwendeten Methoden findet sich auch in Beven (2009).

Welche Methodik jeweils am geeignetsten ist, hängt von der Fragestellung, der Datenverfügbarkeit und der Modelllaufzeit ab.

## **4 Beispiele von Unsicherheiten in der Modellierung**

### **4.1 Unsicherheit von Eingangsdaten**

Kleidorfer *et al.* (2009a) und Dotto *et al.* (2010) haben den Einfluss von Unsicherheiten in Eingangsdaten in ein Niederschlag/ Abflussmodell zur Berechnung von Oberflächenabfluss von befestigten Flächen (Quantität und Qualität) untersucht. Mittels Bayes'scher Statistik wurden dazu Verteilungen von Modellparametern ermittelt und analysiert wie sich der Einfluss von Unsicherheiten in den Eingangsdaten auf diese Verteilungen auswirkt.

Es konnte gezeigt werden, dass bestimmte Fehlerquellen – wie eine systematische Unter- oder Überschätzung des Niederschlages – durch eine Anpassung der Modellparameter vollständig kompensiert werden können. Ein derartiges Beispiel findet sich in Abbildung 1 (links). Hier erhöht sich beispielsweise die Verteilung des Modellparameters EIA, der den Befestigungsgrad abbildet, bei einer systematischen Unterschätzung des Niederschlages um – 30 % ( $f=0.7$ ) um 40 %. Die Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Messungen ist letztendlich dann bei beiden Szenarien gleich gut. Andererseits können Fehler in den Eingangsdaten eine Parameterverteilung auch völlig ändern. Ein derartiges Beispiel wird in Abbildung 1 (rechts) gezeigt. Hier ändert sich durch Annahme eines zufälligen Fehlers im Niederschlag, der eine stochastisch wechselnde räumliche Niederschlagsverteilung beschreibt, für einen Modellparameter  $W$  eines Schmutzstoffmodells nicht nur der absolute Wert von 0.002 auf 0.03, sondern die gesamte Verteilung des Parameters wird beeinflusst.

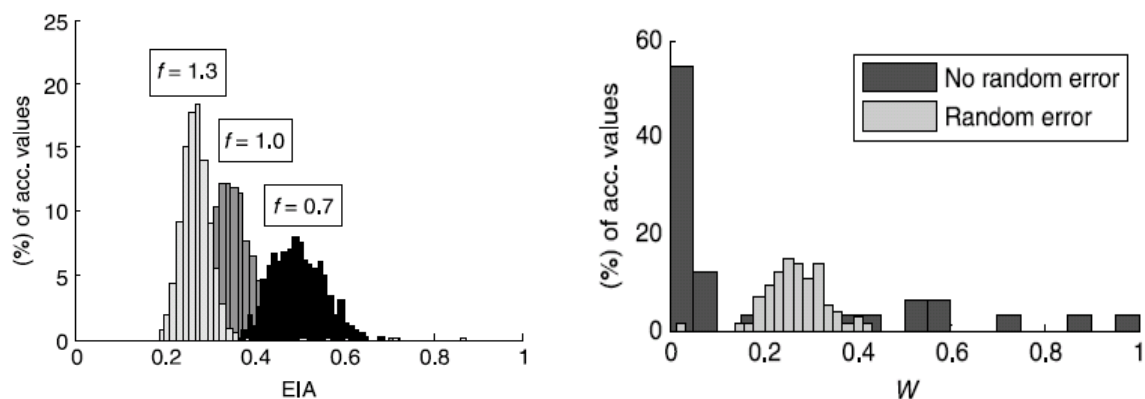


Abbildung 1: Einfluss von Unsicherheiten in Eingangsdaten auf Verteilungen von Modellparametern (aus Kleidorfer *et al.*, 2009a)

Solche „Störungen“ in den Eingangsdaten können somit die Parameterbestimmung im Zuge einer Modellkalibrierung deutlich beeinflussen.

## 4.2 Unsicherheit durch Verfügbarkeit von Kalibrierungsdaten

Räumlich verteilte Modelle zur Berechnung von Kanalisationssystemen können an verschiedenen Stellen im Netz anhand von Durchflussmessungen, Wasserstandsmessungen oder Messungen von Entlastungsvolumina kalibriert werden. Dabei ist es weder notwendig noch

sinnvoll, Daten an jedem einzelnen Bauwerk zu erfassen. Wie viele bzw. welche Messstellen jeweils notwendig sind, um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen, ist dabei im jeweiligen Einzelfall zu untersuchen. In (Kleidorfer *et al.*, 2009b) wurden die Auswirkungen von unterschiedlichen Kalibrierungsstrategien an zwei Fallbeispielen untersucht. Dies ist eine Untersuchung des Einflusses der Verfügbarkeit von Kalibrierungsdaten (räumlich und zeitlich).

#### 4.2.1 Einfluss der örtlichen Datenverfügbarkeit

Abbildung 2 zeigt den Einfluss der örtlichen Verfügbarkeit von Kalibrierungsdaten bei Kalibrierung auf Entlastungsvolumina (links) und bei Kalibrierung auf Anzahl der Entlastungsereignisse (rechts). Als Kalibrierungszeitraum wurden in diesem Falle die Aufzeichnungen über ein Jahr festgelegt.

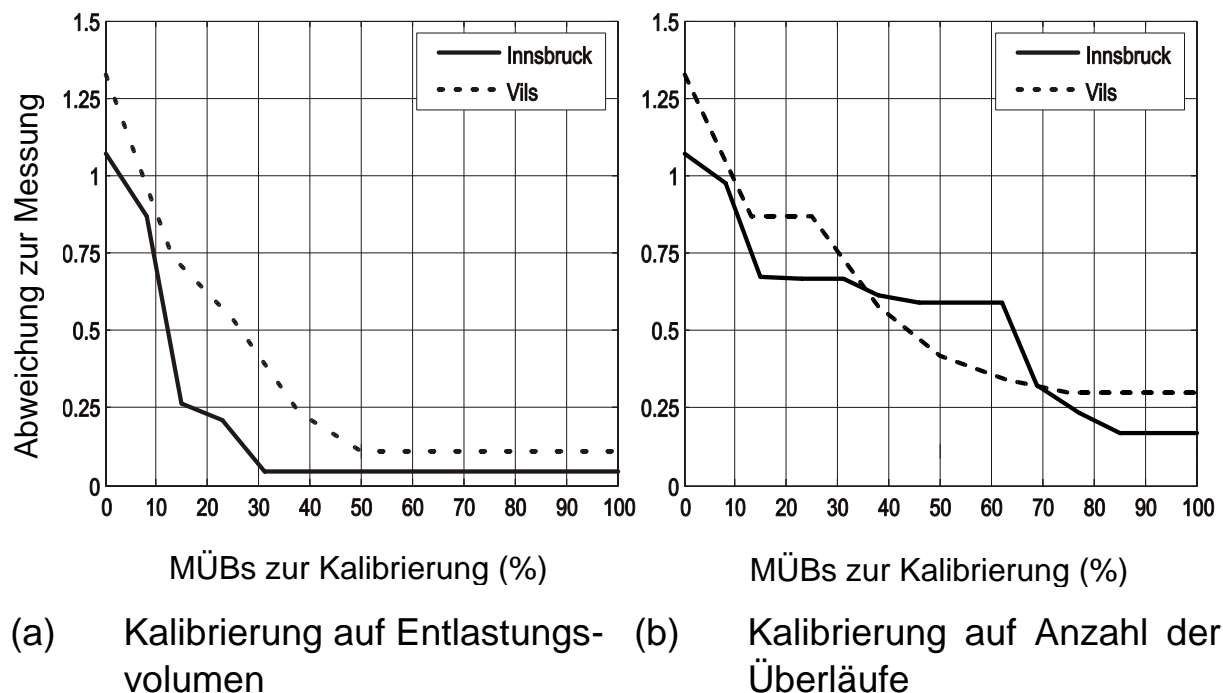


Abbildung 2: Einfluss der Anzahl von Messstellen auf die Kalibrierung  
 (Kleidorfer *et al.*, 2009b)

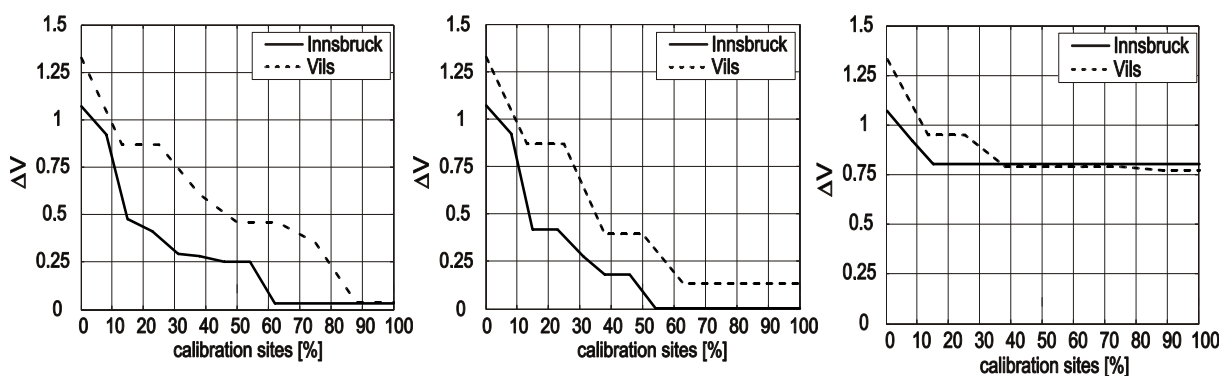
In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass ein unkalibriertes Modell zur Vorhersage des Entlastungsvolumens gegenüber Messdaten zu mehr als 100 % abweichen kann. Durch Kalibrierung auf gemessene Mischwasserentlastungsvolumina kann diese Abweichung auf ca. 10 % (Abbildung 2a), durch Kalibrierung auf Anzahl der Entlastungsereignisse

auf ca. 25 % (Abbildung 2b) reduziert werden. Untersuchungen haben weiters gezeigt, dass es bei Kalibrierung auf den Parameter „Entlastungsvolumina“ ausreichend ist, Daten an 30 % bis 50 % der Mischwasserüberlaufbauwerke zu erheben, während bei Kalibrierung auf den Parameter „Anzahl der Überläufe“ 70 % bis 80 % der Mischwasserüberläufe als Kalibrierungsstellen verwendet werden sollten (vgl. Abbildung 2).

#### 4.2.2 Einfluss der zeitlichen Datenverfügbarkeit

Des Weiteren wird die Kalibrierungsgenauigkeit eines Modells auch von der Dauer der zur Verfügung stehenden Zeitreihen beeinflusst. Wie bereits in mehreren Untersuchungen gezeigt wurde, ist eine Kalibrierung mit Langzeitreihen vorzuziehen, um die Gefahr zu verringern, dass die Simulationsergebnisse durch nicht repräsentative Niederschlagsereignisse verfälscht werden.

Falls trotzdem – aufgrund beschränkter Datenverfügbarkeit – eine Kalibrierung auf Einzelereignisse erfolgt, ist eine sorgfältige Auswahl der entsprechenden Ereignisse notwendig. Eine falsche Ereignisauswahl kann zu einem Scheitern der Kalibrierung führen. In Kleidorfer *et al.*, 2009b wurden auch unterschiedliche Strategien zur Auswahl möglicher Kalibrierungsereignisse untersucht.



(a) Regenauswahl nach Intensitätsspitze    (b) Regenauswahl nach Ereignisdauer    (c) zufällige Regenauswahl

Abbildung 3: Kalibrierung auf Einzelereignisse (aus Kleidorfer *et al.*, 2009b)

Während eine Auswahl von drei Ereignissen mit der stärksten Intensitätsspitze (Abbildung 3a) und mit der längsten Regendauer (Abbildung



3b) zu guten Ergebnissen führt, resultiert eine zufällige Ereignisauswahl in einer maximalen Abweichung von über 75 % (Abbildung 3c). Das Modell ist somit trotz Kalibrierung nicht in der Lage, das Langzeitverhalten des Systems zu prognostizieren.

#### **4.3 Unsicherheit in der Modellstruktur**

Unter Modellstruktur wird die mathematische Übersetzung der Realität in ein Modell verstanden. Hierbei ist es das Ziel, für die Beschreibung eines physikalischen Vorganges alle relevanten Prozesse abzubilden, dabei jedoch die Anzahl der Modellparameter in den Modellgleichungen möglichst gering zu halten. Dotto *et al.*, (in press) haben in der Siedlungsentwässerung jeweils zwei Modelle unterschiedlicher Komplexizität zur Simulation des Oberflächenabflusses (wieder Qualität und Quantität verglichen). Die verwendeten Modelle zur Berechnung der Abflussquantität sind dabei MUSIC (CRCCH, 2005) mit 13 Kalibrierungsparametern und KAREN (Rauch und Kinzel, 2007) mit 4 Parametern pro Einzugsgebiet. Die beiden Modelle bilden unterschiedliche Prozesse ab. So ist beispielsweise in MUSIC die Abflussbildung von durchlässigen Flächen integriert, während in KAREN der Abfluss nur von befestigten Flächen simuliert wird.

Mittels Bayes'scher Statistik wurde eine inverse Modellierung durchgeführt und die Parameterverteilungen (und damit auch die Parametersensitivitäten) ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass beide Modelle vergleichbare Ergebnisse liefern, wenn die Güte der Übereinstimmung über eine Kalibrierungsperiode von 2 Jahren berechnet wird. Die Sensitivität der Parameter hängt nicht nur von der Modellstruktur selbst, sondern auch von den Eingangsdaten (Niederschlag, Einzugsgebietscharakteristik) ab. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass von den 13 Parametern in MUSIC der Großteil insensitive ist. Das bedeutet dass mit beliebigen Werten (innerhalb einer sinnvollen Bandbreite) immer ähnlich gute Modellierungsergebnisse erreicht werden können. Andererseits konnte KAREN für einige starke Niederschlagsereignisse die Abflussspitzen nur ungenügend abbilden. Dies lässt sich auf die Vernachlässigung der durchlässigen Flächen, welche bei hohen Niederschlagsintensitäten abflusswirksam werden, zurückführen. Für beide Modelle ist der Abflussbeiwert der wichtigste Parameter.

Weiters wurden für beide Modelle die Anteile der Unsicherheiten aus den Modellparametern und aus übrigen Quellen (Messfehler, räumliche Regenverteilung etc.) berechnet. Abbildung 4 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen (schwarze Punkte) und simulierten Abflüsse für MUSIC (oben) und KAREN (unten) für ein ausgewähltes Ereignis aus der Kalibrierungsperiode. Der dunkle Bereich stellt dabei den durch die 2,5 und 97,5 Perzentile abgegrenzten Unsicherheitsbereich Parameterunsicherheiten dar und der hellere Bereich den durch dieselben Perzentilen abgegrenzten Bereich der Gesamtunsicherheit. Die schwarze Linie repräsentiert die Simulationsergebnisse mit dem optimalen Parametersatz.

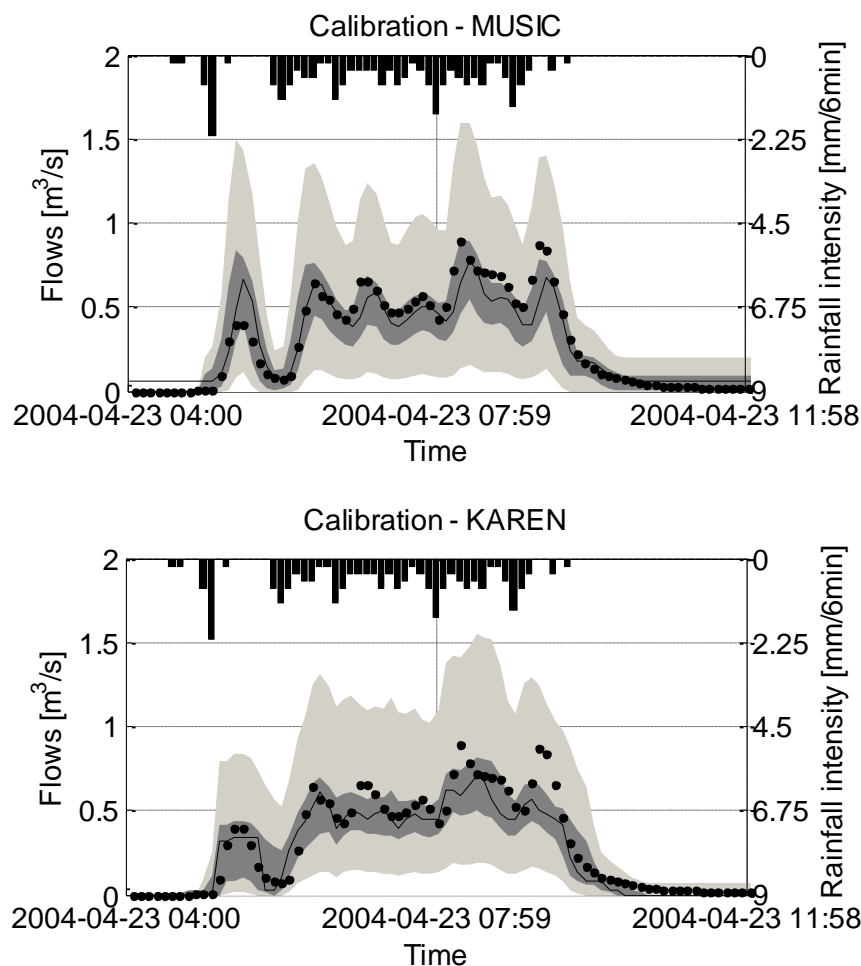


Abbildung 4: Vorhersageunsicherheit mit MUSIC (oben) und KAREN (unten) für eine Kalibrierungsperiode (links) und eine Validierungsperiode (rechts) (aus Dotto *et al.*, in press).

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist können die Unsicherheiten beträchtlich sein und mehr als 150 % betragen. Der breite Unsicherheitsbereich der Gesamtunsicherheit zeigt, dass vor allem der Einfluss von Unsicherheitsquellen, die nicht bei den Modellparametern liegen, sehr deutlich ist. Dies können Messunsicherheiten, räumlich Regenverteilung oder sonstige – nicht berücksichtigte – Vorgänge sein.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im gegenständlichen Artikel wurden einige Beispiele von Unsicherheiten in der Modellierung von Systemen der Siedlungsentwässerung gezeigt. Es kann gezeigt werden, dass die Verfügbarkeit der Kalibrierungsdaten (räumliche Auflösung und Länge der Datenreihe) die Güte der Modellergebnisse deutlich beeinflusst. Bei zu geringer Datendichte kann ein scheinbar kalibriertes Modell seine Fähigkeit, außerhalb des Kalibrierungszeitraumes zutreffende Prognosen zu machen, völlig verlieren. Dies hängt stark mit Unsicherheiten in den Eingangsdaten (meist hervorgerufen durch die räumliche Regenverteilung) zusammen.

Modellstrukturunsicherheiten sind von geringerer Bedeutung, allerdings nur wenn ein Modell überhaupt kalibriert werden kann. Wichtig dabei ist jedoch, dass ein Modellparameter immer spezifisch für dieses Modell bestimmt wird und dabei gewisse Unsicherheiten in der Modellstruktur kompensiert. Auch wenn ein Parameter in zwei Modellen denselben physikalischen Hintergrund hat (z. B. die abflusswirksame befestigte Fläche eines Einzugsgebietes) kann er nicht ohne weiteres von einem Modell in das andere übertragen werden.

Auf wissenschaftlicher Ebene ist es klar, dass die Unsicherheiten von Modellausgaben sehr groß sein können. In praxisnahen Projekten mit konkreten Planungsaufgaben werden Unsicherheitsanalysen jedoch nur sehr selten durchgeführt (Vanrolleghem *et al.*, 2011, angenommen). Es sollte also das Ziel sein, die in der Wissenschaft verwendeten Methoden derart aufzubereiten und geeignete Softwarewerkzeuge für die Praxis bereitzustellen, dass Unsicherheitsanalysen mit nicht allzu hohem zusätzlichen Aufwand in der täglichen Ingenieurpraxis verwendet werden können. Besondere Bedeutung kommt hierbei auch der Kommunikation

der ermittelten Unsicherheiten an Entscheidungsträger und an die Öffentlichkeit zu.

## 6 Literatur

- Beck, M.B. (1987): Water quality modelling: a review of the analysis of uncertainty. In: *Water Resources Research*, Vol. 23(8), S. 1393–1442.
- Bertrand-Krajewski, J.L.; Barraud, S. und Bardin, J.P. (2002): Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities. In: *Urban Water*, Vol. 4(2), S. 163-179.
- Beven, K. (2009): *Environmental Modelling: An Uncertain Future?*, Routledge, Taylor and Francis Group, USA.
- CRCCH (2005): *MUSIC Version3 - User guide*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Deletic, A.; Dotto, C.B.S.; Fletcher, T.D.; McCarthy, D.T.; Bertrand-Krajewski, J.L.; Rauch, W.; Kleidorfer, M.; Freni, G.; Mannina, G. und Tait, S. (2009): Defining Uncertainties in Modelling of Urban Drainage Systems. In: *Tagungsunterlagen von 8th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Tokyo, Japan.
- Dotto, C.B.S.; Kleidorfer, M.; Deletic, A.; Fletcher, T.D. und Rauch, W. (in press): A Bayesian approach for performance evaluation of stormwater models based on long-term high-resolution measurement data. In: *Environmental Modelling & Software*.
- Dotto, C.B.S.; Kleidorfer, M.; McCarthy, D.T.; Deletic, A.; Rauch, W. und Fletcher, T.D. (2010): Towards Global Assessment of Modelling Errors. In: *Tagungsunterlagen von 6th International Conference on Sewer Processes and Networks (SPN6)*, Surfers Paradise, Australia, 7-10 November 2010.
- Dotto, C.B.S.; Mannina, G.; Kleidorfer, M.; Vezzaro, L.; Henrichs, M.; McCarthy, D.T.; Freni, G.; Rauch, W. und Deletic, A. (eingereicht zu Water Research): Comparison of different uncertainty techniques in urban stormwater quantity and quality modelling.
- Gallagher, M. und Doherty, J. (2007): Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model. In: *Environmental Modeling & Software*, Vol. 22, S. 1000 - 1020.
- Harremoes, P. (2003): The role of uncertainty in application of integrated urban water modelling. In: *Tagungsunterlagen von IMUG Conference*, Tilburg, Netherlands, 23.-25.05.2003.

- Hoppe, H. und Gruening, H. (2007): Significance of uncertainties in the input data used in the integrated design of wastewater systems. In: *Tagungsunterlagen von 6th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management - Novatech*, Lyon, France, June, 2007, Vol. 3, S. 1607 -1614.
- Kavetski, D.; Kuczera, G. und Franks, S.W. (2006): Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. In: *Water Resources Research*, Vol. 42 W03407.
- Keating, E.H.; Doherty, J.; Vrugt, J.A. und Kang, Q.J. (2010): Optimization and uncertainty assessment of strongly nonlinear groundwater models with high parameter dimensionality. In: *Water Resources Research*, Vol. 46, S. -.
- Kleidorfer, M. (2010): *Uncertain calibration of urban drainage models - A scientific approach to solve practical problems*. innsbruck university press, Innsbruck, ISBN 978-3-902719-62-1.
- Kleidorfer, M.; Deletic, A.; Fletcher, T.D. und Rauch, W. (2009a): Impact of input data uncertainties on urban stormwater model parameters. In: *Water Science and Technology*, Vol. 60(6), S. 1545-1554.
- Kleidorfer, M.; Fach, S. und Rauch, W. (2008): Hinweise zur Kalibrierung von hydrologischen Modellen für die Anwendung von ÖWAV Regelblatt 19/neu. In: *Wiener Mitteilungen*, Vol. 209.
- Kleidorfer, M.; Moderl, M.; Fach, S. und Rauch, W. (2009b): Optimization of measurement campaigns for calibration of a conceptual sewer model. In: *Water Science and Technology*, Vol. 59(8), S. 1523-1530.
- Rauch, W. und Kinzel, H. (2007): *KAREN - User Manual*.
- Rauch, W.; Kleidorfer, M. und Fach, S. (2010): Vom Bleistift zum Prozessor: Wandel der Modelle in der Siedlungsentwässerung. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Vol. 62(3-4), S. 43-50.
- Refsgaard, J.C.; Van Der Sluijs, J.P.; Hojberg, A.L. und Vanrolleghem, P.A. (2007): Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. In: *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22(11), S. 1543-1556.
- Van Der Keur, P.; Henriksen, H.; Refsgaard, J.; Brugnach, M.; Pahl-Wostl, C.; Dewulf, A. und Buiteveld, H. (2008): Identification of major sources of uncertainty in current IWRM practice. Illustrated for the Rhine basin. In: *Water Resources Management*, Vol. 22(11), S. 1677-1708.
- Vanrolleghem, P.; Bertrand-Krajewski, J.; Brown, R.; Croke, B.; Kapelan, Z.; Kleidorfer, M.; Kuczera, G.; McCarthy, D.; Mikkelsen, P.; Rauch, W.; Refsgaard, J. und Deletic, A. (2011, angenommen): Uncertainties in water system models – breaking down the water discipline silos. In: *Tagungsunterlagen von 8th IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment (Watermatex 201)*, San Sebastian, Spain.

Walker, W.; Harremoes, P.; Rotmans, J.; Van Der Sluijs, J.; Van Asselt, M.; Janssen, P. und Krayen Von Krauss, M. (2005): Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. In: *Integrated Assessment*, Vol. 4(1).

**Korrespondenz an:**

**Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Kleidorfer**

Universität Innsbruck – Arbeitsbereich Umwelttechnik

Tel.: +43 512 507 6934

Fax: +43 512 507 9490 6934

Internet: <http://umwelttechnik.uibk.ac.at>

E-mail: [manfred.kleidorfer@uibk.ac.at](mailto:manfred.kleidorfer@uibk.ac.at)