

Generierung simultaner synthetischer Niederschlagszeitreihen zur Berücksichtigung von Ungleichberegnung bei stadthydrologischen Anwendungen

Tobias Mosthaf, Thomas Müller, András Bárdossy

IWS - Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart

Kurzfassung

Zur Planung von städtischen Entwässerungssystemen sowie zur Berechnung von Schmutzfrachten werden hydrologische und hydraulische Simulationen durchgeführt. Dabei werden zeitlich hochaufgelöste Niederschlagszeitreihen als Eingangsgröße benötigt. Liegen gemessene Daten nicht in ausreichender Güte und Länge vor, können synthetisch generierte Niederschlagszeitreihen genutzt werden. Am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart wurde der Niederschlags-Simulator NiedSim für synthetische Punktzeitreihen entwickelt. Um diese Zeitreihen zu erstellen, werden verschiedene statistische Eigenschaften von Niederschlag verwendet. Zusammenhänge der zeitlichen Auflösungen zwischen 5 min und 24 h werden dabei mit einem Skalierungsparameter beschrieben. Gemessene Niederschlagsdaten zeigen jedoch einen Skalierungsbruch zwischen 40 und 80 min. In der neuen Version von NiedSim wird dieser Bruch durch die getrennte Betrachtung der Skalierungsparameter für die Generierung und Disaggregation berücksichtigt. Die dadurch erzielten Verbesserungen werden mit einem fiktiven Kanalnetz nachgewiesen. Um die punktwise erzeugten Zeitreihen in die Fläche zu übertragen, wird eine neue Methode eingeführt, die simultane Zeitreihen erzeugen kann. Diese sollen die räumliche Variabilität von Niederschlagsereignissen abbilden, um z.B. Einsparpotentiale durch Abflusssteuerungsmaßnahmen besser zu bewerten. Die bisherige Auswertung der simultan erzeugten Zeitreihen mit statistischen Gütemaßen zeigt, dass diese plausibel sind, jedoch die räumlichen Zusammenhänge unter- und die Niederschlagswerte überschätzt werden.

1 Hintergrund

Entwässerungssysteme dienen primär der Ableitung von Abwässern, stellen während Niederschlagsereignissen jedoch auch einen elementaren Bestandteil für den innerstädtischen Überflutungsschutz dar. Daraus lassen sich zwei stadthydrologische Anwendungsgebiete ableiten: die Planung und der Betrieb von Entwässerungssystemen sowie die Berechnung von Schmutzfrachten. In diesen Anwendungsgebieten werden hydrologische und hydraulische Simulationen durchgeführt, wobei Niederschlagsdaten als Eingangsgröße benötigt werden. Für Orte, an denen die gemessenen Daten nicht in ausreichender Güte und Länge vorliegen, können synthetisch generierte Niederschlagszeitreihen genutzt werden.

Bárdossy (1998) entwickelte ein stochastisches Generierungsschema für synthetische Niederschlagszeitreihen, dessen operationelle Version NiedSim seit 2000 in mehreren Bundesländern eingesetzt wird. In der Entwicklung von NiedSim lag ein Schwerpunkt auf einer realistischen Wiedergabe von Extremwerten, welche für die Bemessung von Kanalsystemen entscheidend sind. In Müller et al. (2014) wurden bereits Weiterentwicklungen von NiedSim für die Schmutzfrachtberechnung beschrieben und deren Einfluss integral bewertet.

Bei der Verwendung der generierten synthetischen Niederschlagszeitreihen für hydrologische und hydraulische Simulationen werden die punktweise simulierten Reihen als Gebietsniederschlag angenommen. Diese Annahme ist jedoch problematisch. Extreme Niederschläge, die durch Konvektionsströmungen entstehen, haben oft eine geringe horizontale Ausdehnung und weisen räumlich sehr stark variierende Niederschlagsintensitäten auf. Dies kann zu falschen Bemessungen von Entwässerungssystemen führen. Weiterhin ist die Betrachtung von Einsparpotentialen durch Abflusssteuerungsmaßnahmen mit räumlich homogen verteiltem Niederschlag problematisch, da erst die Ungleichberegnung die vorhandenen Potentiale aufzeigen kann. Die simultane Generierung von Niederschlagszeitreihen an verschiedenen Orten bietet eine Lösungsmöglichkeit für diese Probleme. In Kapitel 2 wird zunächst die punktweise Generierung von Niederschlagszeitreihen und deren Weiterentwicklung beschrieben. Daran anschließend werden in Kapitel 3 die Methode zur simultanen Erzeugung von

Zeitreihen und erste Ergebnisse beschrieben. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 2 und 3 zusammenfassend dargestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen sind Bestandteil der BMBF-Projekte SAMUWA (Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts) und SYNOPSE (Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen).

2 Punktweise Generierung einer Niederschlagszeitreihe

2.1 Generierungsschema

Das Generierungsschema von NiedSim lässt sich in zwei Teile aufteilen:

1. Erstellen einer Datenbank mit zeitlichen Niederschlagscharakteristiken
2. Punktweise Generierung einer 5-minütigen Niederschlagszeitreihe

Für die Datenbank werden verschiedene zeitliche Niederschlagscharakteristiken an allen Standorten von Niederschlagsmessgeräten berechnet und anschließend mit einer Interpolationsmethode auf ein 1 km x 1 km Raster im betrachteten Gebiet (z.B. Baden-Württemberg) übertragen. In der punktwisen Generierung wird zunächst eine stündliche Zeitreihe für eine Rasterzelle erstellt. Anschließend wird diese Zeitreihe auf eine 5-minütige Zeitreihe disaggregiert. Sowohl bei der Generierung als auch bei der Disaggregation werden stochastische Optimierungen durchgeführt, sodass die statistischen Eigenschaften der synthetischen Zeitreihe möglichst gut die interpolierten (gemessenen) Statistiken widerspiegeln.

2.2 Weiterentwicklung

In Müller et al. (2014) wurden bereits Weiterentwicklungen von NiedSim beschrieben. Eine weitere Neuerung betrifft die Skalierungsparameter. Diese bilden den Zusammenhang der 1., 2. und 3. empirischen Momente verschiedener Aggregierungsstufen ab. In der ursprünglichen Version von NiedSim wurde das 1. - 3. Moment jeweils mit den Aggregierungsstufen 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h berechnet und anschließend für jedes Moment der entsprechende Skalierungsparameter bestimmt. Problematisch bei dieser Berechnung der Skalierungsparameter ist die gleichzeitige Verwendung von zeitlich hochaufgelösten und nicht hochaufgelösten Daten. Hoang et al. (2012) beschreiben das Auftreten eines Skalierungsbruchs bei Auflösungen zwischen 40 und 80 min. Um

diesem Skalierungsbruch Rechnung zu tragen, werden die Skalierungsparameter für die verschiedenen Momente jeweils sowohl mit Niederschlagswerten der Aggregationen zwischen 5 min und 1 h als auch mit Aggregationen zwischen 1 h und 24 h berechnet. Diese gehen getrennt in die Generierung bzw. Disaggregation ein.

Zur Validierung der mit NiedSim generierten Zeitreihen wurden Schmutzfrachtsimulationen mit dem Programm KOSIM 7.4 (itwh, 2009) durchgeführt. Dabei werden die Simulationsergebnisse basierend auf generierten Zeitreihen mit den Simulationsergebnissen basierend auf gemessenen Zeitreihen verglichen (s. dazu auch Müller et al. (2014)). Um den Einfluss des Generierungsschrittes getrennt von den anderen Teilschritten in NiedSim bewerten zu können, wird eine 20 jährige Messreihe auf stündlicher Aggregation zufällig gemischt. Mit dem NiedSim Generierungsalgorithmus wird anschließend die zeitliche Struktur der stündlichen Werte wieder hergestellt. Die so generierte Zeitreihe wird mit der gemessenen Zeitreihe verglichen.

Das für die Validierung verwendete fiktive Kanalnetz ist in Drechsel (1991) beschrieben. Dabei werden verschiedene spezifische Beckenvolumina (0, 15, 30, 50 [m³/ha]) mit verschiedenen spezifischen Drosselabflüssen (0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10, 15, 30 [l/(s·ha)]) kombiniert, um unterschiedliche Überläufe und Überlaufbecken zu betrachten. Diese bilden das Spektrum der in der Praxis verwendeten Bauwerke weitestgehend ab. Damit können möglichst allgemeingültige Aussagen über die Verwendung von generierten Niederschlagszeitreihen gemacht werden. In Abbildung 1 sind die mittleren jährlichen Abweichungen des jeweils betrachteten Parameters zwischen generierter und gemessener Zeitreihe dargestellt. Dabei wurde zunächst der ursprüngliche NiedSim-Generierungsalgorithmus verwendet (alt) und anschließend der Generierungsalgorithmus unter Verwendung der hier und in Müller et al. (2014) beschriebenen Neuerungen (neu).

Abbildung 1 zeigt, dass durch die Implementierung der beschriebenen Neuerungen für die meisten Beckenkonfigurationen Verbesserungen erzielt werden. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse bezüglich der Überlaufdauer aber auch, dass es noch Verbesserungspotential gibt.

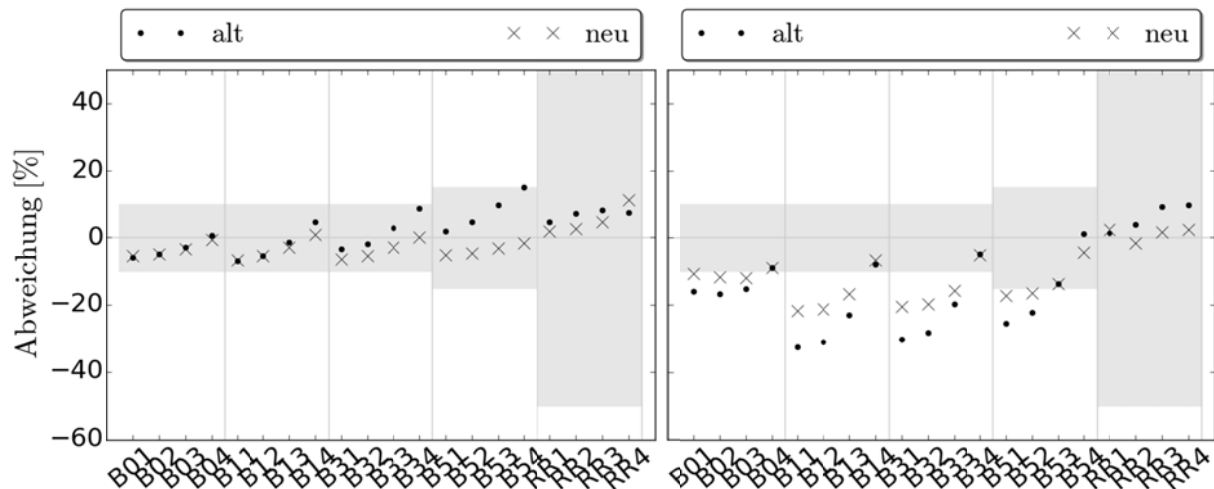


Abb. 1: Mittlere jährliche Abweichungen zwischen generierter und gemessener Zeitreihe für verschiedene Überlaufbecken (B) und Überläufe (RR) für die Parameter Überlaufvolumen (links) und Überlaufdauer (rechts). In grau sind die tolerierbaren Abweichung nach Drechsel (1991) dargestellt.

3 Erzeugung simultaner Zeitreihen

Die Erzeugung simultaner Zeitreihen wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt nur mit stündlichen Niederschlagszeitreihen durchgeführt. Daher wird ausschließlich diese im Folgenden beschrieben.

3.1 Methode

Für die Generierung von simultanen Zeitreihen wird eine am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart neu entwickelte Copula-basierte Methode verwendet, die nachfolgend als Random Mixing bezeichnet wird.

Eine stündliche Niederschlagszeitreihe wird dabei durch das gewichtete Aufsummieren von dreidimensionalen Zufallsfeldern $G_i(x)$ (die einer vorgegebenen zeit-räumlichen Struktur folgen, s. Abbildung 2) tagesweise in den Raum übertragen:

$$G_c(x) = \sum_{i=1}^k \alpha_i G_i(x)$$

Mit: $G_i(x)$ Unkonditionierte dreidimensionale Zufallsfelder

α_i Gewichte

$G_c(x)$ Konditioniertes dreidimensionales Zufallsfeld

Das daraus resultierende konditionierte dreidimensionale Zufallsfeld $G_c(x)$ weist die gleiche zeit-räumliche Struktur wie die $G_i(x)$ -Felder auf und gibt die Niederschlagswerte der punktweise vorgegebenen Zeitreihe an den Konditionierungspunkten (schwarze Kreuze in Abbildung 2) wieder.

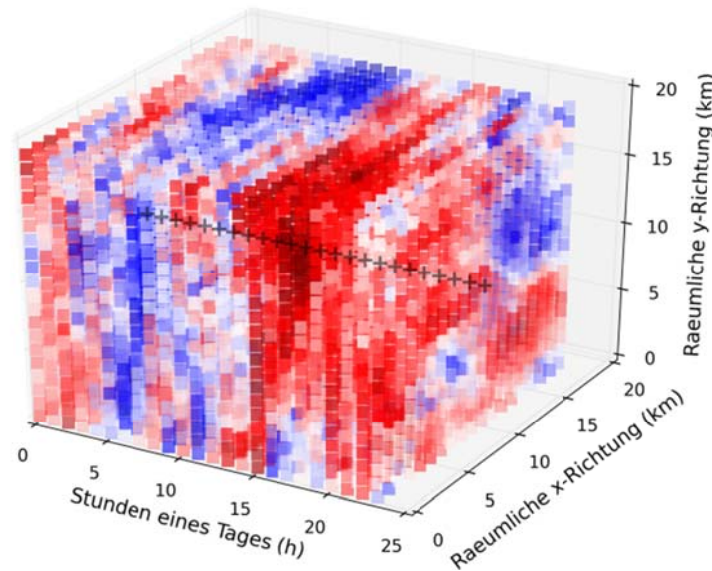


Abb. 2: Dreidimensionales unkonditioniertes zeit-räumliches Zufallsfeld mit den Konditionierungspunkten für die Konditionierungszeitreihe (schwarze Kreuze).

3.2 Ergebnisse

Als Untersuchungsgebiet für die simultane Generierung wird eine Fläche von 7 km x 10 km um die Stadt Reutlingen in Baden-Württemberg mit Höhen zwischen 300 und 500 m ü. NN verwendet (s. Abbildung 3). Dieses Gebiet wurde aufgrund der hohen Dichte an Niederschlagsstationen ausgewählt, da diese eine Untersuchung der kleinräumigen Struktur von Niederschlag ermöglicht.

Eine einjährige Messreihe von stündlichen Niederschlagswerten der Station 6 im Zentrum des Untersuchungsgebietes wird dabei als Konditionierungszeitreihe (s. Abschnitt 3.1) verwendet und mit der Random Mixing Methode in die Fläche übertragen. Die Verwendung einer Messreihe wird der einer generierten Punktzeitreihe (s. Kapitel 2) vorgezogen, da die Erzeugung simultaner Zeitreihen zunächst unabhängig von der punktwisen Generierung betrachtet werden soll. Nach Anwendung der Random Mixing Methode werden die gemessenen Zeitreihen der Stationen mit den generierten Zeitreihen des nächsten Gitterpunktes verglichen.

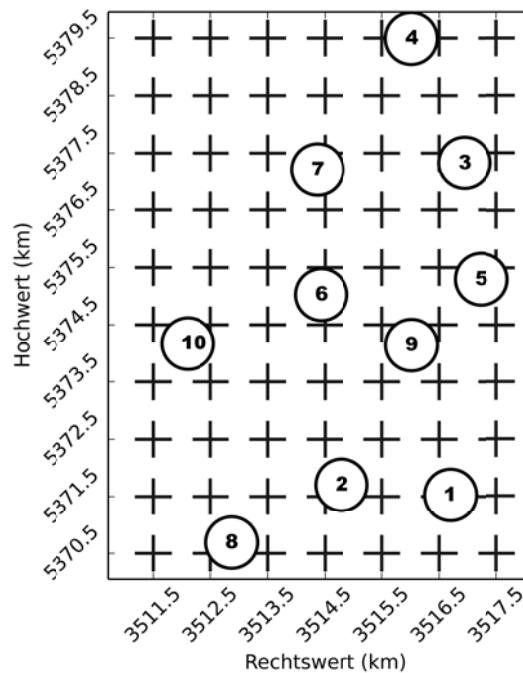


Abb. 3: Lage der Niederschlagsstationen (Kreise) im Untersuchungsgebiet und Gitterpunkte der simultan generierten Niederschlagszeitreihen.

Die simulierten und gemessenen Zeitreihen werden dabei mit zwei statistischen Maßen verglichen. Zunächst werden die Verteilungsfunktionen der Niederschlagswerte an den einzelnen Punkten betrachtet. Die Verteilungsfunktion $F(x)$ beschreibt dabei die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten verschiedener Niederschlagswerte x , bildet also die Häufigkeitsverteilung verschiedener Niederschlagswerte ab:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad \text{dabei ist } P \text{ eine Wahrscheinlichkeit}$$

In Abbildung 4 sind die Verteilungsfunktionen für Niederschlagswerte mit $F > 0.99$ der gemessen und generierten Zeitreihen für die Stationen 9 und 1 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Verlauf der Verteilungsfunktionskurven korrekt abgebildet wird, die Niederschlagswerte durch die Generierung jedoch überschätzt werden (um 1 – 3 mm/h für die betrachteten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten).

Als Maß für den räumlichen Zusammenhang der Niederschlagswerte zwischen den verschiedenen Stationen wird die Rangkorrelation verwendet. Diese ist die Korrelation der Ränge der Niederschlagswerte von jeweils zwei Stationen und kann Werte zwischen +1 (vollständig positiver Zusammenhang) und -1 (vollständig negativer Zusammenhang) aufweisen.

Die Ränge $r(x)$ der n Niederschlagswerte x_1, \dots, x_n einer Station werden durch Sortieren der Werte und das Ersetzen der Werte durch ihre Position bestimmt:

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad \text{mit} \quad x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$$

$$r(x) = [1, 2, 3, \dots, n]$$

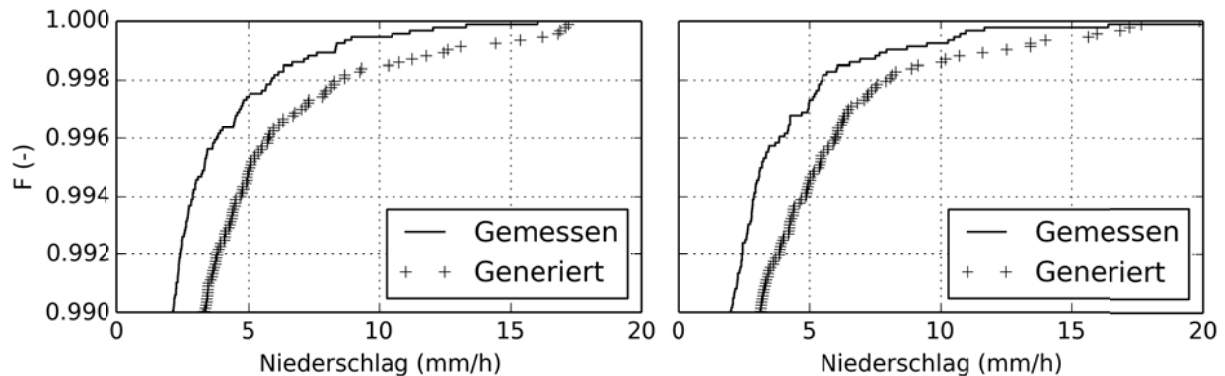


Abb. 4: Verteilungsfunktionen der Stationen 1 (links) und 9 (rechts) für gemessene und generierte Niederschlagswerte.

In Abbildung 5 sind die Rangkorrelationswerte der Stationspaare im Untersuchungsgebiet für Stunden- und Tagesniederschlagswerte über die Distanz zwischen dem jeweiligen Paar aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass die Korrelationen der generierten Zeitreihen die Korrelationen der gemessenen Zeitreihen leicht unterschätzen. Jedoch werden die Korrelationen plausibel abgebildet, da sie mit der Distanz abnehmen und von den Stunden- zu den Tageswerten zunehmen.

4 Schlussfolgerungen

Die punktweise Generierung von Niederschlagszeitreihen wurde bezüglich deren Anwendung bei Schmutzfrachtberechnungen weiter verbessert. Mit der Random Mixing Methode wurde zudem ein Verfahren entwickelt, das ausgehend von einer punktweisen Generierung plausible simultane Zeitreihen erzeugen kann. Es besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf, da Niederschlagswerte überschätzt und räumliche Zusammenhänge unterschätzt werden.

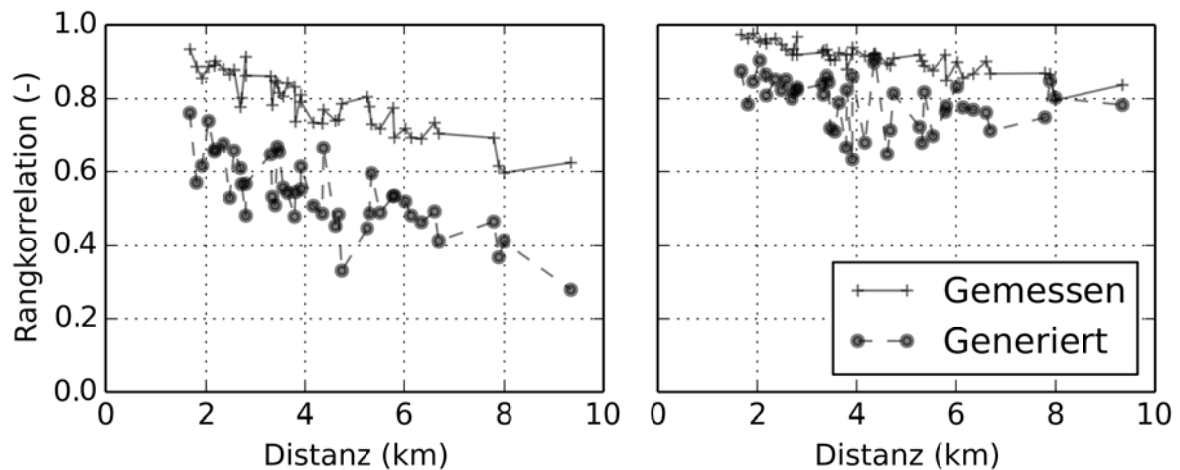


Abb. 5: Rangkorrelationen der Stationspaare für die Sommermonate (Mai, Juni, Juli, August) für Stunden- (links) und Tagesniederschlagswerte (rechts).

Neben der Auswertung mit statistischen Maßen sollen die simultanen Niederschlagszeitreihen bei zukünftigen Untersuchungen mit einem stadthydrologischen Simulationsmodell validiert werden, um deren Nutzen für stadthydrologische Fragestellungen zu bewerten.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim BMBF für die finanzielle Unterstützung, die diese Arbeit im Rahmen der Projekte SYNOPSE und SAMUWA innerhalb der Fördermaßnahme Nachhaltiges Wassermanagement NaWaM-INIS möglich machte. Weiterhin möchten wir uns beim Deutschen Wetterdienst DWD, der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW sowie der Stadtentwässerung Reutlingen SER für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten bedanken.

Literatur

- Bárdossy, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research* 34(7): 1737-1744.
- Drechsel, U. (1991): Repräsentanz und Übertragbarkeit von Niederschlagsersatzbelastungen zur Durchführung von Schmutzfrachtberechnungen. Inst. für Wasserbau, Techn. Hochsch. Darmstadt, Darmstadt.
- Hoang, C.T., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Arnaud, P., Lavabre, J., Lovejoy, S. (2012): Assessing the high frequency quality of long rainfall series. *Journal of Hydrology* 438-439: 39 -51.
- itwh, 2009: KOSIM 7.3 - Modellbeschreibung, Hannover, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie.
- Müller, T., Dittmer, U., Bárdossy, A. (2014): Generierung von synthetischen Niederschlagszeitreihen für die Schmutzfrachtsimulation. In Tagungsband Aqua Urbanica 2014 - Misch - und Niederschlagswasserbehandlung im urbanen Raum.

Anschrift des Verfassers:

Tobias Mosthaf
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie
Pfaffenwaldring 61
D-70569 Stuttgart
Tobias.Mosthaf@iws.uni-stuttgart.de