

Generierung von synthetischen Niederschlagszeitreihen für die Schmutzfrachtsimulation

Thomas Müller¹⁾, Ulrich Dittmer²⁾, András Bárdossy¹⁾

¹⁾ IWS - Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, thomas.mueller@iws.uni-stuttgart.de

²⁾ ISWA - Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart, ulrich.dittmer@iswa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Für die simulationsgestützte Planung von Entwässerungssystemen werden hochaufgelöste, kontinuierliche Zeitreihen benötigt. Häufig stehen hierfür gemessene Daten nicht oder in nicht ausreichender Qualität oder Länge zur Verfügung. Der stochastische Niederschlagsgenerator NiedSim wird verwendet, um für beliebige Orte kontinuierliche, langjährige Zeitreihen zu erzeugen. Bei der Anwendung dieser synthetischen Niederschlagsdaten in der Schmutzfrachtsimulation weichen die berechneten Entlastungskenngrößen jedoch sehr stark von den Ergebnissen der Simulation mit gemessenen Niederschlagsreihen ab. In der hier präsentierten Untersuchung wurden die Ursachen dieser Abweichungen untersucht und Lösungsansätze erprobt. Die Generierung erzeugt zu kurze Nass- und Trockenperioden. Außerdem treten größere Niederschlagswerte zu dicht aufeinanderfolgend auf. Deswegen werden die Verteilungen der Nass- und Trockenperioden als neue Optimierungsparameter aufgenommen. Außerdem werden in der Optimierung der zeitlichen Abfolge größere Niederschlagswerte in einem Poisson-Prozess fix in der Zeitreihe positioniert. Durch diese beiden Maßnahmen können die synthetischen Niederschlagszeitreihen in Bezug auf das Entlastungsverhalten entscheidend verbessert werden.

Hintergrund

Bei stadthydrologischen Fragestellungen werden oftmals Langzeitsimulationen durchgeführt, um ein langfristiges Verhalten zutreffend zu beschreiben. Hierfür werden wiederum langjährige Zeitreihen des örtlichen Niederschlags als Eingangswerte benötigt. Entsprechende Messreihen stehen in ausreichender Qualität nur für wenige Standorte zur Verfügung. Ersatzweise können synthetisch generierte Niederschlagszeitreihen verwendet werden, die die relevanten Eigenschaften tatsächlichen Niederschlags zutreffend abbilden. Diese relevanten Eigenschaften können für verschiedene Aufgabengebiete unterschiedlich sein. Beispielsweise ist für die Kanalnetzmodellierung das Verhalten bei Starkregenereignissen von Bedeutung, wohingegen in der Schmutzfrachtberechnung auch kleine und mittlere Ereignisse wichtig sein können.

Ein Generierungsprinzip für synthetische Zeitreihen wurde in Bárdossy (1998) beschrieben. Hierbei handelt es sich um einen datengetriebenen, stochastischen Niederschlagsgenerator. Ein auf diesem Prinzip basierender Niederschlagssimulator („NiedSim“) ist seit 2000 in Baden-Württemberg, seit 2003 Hessen/Rheinland-Pfalz und seit 2009 in Bayern operationell im Einsatz. Bei der Anwendung von NiedSim-Daten in der Schmutzfrachtberechnung zeigen sich jedoch erhebliche Abweichungen in der Entlastungscharakteristik gegenüber den Ergebnissen aus Berechnungen mit Messdaten (siehe z.B. Bendel et al. 2013). Die hier vorgestellte Studie liefert einen Beitrag zur Weiterentwicklung von NiedSim, mit dem Ziel die wesentlichen Kenngrößen des Entlastungsverhaltens realitätsnah abzubilden. Die Untersuchungen sind Bestandteil der BMBF-Verbundvorhaben SAMUWA (Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts)

und SYNOPSE (Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen).

Bisheriges Generierungsschema

Der Generator „NiedSim“ besteht aus zwei Teilen, einer Datenbank und der eigentlichen Generierung. In der Datenbank sind verschiedene statistische Parameter abgelegt, auf die während der Generierung zurückgegriffen wird. Diese werden einmalig aus gemessenen Zeitreihen verschiedener Orte berechnet und anschließend auf einem 1 km x 1 km Raster mit Hilfe eines External-Drift-Krigings regionalisiert. Hierbei kann in statistische Parameter der Niederschlagsverteilungen (σ_i) und der Niederschlagsstruktur (φ_i) unterschieden werden. Die Parameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Generierung verläuft jahresweise über zwei unabhängige Prozesse. Zuerst wird eine stündliche Zeitreihe mit Niederschlagswerten auf Basis von σ_i erzeugt. Diese Zeitreihe besitzt bereits die richtige Niederschlagsmenge und -verteilung für den gewählten Ort, hat jedoch keinen korrekten zeitlichen Zusammenhang. Um diesen herzustellen, wird die Zeitreihe in einem Simulated Annealing Algorithmus hinsichtlich der statistischen Parameter φ_i optimiert. Das heißt, zwei Niederschlagswerte innerhalb der Zeitreihe werden zufällig ausgetauscht, die statistische Parameter φ_i berechnet und mit den gemessenen Statistiken für den gewählten Ort aus der Datenbank verglichen. Bei einer Verbesserung wird die Änderung beibehalten, bei einer Verschlechterung wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der vorherige Zustand wiederhergestellt. Das Tauschen erfolgt so lange, bis die statistischen Parameter φ_i möglichst gut die Eigenschaften einer natürlichen Zeitreihe wiedergeben.

Anschließend erfolgt die Disaggregation der stündlichen Zeitreihe zu einer Zeitreihe mit 5-minütiger Auflösung. Hierzu wird ein ähnlicher Simulated Annealing Algorithmus angewendet. In diesem werden jedoch keine Werte getauscht, sondern kleine Niederschlagsinkremente innerhalb einer Stunde addiert und subtrahiert bis die Eigenschaften der simulierten Zeitreihe einer gemessenen entsprechen.

Tabelle 1: Parameter in der stündlichen Generierung

σ_i	φ_i
Niederschlagsverteilung	Autokorrelation auf versch. Aggregationen (5 min – 24 Stunden)
Extremwertverteilung	Skalierungsparameter (5 min – 24 Stunden)
	Kreuzkorrelation mit Referenzstation
	Monatssummen
	Tagesniederschlagswahrscheinlichkeit
	Tagesmaximum

Anwendung in der Schmutzfrachtsimulation

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit von NiedSim-Zeitreihen in der Schmutzfrachtsimulation wurde das Programm KOSIM 7.4 (itwh, 2009) verwendet. Niederschlagszeitreihen aus Freiburg und Reutlingen wurden für die Validierung genutzt. Es wurde ein vereinfachtes fiktives Entwässerungssystem simuliert, das bereits in vorangegangenen Studien verwendet wurde (Bendel et al., 2013). Es wurden die Zeiträume 2007 - 2012 (Freiburg) sowie 1995 - 2011 (Reutlingen) verwendet. Als wesentliche Parameter der Entlastungsaktivität wurden Überlaufmenge (VQue), -dauer (Tue) und -häufigkeit (Nued = Tage mit Entlastung) betrachtet. Die Referenzwerte für alle weiteren Betrachtungen sind jeweils die Werte, die durch die Schmutzfrachtsimulation auf Basis gemessener Niederschlagsdaten ermittelt wurden.

Zuerst wurde untersucht in wie weit die Ergebnisse der Simulation mit generierten Zeitreihen von den Referenzwerten abweichen. Hierbei zeigt sich, dass mit den NiedSim-Daten die Überlaufdauer relativ gut getroffen, das Überlaufvolumen jedoch stark überschätzt (bis + 30 %) wird, wohingegen die Anzahl an Tagen mit Überlauf deutlich unterschätzt wird (bis - 30 %).

Auf Grund der komplexen Struktur von Niederschlagszeitreihen und dementsprechend vielen Parametern im Generierungsalgorithmus wurde die Fehleranalyse in separate Abschnitte unterteilt. In NiedSim wird die zeitliche Struktur der Stundenwerte, d.h. die Parameter φ_i , unabhängig von der Niederschlagsmenge (σ_i) optimiert. Zudem sind die Generierung von Stundendaten und die Disaggregation zu 5-minütigen Zeitreihen unabhängig voneinander. Somit können die Generierung und die Disaggregation unabhängig voneinander und insbesondere die Niederschlagsstruktur unabhängig von der Niederschlagsverteilung untersucht werden.

Zunächst wird die Disaggregation betrachtet. Hierzu wurden die gemessenen Zeitreihen in 5-minütiger Auflösung auf Stundenwerte aggregiert und anschließend die Niederschlagsmenge innerhalb einer Stunde auf 12 x 5 Minuten gleichverteilt. Mit dieser gemessenen Zeitreihe ohne 5-minütige zeitliche Struktur und mit der originalen Zeitreihe wurde eine Schmutzfrachtsimulation durchgeführt. Die Abweichungen der Entlastungskenngrößen von den Referenzwerten betragen +/- 10%. Wird die zeitliche Struktur der 5-minütigen Zeitreihe nicht gleichverteilt, sondern mit NiedSim disaggregiert, werden die Abweichungen auf +/- 5 % reduziert. Die großen Abweichungen bei der Niederschlagssimulation sind somit nur zu einem geringen Teil durch die Disaggregation bedingt.

Um den Fehler abzuschätzen, der bei der Optimierung der zeitlichen Abfolge der Stundenwerte entsteht, wurden gemessene Zeitreihen jahresweise auf stündlicher Basis gemischt. Diese Zeitreihen mit korrekter Verteilung (σ_i), jedoch zerstörter zeitlicher Struktur (φ_i) wurden danach mit NiedSim optimiert. Da nur der Einfluss der stündlichen Optimierung betrachtet werden sollte, wurden die Zeitreihen nicht mehr disaggregiert, sondern der Niederschlag innerhalb einer Stunde gleichverteilt. Als Konsequenz mussten auch die Referenzwerte angepasst werden. Hierzu wurden die gemessenen Zeitreihen in 5-minütiger Auflösung auf Stundenwerte aggregiert und anschließend innerhalb dieser Stunde gleichverteilt. Die Abweichungen der damit ermittelten Entlastungsdaten von den Referenzwerten zeigt deutlich, dass die bisherige Optimierung die zeitliche Struktur nicht wiederherstellen kann. Überlaufdauer und Überlaufhäufigkeit werden deutlich unterschätzt, wohingegen die Überlaufmenge überschätzt wird (Abbildung 1, „alt“).

Das Problem einer Unterschätzung der Überlaufdauer/-häufigkeit bei gleichzeitiger Überschätzung der Überlaufmenge hat zwei Ursachen. Einerseits enthalten die optimierten Zeitreihen im Vergleich zu den gemessenen zu kurze Ereignisdauern, d.h. sowohl Niederschlagsereignisse als auch Trockenperioden sind deutlich kürzer. Andererseits treten moderate und große Niederschlagswerte zu stark gehäuft auf. Letzteres führt dazu, dass große Niederschlagswerte zu sehr großen Überläufen führen, dieser Niederschlag jedoch an anderer Stelle fehlt, wodurch die Überlaufhäufigkeit reduziert wird.

Versuche mit den bestehenden Parametern eine Verbesserung zu erreichen, z. B. durch eine andere Gewichtung der Parameter, führten zu keiner Reduzierung der Abweichungen. Der Grund dafür ist, dass in die Optimierung kein ereignisbasierter Parameter eingeht. Für die Schmutzfrachtberechnung sind jedoch weniger einzelne Werte entscheidend, sondern vielmehr die Anordnung einzelner Werte innerhalb der Ereignisse bzw. die Anordnung der Ereignisse innerhalb der Zeitreihe. Diese zeitliche Struktur hängt von der Art des Niederschlags ab. Stratiforme Ereignisse zeichnen sich durch langanhaltenden, gemäßigten Niederschlag aus, wohingegen konvektive Ereignisse durch sehr starken, jedoch kurzzeitigen Regen charakterisiert werden. Mit dem bisherigen Ansatz ist es nicht möglich, diese beiden unterschiedlichen Prozesse gleichzeitig abzubilden. Alle Parameter φ_i , die bisher in die Optimierung einfließen, beziehen sich entweder auf Einzelwerte oder auf die vollständigen Zeitreihe eines Jahres. Deswegen ist eine Verbesserung der Optimierung der zeitlichen Struktur mit dem ursprünglichen NiedSim in Hinblick auf die Schmutzfrachtsimulation nicht möglich.

Neuerungen

Um die Generierung der Zeitreihen für die Schmutzfrachtsimulation zu verbessern, wurden zwei Änderungen durchgeführt. Zum einen werden als neue Optimierungsparameter Nass- und Trockenperioden miteinbezogen. Zum anderen werden größere Niederschläge vor der Optimierung in einem Poisson-Prozess positioniert.

Die Nass- und Trockenperioden sind als ereignispezifischer Parameter notwendig, da der bisherige Algorithmus sowohl zu kurze Trockenperioden als auch zu kurze Niederschlagsereignisse produziert. Als Nassperiode bzw. Niederschlagsereignis werden alle aufeinanderfolgenden Stundenwerte definiert, die nicht von mindestens einer Stunde ohne Niederschlag unterbrochen werden. Umgekehrt wird eine Trockenperiode als Abfolge von Stundenwerten ohne Niederschlag definiert.

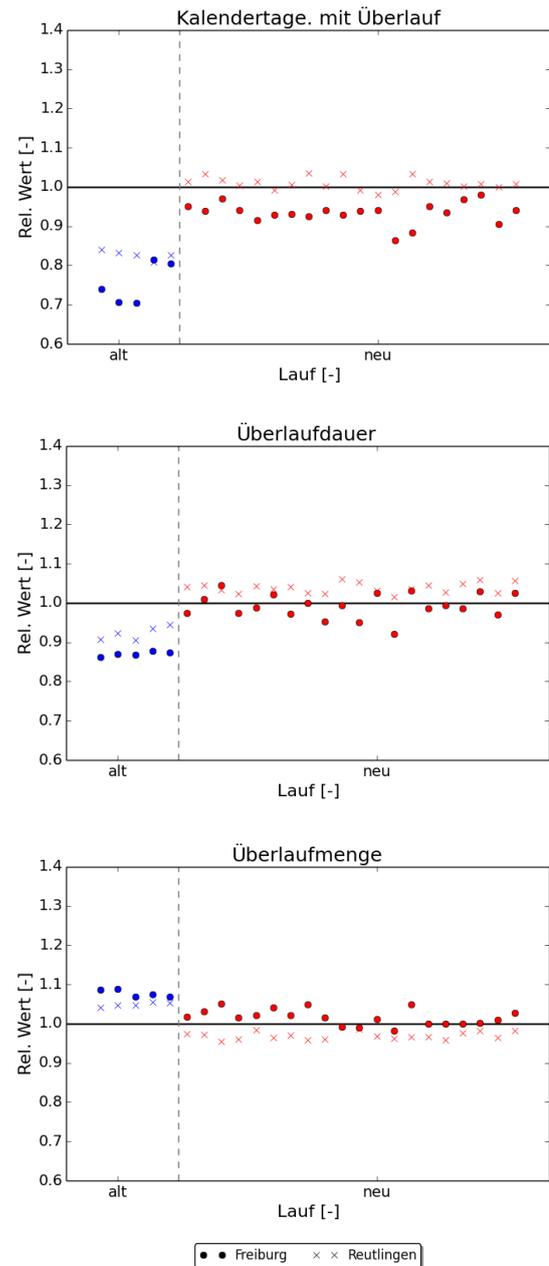


Abbildung 1: Relative Abweichungen der Entlastungskenngrößen zwischen Simulation mit generierten (alte und neue Methode) und gemessenen Zeitreihe für die Station Freiburg und Reutlingen

Aus den gemessenen Zeitreihen werden die über die Stationen gemittelten absoluten Häufigkeiten von 1 h bis 168 h (1 Woche) für die Nass-/Trockenperioden berechnet. Die gemittelten relativen Häufigkeitsverteilungen werden als Zielwert für die Optimierung angegeben. Durch die Verwendung der Nass-/Trockenperioden ist es nun möglich Zeitreihen mit längeren Ereignissen zu generieren.

Die zweite Neuerung begegnet dem Problem der Anhäufung großer Niederschlagswerte. Hierbei werden n größte Stundenniederschlagswerte in einem Poisson-Prozess mit exponentialverteilten Wartezeiten innerhalb der Zeitreihe platziert. Diese werden im weiteren Verlauf als „Poisson-Werte“ bezeichnet. Der Parameter λ der Exponentialverteilung sollte dabei zwei Eigenschaften abbilden. Erstens, einen jahreszeitlichen Verlauf, da im Sommer häufiger große Niederschläge auftreten als im Winter. Zweitens, sollte die Häufigkeit des Auftretens der großen Werte eines Monats abhängig vom monatlichen Niederschlagsvolumen sein. Dies verhindert, dass in einem Monat mit geringer Niederschlagssumme, durch den Poisson-Prozess viele Niederschlagswerte vordefiniert gesetzt werden.

Zuerst wird die Verteilung H_{ijm} der n größten Niederschlagswerte pro Station i , Jahr j und Monat m berechnet. Hierfür wurden 115 DWD-Stationen in Baden-Württemberg in stündlicher Aggregation ausgewertet. Die monatliche Verteilung H_{ijm} der absoluten Häufigkeiten wird über alle Jahre und alle Stationen gemittelt

(H_m). Die Abhängigkeit zwischen absoluter Häufigkeit pro Monat und der monatlichen Niederschlagssumme N_m wird vereinfacht als linear angenommen, mit der Ausgleichsgeraden durch $p_1 = (0,0)$ und $p_2 = (H_m, N_m)$. Die Steigung der Ausgleichsgeraden zeigt einen Jahresgang, an den eine kontinuierliche, allgemeine Sinusfunktion angepasst werden kann.

In der Generierung wird für einen beliebigen Zeitpunkt über die Sinusfunktion die Abhängigkeit (Steigung) der Poisson-Werte von der Monatssumme berechnet. Mit Hilfe der berechneten Steigung und der Monatssumme kann die Anzahl an Poisson-Werten pro Monat bestimmt und daraus der Parameter λ der Exponentialverteilung ermittelt werden. Um die Wartezeit zwischen zwei großen Niederschlagswerten zu begrenzen, wird eine beschränkte Exponentialverteilung mit $x_{\max} = 45$ Tage angewendet.

Die über den Poisson-Prozess gesetzten Niederschlagswerte werden in der anschließenden stündlichen Optimierung nicht mehr getauscht. Dadurch wird verhindert, dass zu viele große Niederschläge ein Niederschlagsereignis bilden. Das beschriebene Verfahren musste noch weiter modifiziert werden, da größere Niederschlagswerte nicht vollständig unabhängig voneinander auftreten, sondern häufiger innerhalb des gleichen Ereignisses vorkommen können als bei einem Poisson-Prozess angenommen. Um dies zu ermöglichen, werden nicht n größte Werte gesetzt, sondern aus einer vergrößerten Menge n^* zufällig n Werte gezogen. Es gilt: $n^* = n \cdot (1 + p)$, wobei p die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Werte nicht ereignisunabhängig sind, also nicht im selben Niederschlagsereignis vorkommen. Dadurch wird erreicht, dass einerseits viele große Niederschlagswerte bereits vordefiniert in der Zeitreihe gesetzt sind, andererseits jedoch die Möglichkeit besteht, Niederschlagsereignisse mit mehreren großen Werten zu erzeugen.

Ergebnisse

Die Auswirkung der beiden Neuerungen in der Schmutzfrachtsimulation wurde mit der gleichen Methode validiert wie die stündliche Optimierung. Das heißt, die beiden gemessenen Zeitreihen wurden auf stündlicher Basis zufällig gemischt und anschließend die zeitliche Struktur mit Hilfe von NiedSim mit der beschriebenen Neuerung wiederhergestellt. Die Anzahl n an Poisson-Werten wurde zwischen $n = [25, 50, 60, 75]$ variiert und jeweils 20 verschiedene Niederschlagsrealisationen erzeugt (Tabelle 2). Bereits durch das vordefinierte

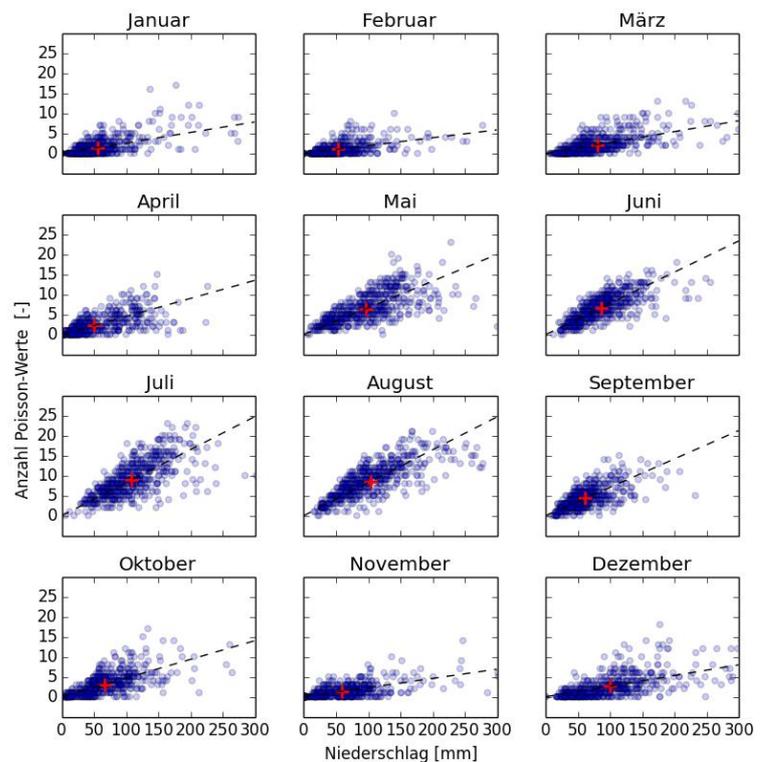


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Anzahl Poisson Werte und Niederschlagsvolumen über alle Stationen und alle Jahre aufgeteilt nach Monaten.

Platzieren von $n = 25$ Poisson-Werten wird eine Verbesserung des Parameters Nued erreicht. Wird die Anzahl auf $n = 50 - 60$ erhöht, verbessern sich zusätzlich die Parameter VQue und Tue. Bei einer noch größeren Anzahl treten die moderaten und großen Niederschläge zu vereinzelt innerhalb der Zeitreihe auf, wodurch alle Überlaufparameter unterschätzt werden. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der neuen Methode für $n = 50$. Es wird ersichtlich, dass mit der neuen Methode nicht nur die mittleren Abweichungen, sondern auch die maximalen Abweichungen in den Schmutzfrachtparametern deutlich reduziert werden können.

Tabelle 2: Mittlere relative Abweichungen der Schmutzfrachtparameter der simulierten von der gemessenen Zeitreihe in Reutlingen und Freiburg. Die zweite Zeile zeigt die Ergebnisse der alten Optimierung, Zeile 3-6 die Ergebnisse der neuen Methode mit n Poisson verteilten Niederschlagswerten.

	Reutlingen: Nued [%]	Tue [%]	VQue [%]	Freiburg: Nued [%]	Tue [%]	VQue [%]
Alt	-17,33	-7,75	4,84	-24,63	-12,98	7,78
$n = 25$	0,96	6,80	4,95	-9,82	-0,17	8,26
$n = 50$	0,90	3,85	-2,98	-6,61	-0,75	1,65
$n = 60$	-1,06	1,42	-5,71	-6,76	-1,20	0,71
$n = 75$	-4,24	-1,98	-9,29	-8,75	-3,68	-3,37

Schlussfolgerungen

Die statistische Auswertung von Niederschlagsdaten konzentriert sich meist auf intensivere Niederschläge (siehe u.a. Mark et al., 2008 und Staufer et al., 2010). NiedSim wurde entwickelt um diese Niederschläge realistisch abzubilden. Das Entlastungserhalten wird jedoch nicht nur durch hohe Intensitäten bestimmt. Die Anwendung von NiedSim generierten Zeitreihen in der Schmutzfrachtsimulation zeigt, dass die für die Entlastungscharakteristik relevanten Eigenschaften unzulänglich wiedergegeben werden. Durch den Einbau von Nass- und Trockenperioden sowie durch das vordefinierte Setzen größerer Stundenniederschläge in einem Poisson-Prozess können entscheidende Verbesserungen in der Optimierung der stündlichen Zeitreihe in NiedSim erzielt werden.

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. Wir möchten uns außerdem beim Deutschen Wetterdienst DWD und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten bedanken.

Literatur

- Bárdossy, A., 1998: Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research* 34(7): 1737-1744
- Bendel, D.; Beck, F.; Dittmer, U., 2013: Modeling Climate Change Impacts on Combined Sewer Overflow using Synthetic Precipitation Time Series. In: *Water Science and Technology* 68 (1), S. 160. DOI: 10.2166/wst.2013.236.
- itwh, 2009: KOSIM 7.3 - Modellbeschreibung, Hannover, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie
- Mark, O., Svensson, G., König, A., Linde, J.J., 2008: Analysis and Adaption of Climate Change Impacts on Urban Drainage Systems; 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK
- Staufer, P., Leckebusch, G., Pinnekamp, J., 2010: Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2010 (57), Heft 12
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., & Isham, V., 1987: Some models for rainfall based on stochastic point processes. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 410(1839), 269-288.