

Thomas Müller, Tobias Mosthaf, András Bárdossy

Bewertung der Eignung synthetischer NiedSim3 Niederschlagszeitreihen für Kanalnetzsimulationen unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Niederschlags

Evaluation of the applicability of synthetic NiedSim3 precipitation time series in sewer simulations considering the natural variability of rainfall

Für die Planung und Dimensionierung von Entwässerungssystemen in urbanen Gebieten werden langjährige Niederschlagszeitreihen in hoher zeitlicher Auflösung benötigt. In Deutschland sind entsprechende gemessene Zeitreihen nicht flächendeckend, sondern nur an wenigen Orten verfügbar. Mit dem Niederschlagssimulator NiedSim lassen sich langjährige Zeitreihen in fünfminütiger Auflösung stochastisch generieren. Hierzu werden zunächst statistische Niederschlagsparameter auf ein 1 km x 1 km Raster räumlich interpoliert. Anschließend kann mit den interpolierten Parametern für einen beliebigen Rasterpunkt eine Niederschlagszeitreihe simuliert werden. Im vorliegenden Artikel wird die neueste Version NiedSim3 vorgestellt, die in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz durch die jeweiligen Behörden vertrieben und in der Ingenieurspraxis eingesetzt wird. Die synthetischen Zeitreihen werden sowohl durch einen Vergleich mit Statistiken gemessener Zeitreihen als auch mit Hilfe einer Schmutzfrachtsimulation eines fiktiven Kanalnetzes validiert. Die Ergebnisse der synthetischen Reihen in der Schmutzfrachtsimulation werden den Ergebnissen von gemessenen Zeitreihen gegenübergestellt. Hierbei wird die Stichprobenunsicherheit der gemessenen Zeitreihen über ein Bootstrap-Verfahren berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die synthetischen Niederschlagszeitreihen in der Validierung vergleichbare Ergebnisse liefern wie gemessene Zeitreihen, wenn die räumlich interpolierten Parameter mit den örtlichen Statistiken übereinstimmen. Bei Anwendung einer Kreuzvalidierung können jedoch in orographisch sehr heterogenen Gebieten systematische Abweichungen in den Statistiken und bei der Schmutzfrachtsimulation auftreten.

Schlagwörter: Niederschlagssimulation, Urbanhydrologie, Schmutzfrachtsimulation, synthetische Niederschlagszeitreihen

Long-term precipitation time series in a high temporal resolution are required for the design of urban drainage systems. However, such measured time series are only available at a few places in Germany. The stochastic rainfall simulator NiedSim can generate long time precipitation time series in a temporal resolution of five minutes to compensate for the lack of high resolution time series. At first, statistical parameters are spatially interpolated on a 1 km x 1 km grid. Then, a precipitation time series can be generated for any desired grid point with the interpolated parameters. This article presents the latest version NiedSim3 which is used in engineering practice in the federal states of Baden-Württemberg, Bavaria, Hesse and Rhineland-Palatinate and is distributed by the public authorities. The synthetic time series are validated with statistics of observed time series as well as with combined sewer simulations of an artificial sewer system. The results of the synthetic time series of the combined sewer simulation is compared with the results of measured time series. The sampling uncertainty of the measured time series is considered using a bootstrap approach. The validation shows that the synthetic time series lead to results that are comparable to those of the observed time series if the spatially interpolated statistical parameters are similar to those of the observations. However, applying a cross validation can lead to systematic deviations in the statistics and in combined sewer simulations of regions with a very heterogeneous orography.

Keywords: Precipitation simulation, urban hydrology, combined sewer simulation, synthetic precipitation time series

1. Einleitung

Für die Bemessung von Mischwasserkanälen sowie für die hydraulische Bemessung und den Nachweis von Entwässerungssystemen in der Urbanhydrologie werden hydraulische Simulationsmodelle eingesetzt. In beiden Anwendungen sind deren wichtigste Eingangsgröße langjährige, zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagszeitreihen (ATV-DVWK-M165, 2004). Die beiden Anwendungsgebiete stellen dabei unterschiedliche Anforderungen an die zeitliche Erfassung des Niederschlags, die sich grundsätzlich unterscheiden.

Für die Dimensionierung von Entwässerungsnetzen wird als Zielgröße die Überstauhäufigkeit für einen Bemessungsregen zwischen ein und zehn Jahren definiert (DWA-A118, 2006). Mit Hilfe des Bemessungsregens sollen die maximal auftretenden

Abflüsse im Kanalnetz innerhalb einer bestimmten Zeitspanne beschrieben werden. Somit sind für diese Anwendung nur Starkregenereignisse relevant. Diese können über Niederschlagsintensität, -dauer und Wiederkehrzeit beschrieben werden (Intensity-Duration-Frequency-curves, IDF-curves). Die Berechnung kann beispielsweise mit Hilfe von partiellen Serien erfolgen (DWA-A531, 2012). Eine entsprechende Auswertung für ganz Deutschland, insbesondere für Regionen, in denen keine langjährigen Niederschlagsmesswerte vorliegen, wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in einer „Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung“ (KOSTRA) durchgeführt und wird im KOSTRA-DWD-2000 (MALITZ, 2005) bzw. KOSTRA-DWD-2010R (JUNGHÄNEL et al., 2017) bereitgestellt.

Für die stofflich basierte Bemessung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen steht die Reduktion von Stoffeinträ-

gen in die Gewässer im Vordergrund, um einen möglichst guten ökologischen Gewässerzustand zu erzielen (DWA-A100, 2006). Hierzu können mit Hilfe von Schmutzfrachtsimulationen die Entlastungsereignisse einzelner Bauwerke quantitativ (Entlastungsvolumen, -dauer und -häufigkeit) oder qualitativ (CSB-Fracht) berechnet und bewertet werden (ATV-A128, 1992; DWA-A102-Entwurf, 2016). Mischwasserentlastungen können mehrmals monatlich auftreten (BRUNNER et al., 1997), sodass nicht nur seltene Starkregenereignisse relevant sind. Insbesondere bei einer Vorfüllung der Kanalnetze und Überlaufbecken können selbst kleinere Niederschlagsereignisse zu einer Entlastung führen. Zudem hängt die Schmutzfrachtkonzentration von Akkumulations- und Ablagerungsprozessen im Kanalnetz ab (SCHMITT et al., 1986) und somit vom wechselseitigem Auftreten von Nass- und Trockenperioden. Deshalb sollten Schmutzfrachtsimulationen, insbesondere bei komplexen Netzen, über kontinuierliche Langzeitberechnungen erfolgen (DWA-A102-Entwurf, 2016).

Niederschlag ist sowohl zeitlich als auch räumlich sehr variabel (SINGH, 1997), deshalb werden für Kanalnetzsimulationen langjährige, örtliche Zeitreihen in hoher zeitlicher Auflösung benötigt (SCHILLING, 1991; BERNE et al., 2004). In Deutschland liegen entsprechende, gemessene Niederschlagszeitreihen nicht flächendeckend vor. Daher wurde am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart ein stochastisches Niederschlagsmodell entwickelt, das langjährige, kontinuierliche Niederschlagszeitreihen für unbeobachtete Orte generieren kann (BÁRDOSSY, 1998). Die daraus entstandene Software „Niederschlags-Simulator“ (NiedSim) wird seit dem Jahr 2000 in Baden-Württemberg, seit 2003 in Hessen und Rheinland-Pfalz und seit 2009 in Bayern von den jeweiligen Umweltbehörden vertrieben. Anwender, insbesondere Ingenieurbüros, können über die Behörden für einen beliebigen Ort des jeweiligen Bundeslands hochaufgelöste und langjährige synthetische Niederschlagszeitreihen bestellen und für Langzeitsimulationen von Bewässerungssystemen in der Praxis einsetzen. Ein Vorteil der synthetischen Niederschlagsgenerierung ist nicht nur die Möglichkeit an unbeobachteten Orten kontinuierliche Zeitreihen beliebiger Länge erstellen zu können, sondern auch, dass diese im Gegensatz zu Messdaten homogen und lückenlos sind.

In den Jahren 2013 bis 2016 wurde das stochastische Niederschlagsmodell in zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekten (SYNOPSE und SAMUWA) weiterentwickelt (VAN DER HEIJDEN et al., 2017). Hierbei wurde der Fokus auf Überstauberechnungen von Kanalnetzen sowie Schmutzfrachtsimulationen in Mischsystemen gelegt. Diese Weiterentwicklungen wurden im August 2017 durch eine Aktualisierung der NiedSim-Software (Version 3.0, im Folgenden NiedSim3 genannt) den vier Landesbehörden und somit der Ingenieurspraxis zur Verfügung gestellt.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Simulation von stochastischen Niederschlagszeitreihen ist deren Validierung. In der Regel werden direkte Validierungsverfahren angewandt, bei denen niederschlagsspezifische Eigenschaften in Form von Statistiken der synthetischen Zeitreihe mit gemessenen Reihen verglichen werden. Allerdings ist die zeitliche Struktur von Niederschlag sehr komplex, sodass es kein einheitliches Verfahren für die Bewertung synthetischer Reihen gibt. In der Literatur werden unterschiedliche Parameter zur Validierung herangezogen, beispielsweise Autokorrelationen (PUI et al., 2012); Verteilungsfunktionen

(PASCHALIS et al., 2014); Extremwertstatistiken (KOUTSOYIANNIS et al., 2011); die Wahrscheinlichkeit, dass kein Regen fällt p_0 (MOLNAR et al., 2005) oder ereignisspezifische Statistiken: Ereignisdauer, -häufigkeit, -volumen (VANDENBERGHE et al., 2011). Bei der direkten Validierung wird die Annahme getroffen, dass alle wesentlichen Eigenschaften des Niederschlags über Statistiken abgebildet werden können. Aufgrund der Komplexität der zeitlichen Struktur der Niederschlagswerte ist es jedoch schwierig abzuschätzen, welche Auswirkungen Abweichungen einzelner Statistiken auf nachfolgende Kanalnetzsimulationen haben.

Aus diesem Grund sollte zusätzlich zur Validierung der synthetischen Zeitreihen über Statistiken eine indirekte Validierung über eine Kanalnetzsimulation erfolgen. Entsprechende indirekte Validierungen wurden bisher nur von vergleichsweise wenigen Autoren durchgeführt (u. a. GAUME et al., 2007; ANDRÉS-DOMÉNECH et al., 2010; MÜLLER et al., 2016). Um möglichst allgemeingültige Aussagen der Anwendbarkeit der synthetischen Reihen zu treffen, muss ein repräsentatives Kanalnetz verwendet werden. Eine Schwierigkeit bei der Auswahl eines solchen Netzes besteht darin, dass das Abflussverhalten maßgeblich von den örtlichen Randbedingungen und somit von der individuellen Kanalnetzstruktur abhängt. Eine indirekte Validierung mit realen Kanalnetzen stellt somit immer nur ein Fallbeispiel dar, dass nur bedingt auf alle Netze übertragen werden kann. Deshalb kann es zielführender sein, auf fiktive Kanalnetze zurückzugreifen (z. B. DRECHSEL, 1991). Absolute Werte fiktiver Kanalnetze sind jedoch wenig aussagekräftig. Deshalb erfolgt die Validierung der synthetischen Zeitreihen über einen relativen Vergleich der Kanalnetzsimulationsergebnisse, die sowohl mit gemessenen als auch mit synthetischen Zeitreihen gerechnet wurden. Hierzu werden zunächst Abweichungen definiert, die noch akzeptiert werden können.

Eine Möglichkeit, diese akzeptablen Abweichungen zu definieren, besteht darin, diese in Bezug zur natürlichen Variabilität von gemessenen Zeitreihen zu stellen (MÜLLER, 2017). Da Niederschlag eine hohe zeitliche Variabilität aufweist (VAES et al., 2001), können selbst langjährige Messreihen das örtliche Niederschlagsverhalten nur näherungsweise wiedergeben. Diese Stichprobenunsicherheit kann, als Konfidenzintervall ausgedrückt, dazu verwendet werden, die relativen Abweichungen von synthetischen Zeitreihen zu gemessenen Reihen zu bewerten.

Im vorliegenden Artikel wird zunächst die Generierung synthetischer Zeitreihen mit NiedSim3 methodisch beschrieben (Kap. 2) und die in diesem Artikel genutzten Daten vorgestellt (Kap. 3). Anschließend werden diese Zeitreihen sowohl direkt über verschiedene Statistiken validiert als auch indirekt über eine Kanalnetzsimulation unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Niederschlags (Kap. 4). Danach werden die auftretenden Abweichungen zwischen synthetischen und gemessenen Zeitreihen genauer analysiert und bewertet (Kap. 5), bevor der Artikel mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen wird (Kap. 6).

2. Methodik zur Simulation synthetischer Niederschlagszeitreihen mit NiedSim3

Kontinuierliche Niederschlagszeitreihen weisen unterschiedliche, typische Eigenschaften auf, wie beispielsweise die Niederschlags-

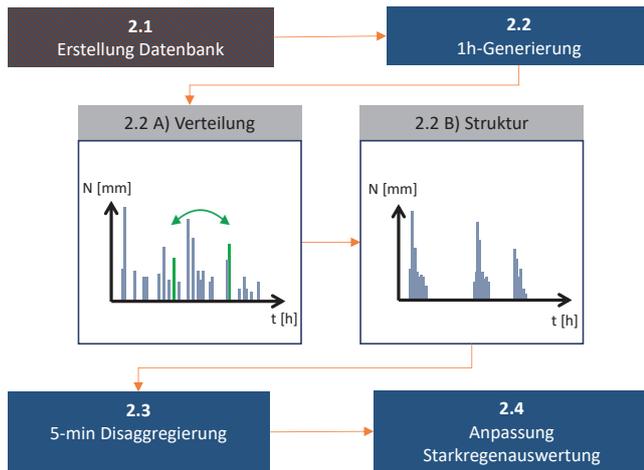


Abbildung 1
Schematische Übersicht über den Programmablauf von NiedSim3. Die Erstellung der Datenbank erfolgt unabhängig von der Generierung. *Schematic overview of the program flow of NieSim3. The setup of the database is independent of the generation parts.*

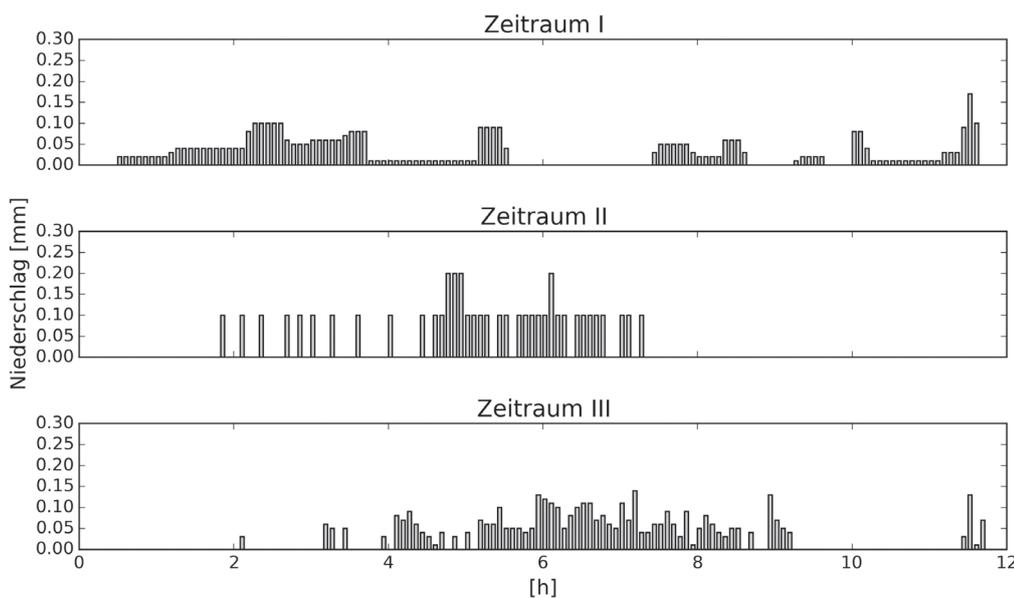


Abbildung 2
Charakteristische Zeitreihen in fünfminütiger Auflösung für digitalisierte Niederschlagsschreiber (Zeitraum I), Kippwaagen (Zeitraum II) und digitale Niederschlagswaagen (Zeitraum III). Die unterschiedliche Struktur beeinflusst die Statistiken hochaufgelöster Zeitreihen. *Characteristic time series in a five minute temporal resolution of digitized paper records (period I), tipping buckets (period II) and digital weighing gauges (period III). The different structure influences the statistics of high-resolution time series.*

menge, Nass- und Trockenzeiten, der zeitliche Zusammenhang einzelner Niederschlagswerte oder die Dauer und Häufigkeit von Starkregeneignissen. Diese Eigenschaften unterscheiden sich von Standort zu Standort deutlich voneinander und charakterisieren in ihrer Gesamtheit den ortsspezifischen Niederschlag. Die Niederschlagscharakteristiken wiederum können über statistische Parameter beschrieben werden. Somit kann die Annahme getroffen werden, dass eine beliebige kontinuierliche Zeitreihe gemessenem Niederschlag entspricht, wenn ihre wesentlichen

statistischen Eigenschaften den Statistiken einer beobachteten Niederschlagszeitreihe entsprechen (BÁRDOSSY, 1998).

Auf dieser Annahme basierend erzeugt NiedSim3 synthetische Niederschlagszeitreihen in fünfminütiger Auflösung, die die hochaufgelösten, statistischen Eigenschaften des langjährigen, ortsspezifischen Niederschlags reflektieren. Ein tagtäglicher Vergleich der synthetischen Zeitreihe mit einer entsprechenden beobachteten Reihe desselben Ortes weist jedoch keinerlei Zusammenhang auf.

NiedSim3 kann in verschiedene Teilbereiche untergliedert werden (Abb. 1). Zunächst werden die ortsspezifischen Statistiken aus gemessenen Punktzeitreihen vorab berechnet, auf ein Gitter mit einer 1 km x 1 km räumlichen Auflösung übertragen und in einer Datenbank hinterlegt (Kap. 2.1). Anschließend wird für eine beliebige Gitterzelle die eigentliche Zeitreihe über ein vierteiliges Simulationsprogramm generiert (Kap. 2.2 bis 2.4).

2.1 Erstellung Datenbank

NiedSim3 basiert auf Punktniederschlagsdaten von Messstationen des DWD sowie auf landeseigenen Stationen der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz. Hierbei werden Daten in fünfminütiger Auflösung (1.034 Stationen), in stündlicher Auflösung (1.551 Stationen) und Tagesstationsdaten (5.468 Stationen) im Zeitraum von 1961 bis 2012¹ verwendet.

Bevor die statistischen Parameter berechnet und räumlich interpoliert werden können, müssen die Daten auf Plausibilität und Homogenität geprüft werden. Hierbei zeigt sich, dass unterschiedliche Arten von Messgeräten (digitalisierte Bandschreiber, Kipp-Waagen, digitale Waagen) für das jeweilige Messverfahren typische und unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Digitalisierte Bandschreiber zeichnen sich durch eine relativ homogene Niederschlagsstruktur mit einer Auflösung bis zu 0,01 mm aus. Dahingegen liefern Kippwaagen viele kurze, separierte

Impulse in einer Auflösung von 0,1 mm. Die digitalen Waagen geben den Verlauf der Struktur am realistischsten wieder. In einer fünfminütigen Auflösung sind diese Unterschiede nicht nur in der Zeitreihe zu erkennen (Abb. 2), sondern beeinflussen diverse hochaufgelöste Statistiken (u. a. Autokorrelation, Skalierungseigenschaften, Nassintervalle, Regenwahrscheinlichkeit). Demgegenüber haben die unterschiedlichen Messgeräte kaum

¹ für Rheinland-Pfalz von 1958 bis 2013

Tabelle 1

Statistische Parameter, die bei den vier Teilschritten in NiedSim3 zur Anwendung kommen und von Kapitel 2.2 bis 2.4 ausführlicher beschrieben werden.

Statistical parameters used in the four parts of NiedSim3 and discussed from chapter 2.2 to 2.4 in more detail.

Kapitel	Statistische Parameter
2.2A	stündliche Verteilungsfunktion (Sommer und Winter getrennt), Jahressummen, Poisson-Parameter zur fixen Positionierung großer Niederschlagswerte
2.2B	Autokorrelation und jahreszeitlich gewichtete Autokorrelation (Zeitversatz (<i>lag</i>) = 1; Aggregation = 60, 120, 180, 360, 720, 1440 min), Monatssummen, Überschreitungswahrscheinlichkeiten (0, 1, 5 mm/Tag), Verteilung der stündlichen Länge der Niederschlagsintervalle (Trennzeit: eine nasse Stunde (0 mm/h))
2.3	gewichtete Autokorrelation (Zeitversatz (<i>lag</i>) = 1, 2; Aggregation = 5, 10, 15, 30, 45, 60 min) und Skalierungsparameter (1. bis 3. Moment der Aggregationen = 5, 10, 20, 30, 60 min, jahreszeitlich getrennt berechnet)
2.4	Starkregenauswertung für die Dauerstufen 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440 min (z. B.: KOSTRA)

einen direkten Einfluss bei der Anwendung einer gemessenen Zeitreihe in einer Kanalnetzsimulation. Vielmehr werden durch die unterschiedlichen Statistiken gemessener Zeitreihen die Zielwerte in der Optimierung in NiedSim3 verändert und somit die synthetischen Niederschlagszeitreihen beeinflusst (MÜLLER, 2017). Diese unterschiedlichen synthetischen Zeitreihen können nun zu anderen Abflusscharakteristika führen. Aus diesem Grund wird für die nachfolgende Analyse nur ein Zeitraum verwendet, damit der Datensatz hinsichtlich der hochaufgelösten Statistiken homogen ist. Da der Zeitraum III den natürlichen zeitlichen Verlauf am repräsentativsten wiedergibt, wird nur dieser Datensatz nachfolgend verwendet. Dadurch reduziert sich die beobachtete Zeitreihenlänge auf weniger als 20 Jahre, weil der DWD erst seit Mitte der 90er Jahre sukzessive Niederschlagswaagen einsetzt.

Um die Datenbank für NiedSim3 zu erstellen, werden zunächst die für die vier Teilschritte notwendigen Statistiken berechnet, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Diese punktweise berechneten Statistiken werden anschließend auf ein 1 km x 1 km Raster interpoliert. Für Statistiken ohne deutliche Korrelation zur geografischen Höhe (Autokorrelationen und Skalierungsparameter) wird Ordinary-Kriging (CRESSIE, 1993; KITANIDIS, 1997) verwendet, andernfalls (Jahressummen und Monatssummen) External-Drift-Kriging (SCHAFMEISTER, 1999) mit einer richtungsgeglätteten Höhe als Sekundärinformation (BÁRDOSSY et al., 2013). Für die stündliche Verteilungsfunktion zeigte ein Kriging-Ansatz mit positiven Interpolationsgewichten gute Ergebnisse (MOSTHAF et al., 2017). Für eine detailliertere Darstellung der Berechnung der einzelnen Statistiken und ihrer jeweiligen Interpolationsmethoden wird auf den Grundlagenbericht zu NiedSim3 (MÜLLER et al., 2017a) verwiesen.

Im Voraus erfolgt die Erstellung der Datenbank vollständig für das jeweilige Bundesland. Anschließend kann auf diese für die eigentliche Zeitreihensimulation zurückgegriffen werden, das heißt alle notwendigen Parameter des gewählten Rasterpunkts, an dem die Zeitreihe erstellt werden soll, können vor der Simulation aus der Datenbank ausgelesen werden.

2.2 Generierung stündlicher Zeitreihen

A) Erstellung einer Initialzeitreihe

Die Generierung der stündlichen Zeitreihen erfolgt jahresweise und in zwei Schritten. Zunächst wird eine Initialzeitreihe erzeugt.

Hierzu werden aus der stündlichen Verteilungsfunktion nach Sommer und Winter getrennt zufällig Niederschlagswerte gezogen und ungeordnet in die jeweilige Jahreszeit der Zeitreihe eingefügt. Dies erfolgt solange, bis die Jahresniederschlagssumme erreicht ist. Ein Teil (ca. 80 %) aller großen Niederschlagswerte (> 4 mm) wird dabei nicht zufällig gesetzt, sondern mit Hilfe eines Zeitreihenprozesses (Poisson-Prozesses) fest in der Reihe

platziert. Die Zwischenzeiten zwischen zwei gesetzten Werten sind dabei exponentialverteilt. Der notwendige Parameter λ wird dabei in Abhängigkeit der Jahreszeit sowie der jeweiligen Monatssumme gewählt. Hierdurch wird einerseits erreicht, dass im Sommer mehr große Niederschlagswerte als im Winter gesetzt werden, um die im Sommer verstärkter auftretenden konvektiven Niederschlagsereignisse abzubilden. Andererseits wird dadurch die Wahrscheinlichkeit eines häufigeren Auftretens großer Werte in sehr nassen Monaten erhöht. Diese Werte können in der anschließenden Optimierung nicht verändert werden. Dadurch wird verhindert, dass sich zu viele große Niederschlagswerte zu einem unrealistisch großen Niederschlagsereignis zusammenziehen. Für eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierung des Poisson-Prozesses wird auf zwei Arbeiten verwiesen (MÜLLER et al., 2017a; MÜLLER, 2017), wobei in letzterem dieses Verfahren entwickelt und getestet wurde.

B) Optimierung der stündlichen Reihe

In einem zweiten Schritt wird die zufällige stündliche Zeitreihe mit Hilfe eines *Simulated Annealing* Algorithmus optimiert (BÁRDOSSY, 1998). Die Idee hierbei ist, die zufällige Zeitreihe so zu verändern, dass sie sich hinsichtlich ihrer wesentlichen statistischen Eigenschaften nicht mehr von einer beobachteten, standortsspezifischen Zeitreihe unterscheidet. Die Zielfunktion wird dabei als Abweichung der statistischen Parameter der synthetischen Zeitreihe von den punktweise interpolierten Zielstatistiken definiert. In die Zielfunktion gehen die in Tabelle 1 beschriebenen Parameter mit ein. Während der Optimierung werden die Zielfunktion und somit die Abweichungen der Statistiken der synthetischen Zeitreihe von den lokalen statistischen Eigenschaften minimiert. Hierzu werden zwei stündliche Niederschlagswerte zufällig gewählt und getauscht, wobei selbstverständlich mindestens einer der Werte eine Niederschlagshöhe größer Null aufweisen muss. Anschließend wird die Zielfunktion der Zeitreihe vor und nach dem Tausch ausgewertet und verglichen. Werden die Abweichungen in der Zielfunktion reduziert, das heißt bei einer Verbesserung der statistischen Eigenschaften, wird der Tausch akzeptiert. Bei einer Verschlechterung wird dieser in der Regel rückgängig gemacht. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kann der Tausch jedoch trotzdem akzeptiert werden, um während der Optimierung ein lokales Minimum wieder verlassen zu können. Diese Wahrscheinlichkeit wird im Laufe der Optimierung immer weiter reduziert, um Verschlechterungen gegen Ende der Optimierung seltener zuzulassen. Hierdurch wird die Zielfunktion minimiert, wobei die Statistiken der synthetischen

Zeitreihe im Laufe der Optimierung gegen die ortsspezifischen Eigenschaften des gewählten Standorts konvergieren.

2.3 Disaggregation zu fünfminütigen Zeitreihen

Die optimierten stündlichen Zeitreihen werden mit einem *Simulated Annealing* Algorithmus zu fünfminütigen Zeitreihen disaggregiert, ähnlich dem der stündlichen Optimierung (MÜLLER, 2017). Hierzu wird zunächst der Niederschlag jeder Stunde auf zwölf fünfminütige Werte gleichverteilt. Da ein Tauschen von gleichverteilten Werten die Zeitreihe nicht verändern würde, wird in der anschließenden Optimierung die Zeitreihe durch Addition bzw. Subtraktion kleiner Niederschlagsanteile (0,01 bis 0,1 mm) modifiziert. Hierzu wird zunächst ein zufälliger fünfminütiger Niederschlagswert leicht geändert. Um die Massenbilanz zu erhalten, wird ein zweiter Wert innerhalb der gleichen Stunde mit derselben Änderung aber umgekehrtem Vorzeichen angepasst. Die Änderung der Zeitreihe wird mit den statistischen Parametern aus Tabelle 1 bewertet und die Zielfunktion über *Simulated Annealing* optimiert.

2.4 Anpassung an eine Starkregenauswertung

Die statistische Beschreibung von Starkregenereignissen ist aufgrund ihres seltenen Vorkommens und ihrer großen Variabilität relativ unsicher. Einzelne Extremereignisse können großen Einfluss auf die Starkregenauswertung und somit auch auf die Optimierung in NiedSim3 haben. Da NiedSim3 das langjährige Niederschlagsverhalten möglichst robust wiedergeben soll, fließen Parameter zur Beschreibung von Starkregen nicht direkt in die Optimierung mit ein. Stattdessen wird die synthetische Niederschlagszeitreihe im Nachgang an eine Starkregenauswertung angepasst. Diese Anpassung basiert auf der Annahme, dass die zeitliche Struktur der Starkregenereignisse bereits ausreichend gut nach der Optimierung abgebildet wird, die absoluten Höhen der einzelnen Werte jedoch unzureichend sind.

Bei der Anpassung werden alle fünfminütigen Werte aller Jahre, die zur partiellen Serie von acht betrachteten Dauerstufen (5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1.440 min) beitragen, sukzessive abgeändert, sodass sie einer gewählten Starkregenauswertung folgen. Dabei wird mit dem höchsten Niederschlagswert der niedrigsten Dauerstufe (5 min) begonnen und dieser dahingegen geändert, dass er dem theoretischen Wert der gewählten Starkregenverteilung entspricht. Die Änderung erfolgt durch ein Skalieren der Werte, wodurch die optimierte zeitliche Struktur der Zeitreihe beibehalten wird. Um die Massenbilanz zu erhalten, werden umliegende Werte entsprechend der geänderten Niederschlagshöhe ebenso durch Skalieren angepasst. Werte ohne Niederschlag werden nicht geändert, damit keine neuen Niederschlagsereignisse erzeugt werden. Nach der Anpassung des höchsten Wertes erfolgt die Anpassung des nächst niedrigeren Wertes bis alle Werte die zur partiellen Serie der Dauerstufe 5 min beitragen, angepasst wurden. Anschließend werden aufsteigend alle weiteren Dauerstufen (10 min bis 1.440 min) nach demselben Verfahren geändert. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf den Grundlagenbericht von NiedSim3 verwiesen (MÜLLER et al., 2017a).

Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die seltenen Starkregenereignisse von der langjährigen, kontinuierlichen zeitlichen Struktur der Zeitreihe entkoppelt sind. Dadurch können unterschiedliche Annahmen bezüglich der Starkregen getroffen und in NiedSim3 integriert werden. So wird in der operationellen Version von NiedSim3, welche von den Bundesländern verwen-

det wird, für die Bewertung der lokalen Starkregenintensitäten auf die in der Praxis weit verbreitete Auswertung KOSTRA-DWD-2010R zurückgegriffen (JUNGHÄNEL et al., 2017). Alternativ können empirische Starkregenauswertungen von gemessenen Zeitreihen verwendet werden. Das heißt, NiedSim3 kann auf aktuelle und zukünftige Entwicklungen bei Starkregenauswertungen (MALITZ et al., 2015; JUNGHÄNEL et al., 2017) angepasst werden, ohne dass die Optimierung der zeitlichen Struktur verändert wird.

3. Datengrundlage

Für die nachfolgende Validierung von NiedSim3 werden synthetische Niederschlagszeitreihen beispielhaft für die beiden Stationen Augsburg im Südwesten Bayerns und Fürstzell bei Passau im Südosten Bayerns für die Jahre 1997 bis 2012 generiert. Diese beiden Standorte wurden gewählt, da hier homogene, hochaufgelöste Messreihen über 16 Jahre vorhanden sind. Somit können Einflüsse unterschiedlicher Messgeräte auf die Simulation von Niederschlagszeitreihen (siehe Kap. 2.1) ausgeschlossen werden.

Abweichend vom obigen Generierungsschema wird für die Validierung in Kapitel 2.4 die partielle Serie nicht auf KOSTRA angepasst, sondern auf die partielle Serie, die entsprechend des DWA-Regelwerks (DWA-A531, 2012) empirisch aus den gemessenen Niederschlagsreihen der jeweiligen Station generiert wurde. Diese Änderung ist notwendig, um die Zeitreihen besser validieren zu können. In der Auswertung nach KOSTRA werden nicht die empirischen Daten der einzelnen Dauerstufen abgelegt, sondern die Parameter der angepassten theoretischen Verteilungsfunktionen. Im Vergleich zu den empirisch erstellten partiellen Serien der Messreihen können deswegen Abweichungen auftreten. Eine Anpassung der Zeitreihen in NiedSim3 auf KOSTRA würde somit bei einem Vergleich mit den gemessenen Zeitreihen Abweichungen aufzeigen, die möglicherweise auf KOSTRA und nicht auf NiedSim3 zurückzuführen wären.

Um den Unterschied und den Einfluss der Anpassung der Starkregenereignisse aufzuzeigen zu können, wird die Zeitreihe jeweils mit und ohne Starkregenanpassung analysiert. Die Reihe ohne Anpassung wird im Weiteren als *Orig.*, die mit Anpassung als *Angep.* bezeichnet.

Zusätzlich wird der Einfluss der räumlichen Interpolation untersucht. In der Version *Punkt* basiert die Generierung auf den Statistiken der gemessenen Stationsdaten. In der Variante *Interp.* erfolgt zunächst eine Interpolation aller Statistiken für die untersuchten Stationen Augsburg und Fürstzell basierend auf den umliegenden Messstationen. Bei dieser sogenannten Kreuzvalidierung werden die jeweiligen gemessenen Daten von Augsburg und Fürstzell nicht verwendet. Somit zeigt die Version *Punkt*, ob NiedSim3 eine realistische Niederschlagszeitreihe erzeugen kann, wenn die korrekten statistischen Parameter am Standort vorliegen. Die Version *Interp.* ermöglicht die Validierung der Interpolation der Statistiken und zeigt folglich die Qualität der synthetischen Zeitreihen für unbeobachtete Orte.

Insgesamt werden im Folgenden acht Simulationen (*Orig.* und *Angep.* jeweils in Kombination mit *Punkt* und *Interp.*) für Augsburg und Fürstzell miteinander verglichen. Da es sich bei NiedSim3 um einen stochastischen Simulator handelt, werden jeweils 150 Zeitreihen für die Jahre 1997 bis 2012 erzeugt, um die Bandbreite an möglichen Realisationen aufzeigen zu können.

4. Ergebnisse

Niederschlagsereignisse weisen eine äußerst komplexe zeitliche Struktur auf. Einerseits können insbesondere im Winter langanhaltende, stratiforme Ereignisse mit moderater Niederschlagsintensität auftreten. Andererseits führen konvektive Ereignisse, die eher im Sommer auftreten, zu zeitlich und räumlich sehr begrenzten Niederschlagsereignissen mit sehr hoher Intensität (SALVADORI et al., 2006). Hierbei können lange Trockenzeiten durch plötzlich auftretende Starkregenereignisse unterbrochen werden. Die Abfolge unterschiedlicher Niederschlagsereignisse mit verschiedenen Charakteristika führt dazu, dass sehr viele Statistiken betrachtet werden müssten, um Niederschlag umfassend zu validieren. Aus diesem Grund wird zunächst eine direkte Validierung mit den wichtigsten Statistiken durchgeführt. Anschließend erfolgt eine indirekte Validierung über ihre jeweiligen Entlastungsereignisse bei einer Schmutzfrachtsimulation eines fiktiven Kanalnetzes.

4.1 Direkte Validierung über statistische Parameter

Für die Bewertung der synthetischen Niederschlagszeitreihen werden drei statistische Parameter verwendet: die Jahressumme, die das zur Verfügung stehende Jahresniederschlagsvolumen

beschreibt; die empirische Verteilungsfunktion der stündlichen Niederschlagswerte, die der wesentliche Baustein für die Generierung in NiedSim ist; und die Autokorrelation verschiedener Aggregationen (5 Min. bis 1 Tag) mit Zeitversatz ($lag = 1$), die den zeitlichen Zusammenhang beschreibt. Zusätzlich wird die partielle Serie betrachtet, die die Starkregenereignisse widerspiegelt. Auf eine ereignisbezogene Auswertung der Niederschlagszeitreihe wird an dieser Stelle bewusst verzichtet, da diese abhängig von der Ereignisdefinition ist (DUNKERLEY, 2008).

Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen die Statistiken der gemessenen Zeitreihe von Augsburg und Fürstzell sowie von den acht unterschiedlichen Versionen der simulierten synthetischen Zeitreihen. Zunächst soll auf die Ergebnisse eingegangen werden, bei denen die jeweils gemessenen Stationswerte mit in die Interpolation eingingen (*Punkt*; obere Reihe in allen Abbildungen) und ohne die Starkregenereignisse nachträglich zu optimieren (*Orig.*). Es zeigt sich in allen Abbildungen, dass bei den betrachteten Parametern nur geringe Abweichungen zwischen simulierter und gemessener Reihe auftreten. Das heißt, Statistiken, die in die Optimierung miteingehen, können in den synthetischen Zeitreihen mit NiedSim3 gut abgebildet werden. Abbildung 6 zeigt den Unterschied zwischen simulierter (*Orig.*) und gemessener Zeitreihe

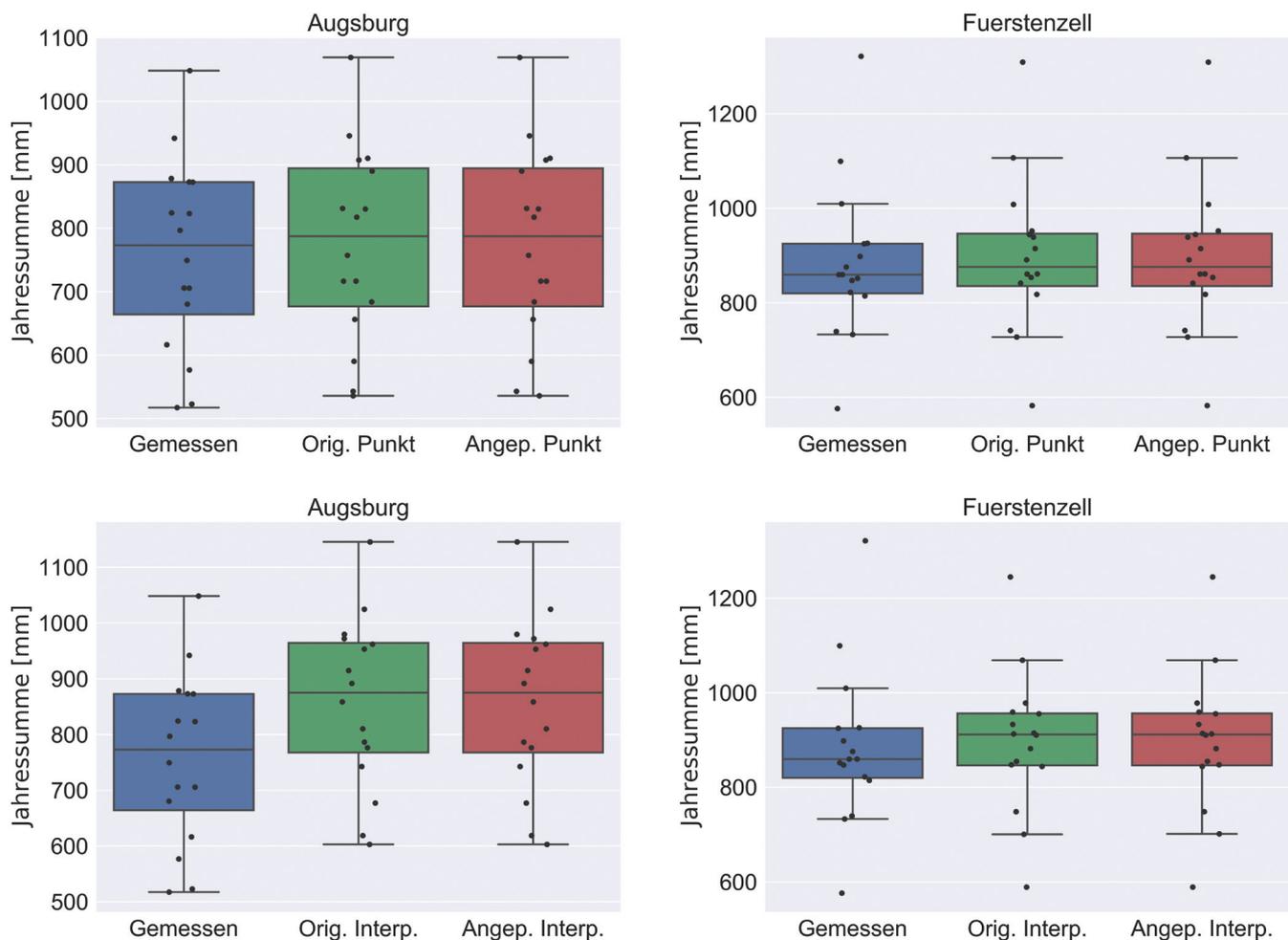


Abbildung 3
Boxplot-Darstellung der Jahresniederschlagssummen.
Boxplot of the annual precipitation sums.

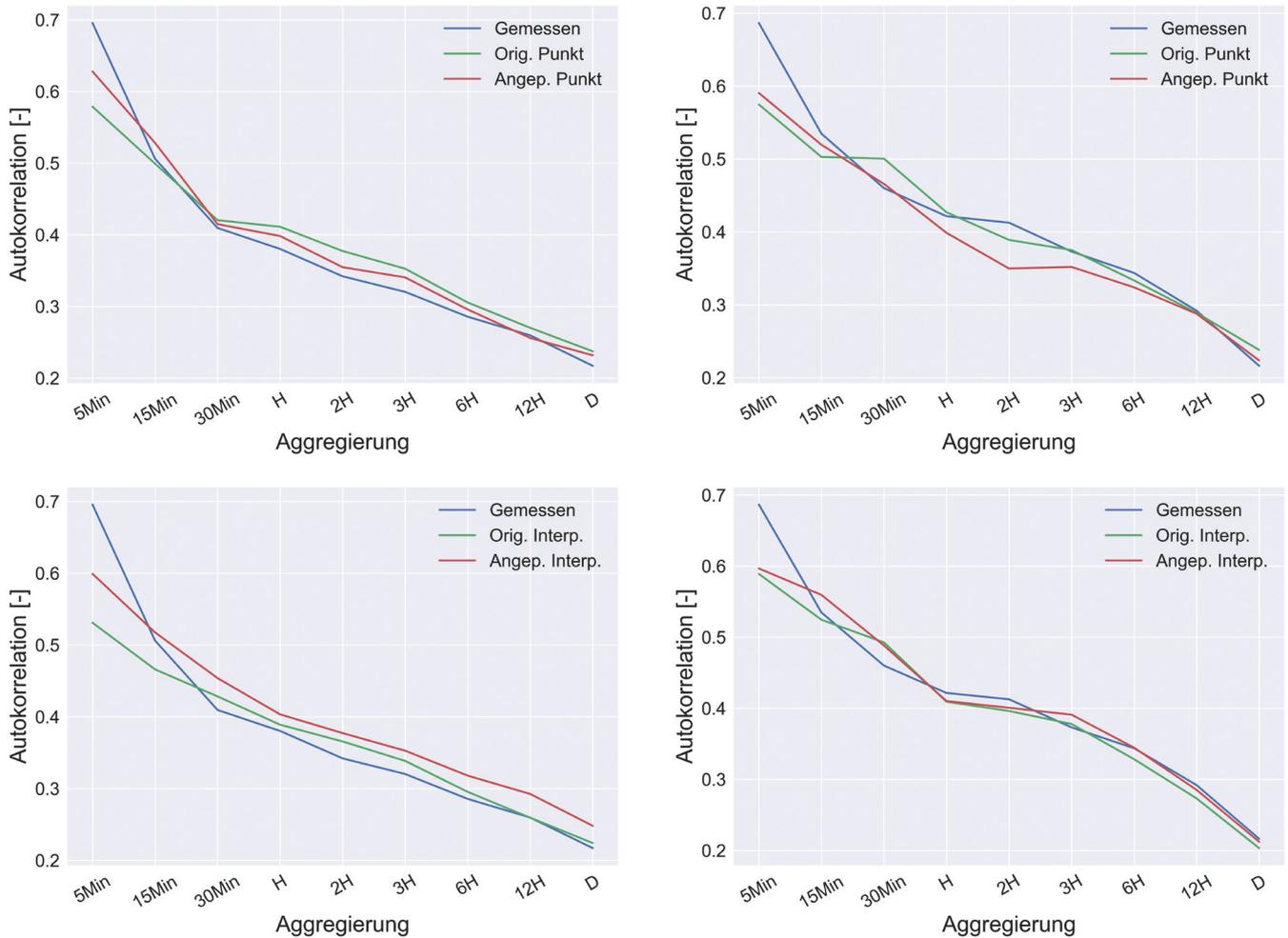


Abbildung 4
Autokorrelationsfunktion ($lag = 1$) über unterschiedliche Aggregationen.
Autocorrelation function ($lag = 1$) for different aggregations.

he hinsichtlich der partiellen Serien. Für die meisten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten sind die Abweichungen geringer als 10 %. Nur sehr große Wiederkehrzeiten (Extremwerte) werden systematisch unterschätzt. Dies ist jedoch nicht überraschend, da in der NiedSim3-Generierung Extremwerte nicht explizit betrachtet werden. Weiterhin sind nach der Disaggregation einige wenige Werte in fünfminütiger Auflösung deutlich zu groß. Dies führt bei Dauerstufen kleiner 30 Minuten zu einer systematischen Überschätzung (Abb. 6).

Wird nun die Variante mit einer nachträglichen Starkregen Anpassung (*Angep.*) betrachtet, zeigt Abbildung 6 zunächst, dass diese funktioniert und die Abweichungen in der partiellen Serie selbst für nicht optimierte Dauerstufen (10 Min. und 90 Min.) deutlich unter 10 % liegen. Hierbei werden die anderen Parameter nur geringfügig geändert (Vgl. *Angep.* und *Orig.* in Abb. 3 bis 5). Der geringe Einfluss der nachträglichen Anpassung hat mehrere Gründe. Zum einen ist die Abweichung in den partiellen Serien bereits relativ gering und somit sind die notwendigen Änderungen klein. Zum anderen wird durch die Starkregen Anpassung nur ein Bruchteil aller Werte überhaupt abgeändert. Auf der fünfminütigen Dauerstufe sind dies weniger als 0,05 % aller fünfminütigen Niederschlagswerte größer 0 mm und selbst auf der täg-

lichen Dauerstufe betrifft dies nur ca. 1,3 % aller fünfminütigen Niederschlagswerte größer 0 mm. Zusätzlich trägt das Skalieren der Werte in der Anpassung dazu bei, dass die Struktur nur geringfügig verändert wird.

Die Analyse der synthetischen Zeitreihen, bei der die jeweilige Station für die Interpolation der Zielstatistiken nicht berücksichtigt wurde (*Interp.*), zeigt ein unterschiedliches Verhalten für die beiden Stationen (Abb. 3 bis 6, jeweils untere Reihe). Für Fürstentzell sind die Ergebnisse ähnlich gut wie für die Version *Punkt*. Für Augsburg werden die Jahresniederschlagssummen deutlich und die stündliche Verteilung leicht überschätzt. Dies spiegelt sich auch in einer systematischen Überschätzung der partiellen Serie wieder. Bevor auf die Ursachen dieser Überschätzung genauer eingegangen wird, werden zunächst die Ergebnisse der indirekten Validierung besprochen.

4.2 Indirekte Validierung über Schmutzfrachtsimulation

Wie bereits erläutert, zeichnen sich Niederschlagszeitreihen durch eine sehr komplexe zeitliche Struktur aus. Werden zusätzlich die Abflussbildung, die Abflusskonzentration sowie die Kanalabflüsse betrachtet, ist es nur schwer möglich vorherzusagen, ob eine synthetische Niederschlagszeitreihe die gleichen

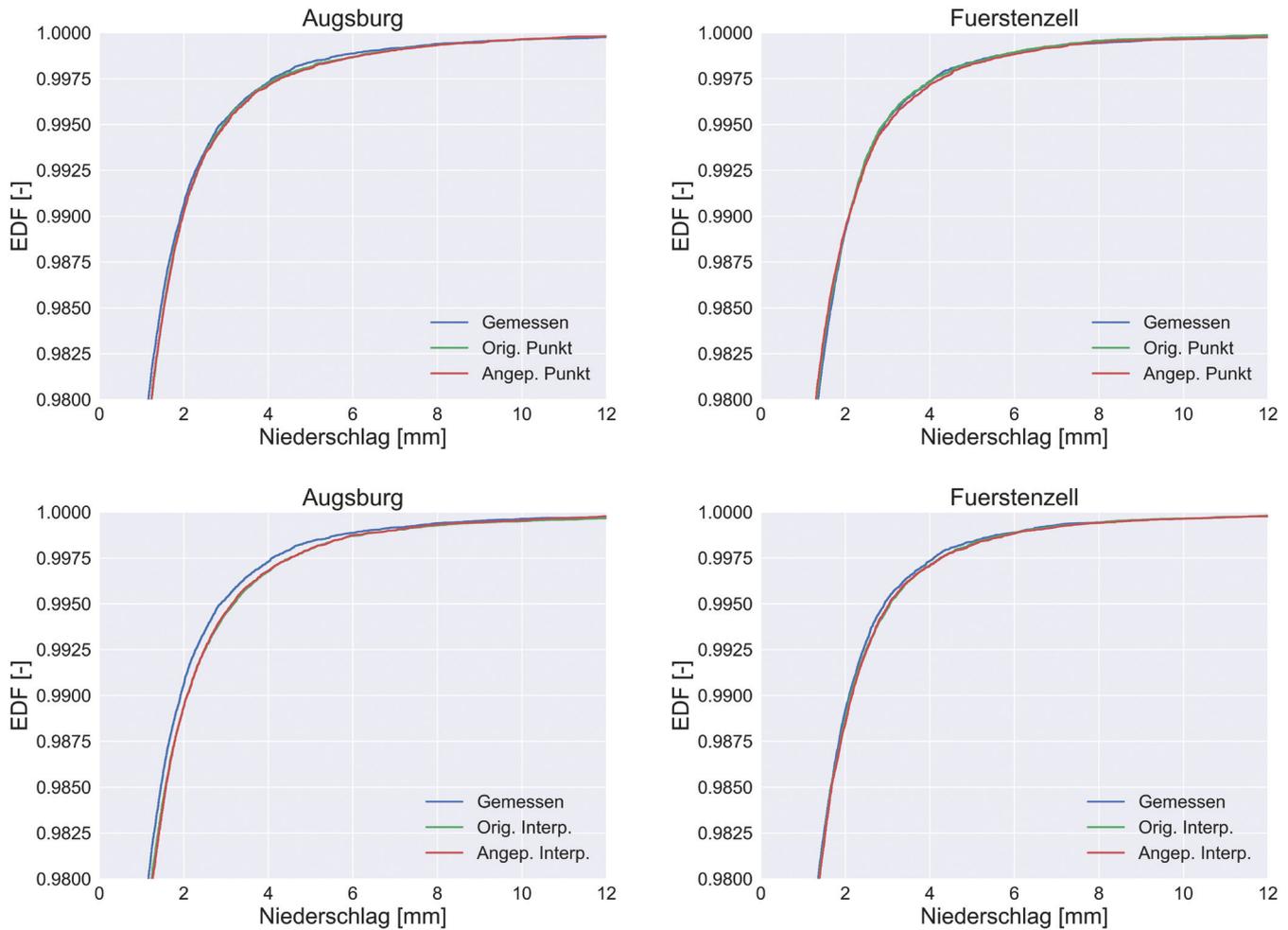


Abbildung 5
 Ausschnitt der empirischen Verteilungsfunktion (EDF) der stündlichen Niederschlagswerte.
 Empirical distribution function (EDF) of the hourly precipitation data.

Abflussbedingungen im Kanalnetz erzeugt, wie eine gemessene Reihe. In diesem Fall wird ein fiktives Kanalnetz verwendet, um das langjährige Überlaufverhalten bei einer Schmutzfrachtsimulation mit synthetischen Reihen im Vergleich zu den gemessenen zu untersuchen.

4.2.1 Fiktives Kanalnetz

Eine Schwierigkeit bei der Auswahl eines repräsentativen Kanalnetzes besteht darin, dass das Abflussverhalten maßgeblich von den örtlichen Randbedingungen und somit von der individuellen Kanalnetzstruktur abhängt. Bei einer emissionsseitigen Betrachtung von Schmutzfrachtsimulationen ist das langjährige mittlere Verhalten eher von Bedeutung als die korrekte Wiedergabe von einzelnen Ereignissen. Daher kann auf vereinfachte, hydrologische Modellansätze zurückgegriffen werden (ATV-DVWK-M165, 2004). Das hier verwendete fiktive Kanalnetz basiert auf einem abgeänderten Modell aus den frühen 90er Jahren (DRECHSEL, 1991) und wurde bereits zuvor angewendet (MÜLLER et al., 2017b). Die zwei wesentlichen Parameter, die die Überlaufbauwerke beschreiben und das Entlastungsverhalten maßgeblich beeinflussen, sind das spezifische Volumen V_s und die spezifische Regenabflussspende q_s . Zusätzlich hängt das Entlastungsverhalten vom Dämpfungsverhalten der Abflussganglinie im Vergleich

zur Niederschlagszeitreihe ab. Je steiler das Kanalnetz und je kürzer das Einzugsgebiet, desto schneller und stärker reagieren die Entlastungsbauwerke. Somit wird hier ein weiterer Parameter betrachtet, die Weglänge des Oberflächenabflusses l_0 , welcher über die Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler auf die Abflussganglinie Einfluss nimmt (ROSSMAN et al., 2016).

Im vorliegenden Artikel besteht das fiktive Kanalnetz aus 21 parallelgeschalteten Überlaufbauwerken, deren Drosselabflüsse individuell der Kläranlage zugeführt werden. Sechs Bauwerke (R1 bis R6) sind einfache Regenüberläufe mit $q_s = \{5; 10; 15; 30; 50; 75 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}\}$. Die anderen Bauwerke stellen Regenüberlaufbecken mit unterschiedlichen Kombinationen XY aus Volumina und Abflussspenden dar. Hierbei steht X für $V_s = \{15; 30; 50 \text{ m}^3/\text{ha}\}$ und Y für $q_s = \{0,3; 0,5; 1; 2; 5 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}\}$. Die Bezeichnung 31 steht damit beispielsweise für ein Bauwerk mit einem spezifischen Volumen von $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ und einer spezifischen Abflussspende von $0,3 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$. Alle Bauwerke sind jeweils an ein Einzugsgebiet mit einer Länge des Fließweges des Oberflächenabflusses von $l_0 = 33 \text{ m}$ oder $l_0 = 5.000 \text{ m}$ angeschlossen und entwässern unabhängig voneinander. Somit werden insgesamt 42 verschiedene Kombinationen repräsentiert, die die meisten relevanten Überlaufbauwerke aus der Praxis abdecken. Das Modell wird mit der

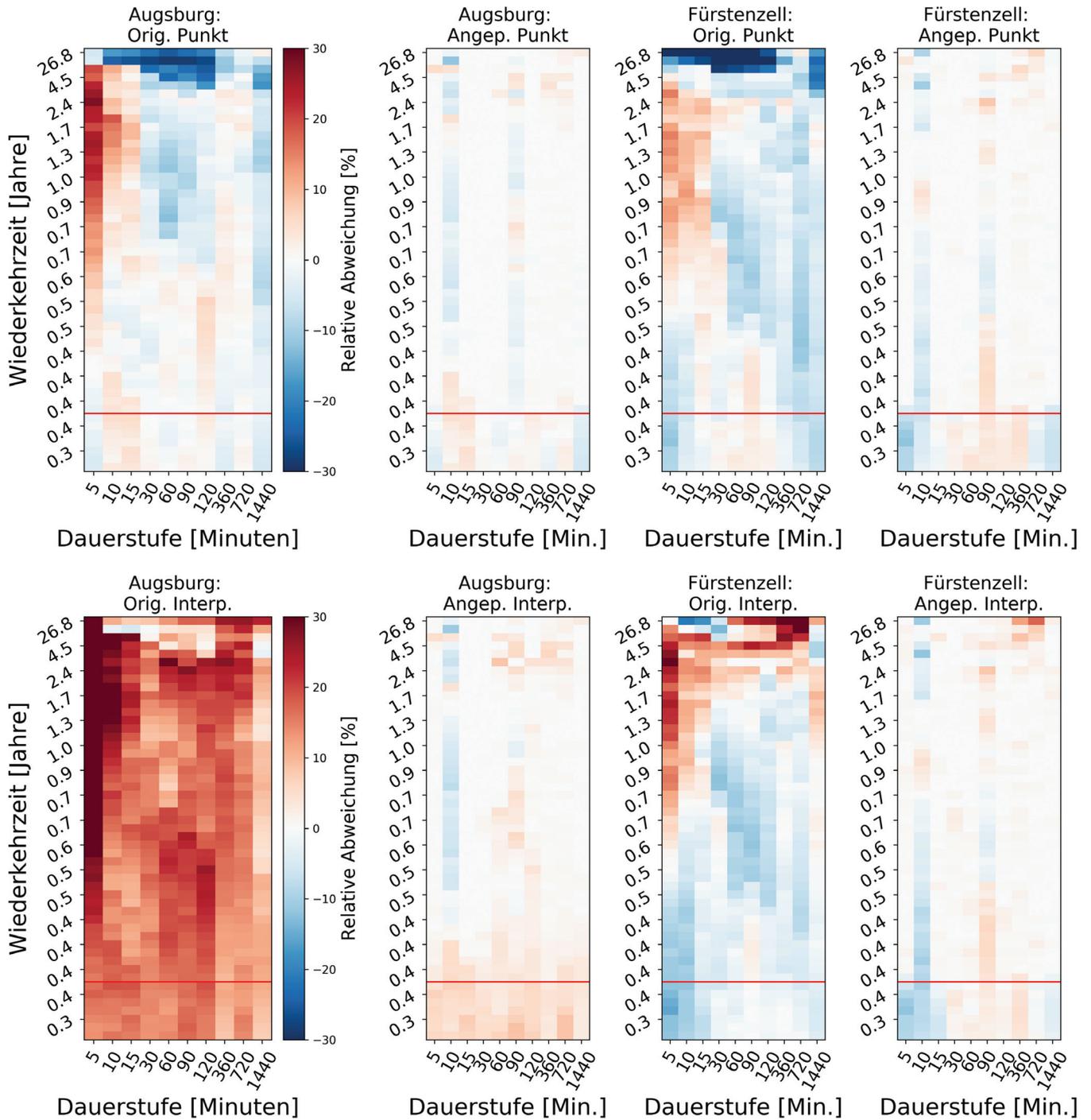


Abbildung 6
 Relative Abweichung in den partiellen Serien zwischen gemessener Zeitreihe und den acht Varianten an simulierten Zeitreihen jeweils über (Variante - Gemessen)/Gemessen berechnet. Es ist der Mittelwert über 150 Realisationen dargestellt. Die rote Linie definiert die minimale Wiederkehrzeit, die üblicherweise für die Berechnung der partiellen Serien verwendet wird (DWA-A531, 2012).
 Relative deviation of the partial series between the measured and the eight variations of simulated time series each calculated as (variation - measured)/measured. The mean of 150 realizations is illustrated. The red line defines the minimal return period that is usually used to calculate the partial series (DWA-A531, 2012).

Kanalnetzsimulationssoftware Storm Water Management Model (SWMM) (ROSSMAN et al., 2016) simuliert. Die Länge $l_0 = 5.000$ m stellt für die reine Repräsentation des Oberflächenabflusses einen zu hohen Wert dar. Dieser Wert soll jedoch die zusätzlichen Dämpfungs- und Verzögerungsprozesse im Kanalnetz abbilden, die bei einer hydrologischen Kanalnetzsimulation nicht explizit simuliert werden können.

Die Entlastungsereignisse der einzelnen Bauwerke werden hinsichtlich des mittleren jährlichen Überlaufvolumens V_{CSO} ausgewertet, da dieses in der Praxis die größte Relevanz hat.

4.2.2 Variabilität der Messdaten

Selbst gemessene Zeitreihen können aufgrund der hohen jährlichen Variabilität des Niederschlags und der relativ kurzen

Messzeiträume die Realität nicht vollständig abbilden. Bei einem direkten Vergleich von synthetischen Reihen mit Messreihen fällt es schwer zu beurteilen, welche Abweichungen noch akzeptabel sind. Da gemessene Zeitreihen die Realität nicht perfekt widerspiegeln, muss zunächst die in den Messdaten vorhandene Unsicherheit analysiert werden. Diese Bandbreite zeigt akzeptable Abweichungen auf, mit denen die Qualität der synthetischen Zeitreihen bezüglich des Überlaufverhaltens bewertet werden kann.

Hierzu wird ein Bootstrap-Verfahren angewandt (EFRON et al., 1986), wodurch mit Hilfe der ursprünglichen Stichprobe durch Ziehen mit Zurücklegen eine größere Stichprobe erstellt wird. Das heißt, anstatt eines einzigen mittleren jährlichen Überlaufvolumens wird eine Bandbreite an m möglichen mittleren jährlichen Überlaufvolumina berechnet. Zuerst wird mit der gemessenen Zeitreihe eine Schmutzfrachtsimulation durchgeführt und das Volumen der Überlaufereignisse jahresweise (16 Jahre) ausgewertet. Anschließend werden $m = 10.000$ Bootstrap-Stichproben der Länge $n = 16$ durch Ziehen mit Zurücklegen gebildet und der Mittelwert jeder der m -Stichproben berechnet. Diese

werden der Größe nach sortiert und die größten und kleinsten 5 % verworfen. Die übrigen Werte beschreiben das 90 %ige Konfidenzintervall. Unter der Annahme, dass die ursprüngliche Stichprobe die Realität (Grundgesamtheit) repräsentiert, spiegelt das Konfidenzintervall die Bandbreite wider, in der das wahre Überlaufvolumen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % liegt. Das ermittelte Konfidenzintervall, auch als Vertrauensbereich bezeichnet, beschreibt somit die Unsicherheit innerhalb der Messdaten. Da die Niederschlagssimulation nicht besser sein kann als die zugrundeliegenden Messdaten, kann dieser Bereich als Gütekriterium für die synthetischen Zeitreihen verwendet werden. Das graue Band in Abbildung 7 stellt das Konfidenzintervall der Messdaten dar. Es zeigt, dass bei einer Zeitreihenlänge von $n = 16$ Jahren noch Unsicherheiten in der Größenordnung von $\pm 20\%$ in Bezug auf das jährliche Überlaufvolumen auftreten.

4.3.3 Ergebnisse der synthetischen Niederschlagsdaten

Die relative Abweichung des Überlaufvolumens V_{CSO} der acht Varianten synthetischer Niederschlagszeitreihen von den Messwerten ist in Abbildung 7 illustriert. Auch hier soll zuerst auf die Version *Punkt* eingegangen werden (obere Reihe). Sowohl für

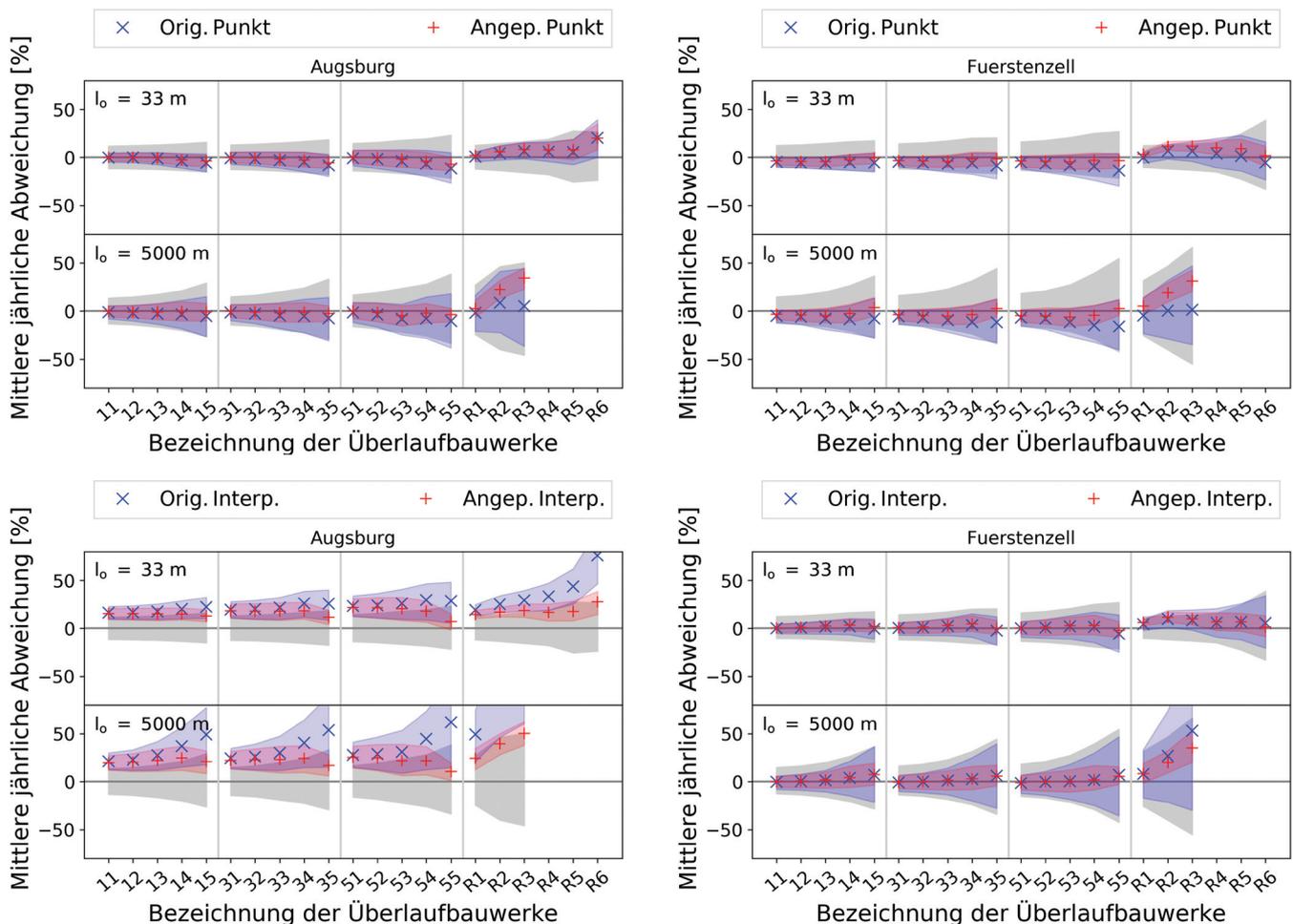


Abbildung 7

Mittlere jährliche Abweichungen der Überlaufvolumina von den synthetischen Zeitreihen und der gemessenen Reihe. Die Kreuze zeigen den Mittelwert der 150 Realisationen; die farbigen Bandbreiten das 90 %ige Konfidenzintervall der Realisationen. In grau ist das 90 %ige Konfidenzintervall der Messunsicherheit dargestellt (Kap. 4.2.2).

Mean annual deviation of the overflow volume of the synthetic time series from the measured series. The crosses indicate the mean of 150 realizations; the colored bandwidths reflect the 90 % confidence intervals of the realizations. The 90 % confidence interval of the measurement uncertainty is illustrated in grey (Section 4.2.2).

Augsburg als auch für Fürstzell liegen die Überlaufvolumina der synthetischen Zeitreihen überwiegend innerhalb des Konfidenzintervalls der gemessenen Zeitreihen. Somit weisen die mit NiedSim3 generierten Zeitreihen in diesen beiden Fällen nicht nur korrekte statistische Eigenschaften auf, sondern auch eine realistische zeitliche Struktur, die in der Schmutzfrachtsimulation zu vergleichbaren Ergebnissen wie mit gemessenen Zeitreihen führt.

Ein Vergleich der Überlaufvolumina von Reihen mit und ohne nachträgliche Starkregenoptimierung zeigt, dass die Mittelwerte kaum beeinflusst werden, wenn auf Starkregenereignisse nachträglich optimiert wird. Die Bandbreite der einzelnen Realisationen verringert sich allerdings. Somit wird deutlich, dass Starkregenereignisse die Ergebnisse der Schmutzfrachtsimulation beeinflussen können. Vor allem wenn relativ kurze Zeiträume betrachtet werden (hier $n = 16$ Jahre), erhöht die Unsicherheit der Starkregenereignisse die Bandbreite innerhalb der synthetischen Realisationen. Umgekehrt kann durch eine Optimierung auf die partielle Serie diese Bandbreite verringert und somit das Resultat einzelner Realisationen robuster werden. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass die Zielwerte der optimierten Starkregenereignisse auch den örtlichen Charakteristika entsprechen. Da in diesem Artikel die gemessenen Starkregenereignisse verwendet werden, ist diese Annahme erfüllt. Für die operationelle Version von NiedSim3 hängt diese Annahme jedoch von der Güte der zugrundeliegenden Starkregenanalyse (d. h. KOSTRA) ab.

Werden nun die Ergebnisse der Variante *Interp.* betrachtet (Abb. 7, untere Reihe), zeigt sich die Relevanz der interpolierten Statistiken. Für Augsburg wird das Überlaufvolumen deutlich überschätzt, wohingegen Fürstzell vergleichbare Ergebnisse wie die Version *Punkt* aufweist. Dieses Resultat deckt sich mit den Ergebnissen der Analyse der Niederschlagsstatistiken (Kap. 4.1). Die Überschätzung der Jahresniederschlagssummen und der stündlichen Verteilung führt zu einem deutlich größeren Überlaufvolumen. Die Optimierung der Starkregenereignisse kann

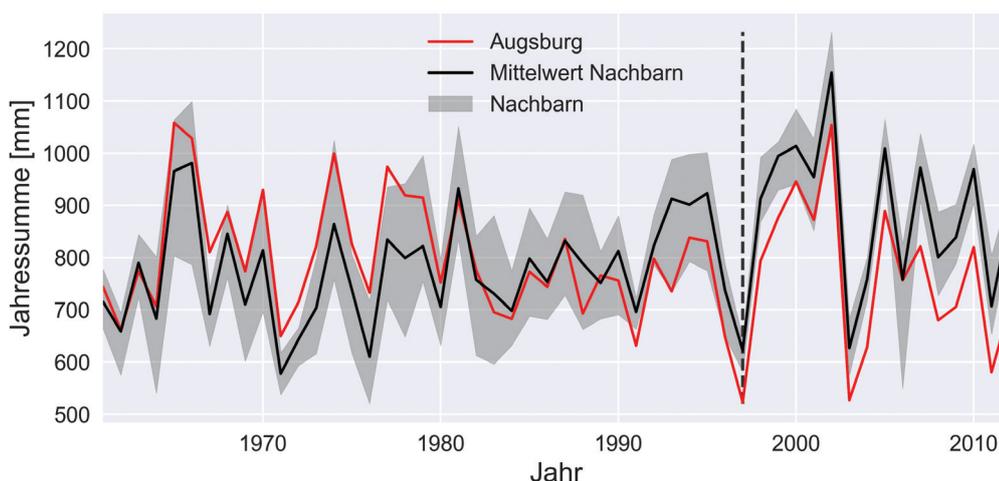


Abbildung 8

Jahressummen der Messwerte der Tagesstation Augsburg sowie Mittelwert und Bandbreite der umliegenden fünf nächsten Nachbarstationen. Auf Grund der sich ändernden Stationsdichte, gehen in unterschiedlichen Jahren unterschiedliche Nachbarn in die Abbildung ein. Ab 1997 (gestrichelte Linie) stehen für Augsburg zusätzlich hochaufgelöste Daten zur Verfügung.

Annual sums of the measured daily precipitation gauge of Augsburg as well as the mean and the bandwidth of the five nearest neighboring stations. The plot depends in different years on different neighboring stations due to the changing density of the gauge network. Since 1997 (dashed line) there have been additional high-resolution data available.

die Überschätzung bei Bauwerken mit großem spezifischen Regenabfluss reduzieren. Der Einfluss bei Bauwerken mit geringem spezifischen Überlauf ist gering, sodass die Abweichungen nach wie vor außerhalb der Variabilität der Messdaten liegen. Dies zeigt erneut, dass die Ergebnisse der Schmutzfrachtsimulation zwar von Starkregenereignissen beeinflusst werden, damit jedoch nicht vollständig beschrieben werden können.

5 Weiterführende Analyse und Diskussion der Abweichungen

Die Abweichungen der synthetischen Reihen von der gemessenen Reihe in den Schmutzfrachtsimulationen für Augsburg in der Version *Interp.* kann unter anderem auf die systematische Überschätzung des Jahresniederschlags zurückgeführt werden. Um diese Probleme zu analysieren und zu bewerten, wird auf die Tagesstationsdaten des DWDs zurückgegriffen, die für einen deutlichen längeren Zeitraum zur Verfügung stehen. Zunächst wird die Station Augsburg im Vergleich zu den fünf nächsten Nachbarstationen untersucht. Aufgrund einer sich ändernden Stationsdichte, können sich die Nachbarstationen von Jahr zu Jahr unterscheiden. Abbildung 8 zeigt, dass für den Zeitraum 1997 bis 2012 bereits in den Messdaten eine systematisch geringere Jahressumme der Station Augsburg im Vergleich zu den umliegenden Nachbarstationen beobachtet wurde. Wird, wie in der Variante *Interp.*, die Station Augsburg aus der Interpolation herausgenommen, liegen die interpolierten Jahressummen daher deutlich über dem ursprünglichen Messwert. Da diese als Zielstatistik in die Generierung eingehen, werden auch die Jahressummen der synthetischen Reihen von NiedSim überschätzt.

Wird jedoch bereits der Zeitraum ab 1961 betrachtet, bestätigt sich eine systematisch niedrigere Jahressumme im Vergleich zu den Nachbarstationen nicht. Ein wesentlicher Unterschied im Verlauf der Jahre zwischen 1961 und 2012 liegt in der Anordnung der nächsten Stationen (Abb. 9). 1961 betrug der mittlere Stationsabstand der nächsten fünf Stationen 5,9 km. Aufgrund der Ausdünnung des Tagesstationsnetzes vergrößerte sich der mittlere Abstand auf 13,4 km im Jahr 2012. Somit kann die niedrigere gemessene Jahressumme in Augsburg vermutlich auf die orografische Lage der Station im Tal des Lechs zurückgeführt werden, die in jüngeren Jahren nicht mehr von Nachbarstationen abgedeckt wird.

Zwar wird in Niedsim3 die Höheninformation als externe Variable im Kriging berücksichtigt, doch scheint dies nicht unbedingt ausreichend zu sein, um die kleinräumigen Unterschiede in den örtlichen Statistiken zu berücksichtigen. Dies zeigt, dass möglichst alle zur Verfü-

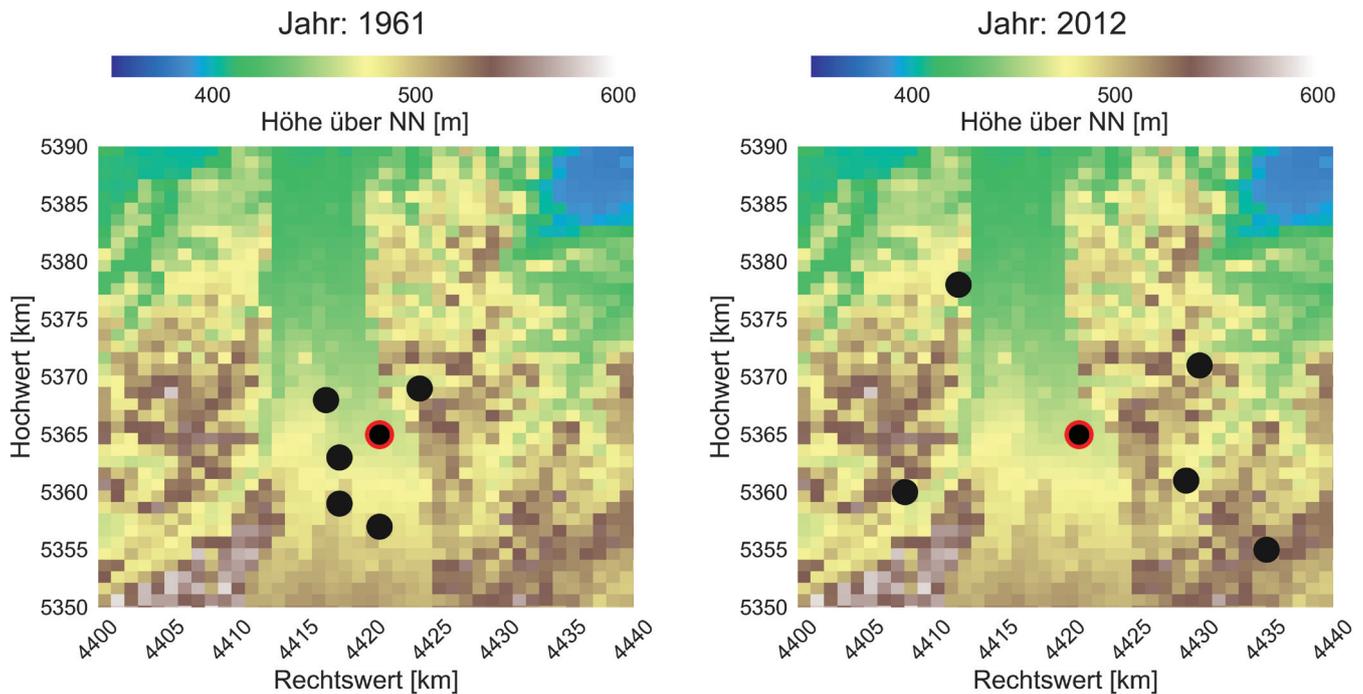


Abbildung 9
 Räumliche Lage der Messstation Augsburg (rot umrandet) und der umliegenden fünf nächsten Nachbarstationen.
 Location of the gauge Augsburg (red circle) and of the five closest stations.

gung stehenden Informationen über den kompletten Zeitraum für die Interpolation der Niederschlagsstatistiken verwendet werden sollten, insbesondere das relativ dichte Tagesstationsnetz aus früheren Jahren.

Um die Abweichung der Jahressummen der Station Augsburg in Bezug auf die Qualität der Niederschlagsgenerierung für beliebige Standorte beurteilen zu können, werden alle 1.233 Tagesstationen des DWDs in Bayern betrachtet. In Abbildung 10 sind die mittleren Abweichungen der Jahressumme aller Stationen von ihren fünf nächsten Nachbarn in einem Box-Plot dargestellt. Die relativ große Bandbreite an Abweichungen kann dadurch erklärt werden, dass der Mittelwert der fünf nächsten Nachbarn in Gebieten mit sehr unterschiedlicher Topografie (z. B. Alpen und Bay-

rischer Wald) deutlich von dem der eigentlichen Station abweichen kann. Aus diesem Grund reicht eine einfache Bildung des Mittelwerts für die Interpolation dieser Statistik (siehe Kap. 2.1) nicht aus.

Diese einfache Methode eignet sich jedoch, um die Abweichungen in den Jahressummen für Augsburg im Vergleich zu anderen Stationen abschätzen zu können. Für Augsburg zeigt sich eine relativ große Abweichung im Zeitraum 1997 bis 2012. Diese reduziert sich deutlich, sobald der Zeitraum auf 1961 bis 2012 verlängert wird. Dies deutet darauf hin, dass die Abweichungen in Augsburg auf die geringere Stationsdichte der Jahre 1997 bis 2012 zurückgeführt werden kann, deren systematische Unterschätzung bei Betrachtung eines längeren Zeitraums reduziert

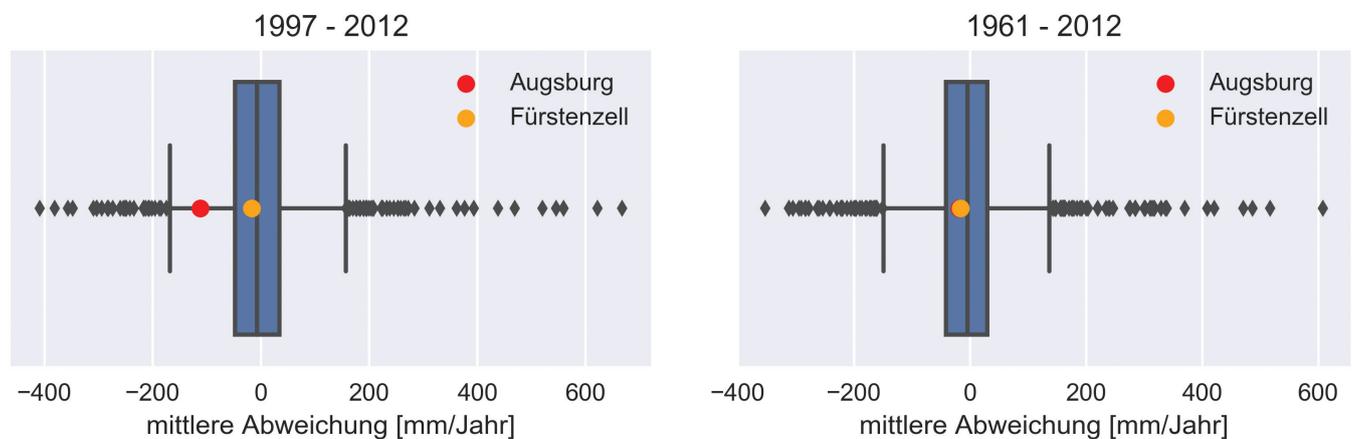


Abbildung 10
 Box-Plot-Darstellung der mittleren Abweichungen der Jahressummen von insgesamt 1.233 Tagesstationen in Bayern von ihren jeweils fünf nächsten Nachbarstationen.
 Box-Plot of the mean deviation of the annual precipitation sum of 1,233 daily stations in Bavaria from the respective five closest neighboring stations.

werden könnte. Außerdem zeigt sich, dass die Abweichungen für Augsburg für 1997 bis 2012 eine Ausnahme darstellen, da für den Großteil der Stationen deutlich geringere Abweichungen auftreten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wird die neue Version des synthetischen Niederschlagssimulators NiedSim3 vorgestellt. Die synthetischen Zeitreihen werden für die Stationen Augsburg und Fürstzell sowohl über einen Vergleich mit Statistiken gemessenen Niederschlags als auch für urbanhydrologische Anwendungen mit einem fiktiven Schmutzfrachtmodell validiert. Hierbei zeigt sich, dass die Unsicherheiten in den synthetischen Daten mit denen der Messdaten vergleichbar sind, wenn die Eingangsstatistiken die örtlichen Gegebenheiten korrekt wiedergeben. Ist dies nicht der Fall, sondern unterscheiden sich die gemessenen Statistiken insbesondere die Jahressummen bereits systematisch von den Statistiken der umliegenden Stationen, kann dies zu systematischen Abweichungen in den synthetischen Reihen führen.

Die Abweichungen in den Jahressummen treten in früheren Jahren auf Grund einer höheren Stationsdichte nicht auf, da die orografischen Unterschiede besser abgebildet werden können. Eine Möglichkeit diesen systematischen Fehler zukünftig zu reduzieren bestünde darin, die Informationen des räumlich dichten Tagesstationsnetzes aus früheren Jahren für die Interpolation zu nutzen. Das heißt, zunächst könnten die Jahressummen aller verfügbaren Tagesstationen zeitlich aufgefüllt werden (BÁRDOSSY et al., 2014) und erst anschließend die räumliche Interpolation erfolgen. Somit würde die dichte räumliche Information aus früheren Jahren für die Zeiträume geringerer räumlicher Dichte nutzbar.

Weiterhin stellt sich heraus, dass mit der nachträglichen Optimierung der Starkregenereignisse nicht nur Extremwerte besser berücksichtigt werden können, sondern auch die Variabilität der synthetischen Realisationen in Bezug auf die Schmutzfrachtsimulation verringert wird. Eine einzige synthetische Zeitreihe, die die örtlichen Eigenschaften robust wiedergibt, ist vor allem im Hinblick auf die operationelle Version von NiedSim3 von Bedeutung, da nach aktuellem Stand der Technik nur eine Realisation für Kanalnetzrechnungen verwendet wird. Aufgrund der relativ großen Variabilität in den Messdaten, sollten jedoch Ensembleberechnungen und Unsicherheitsabschätzungen zukünftig nicht nur niederschlagsseitig, sondern auch bei Kanalnetzsimulationen berücksichtigt werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit dem stochastischen Niederschlagsmodell NiedSim3 synthetische Zeitreihen generiert werden können, die für Kanalnetzdimensionierung und Schmutzfrachtberechnungen geeignet sind. Allerdings kann es für orographisch heterogene Lagen aufgrund der kleinräumigen Variabilität der Niederschlagsstatistiken noch zu gewissen Abweichungen kommen. Weitere Untersuchungen hierzu sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

Summary and Outlook

In the present article the newest version of the stochastic rainfall simulator NiedSim is introduced. For rainfall gauges in Augsburg and Fürstzell synthetic time series are validated directly through a comparison with precipitation statistics of observed

time series as well as indirectly with a fictitious polluting load model for applications in urban hydrology. The validation results reveal that the uncertainties of the synthetic data are comparable to those of the observations, when the input statistics of the rainfall simulator reflect correctly the regional conditions. If this is not the case, that is, if the measured data, particularly the annual precipitation sums, are already systematically different from the measured data, systematic deviations in the synthetic time series may occur.

The systematic deviations do not occur in earlier years due to the higher density of the stations because they can reflect the orographic differences better. One possibility to reduce the systematic error in the future might be the usage of the information of the dense daily gauging network of earlier years for the interpolation. That is, the annual precipitation sum of all available daily stations could be infilled in a temporal direction (BÁRDOSSY et al., 2014) before starting the spatial interpolation. Consequently, one could use the dense spatial information of earlier years for time periods with a coarse spatial density.

Furthermore, the subsequent optimization of the heavy rain events is found to lead not only to a better representation of extreme values, but also to a reduction of the variability of the synthetic realizations concerning polluting load simulations. One single synthetic time series reflecting the local properties robustly is especially important for the operational version NiedSim3, as only one realization is used for sewer system calculations in practice according to the current state of the art. Because of the relatively high variability of measured data, in the future, ensemble simulations and uncertainty quantifications should not only be done for precipitation input, but should also be regarded in sewer simulations.

In conclusion, the stochastic precipitation model NiedSim3 can provide synthetic time series that can be used for the design of sewer systems as well as for combined sewer simulations. In regions with a heterogeneous orography, however, deviations may occur due to the small scale variability of rainfall statistics in these regions. Further investigations in this field are subject of current research activities.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung der Forschungsprojekte „Die Stadt als hydrologisches System im Wandel - Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts (SAMUWA)“ und „Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen (SYNOPSE)“, in deren Rahmen die vorgestellten Forschungsergebnisse erzielt wurden. Für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten danken die Autoren dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und den Umweltbehörden der Bundesländer Baden-Württemberg (LUBW), Bayern (LfU), Hessen (HLNUG) und Rheinland-Pfalz (LfU).

Anschrift der Verfasser

Thomas Müller, Dr.-Ing.
 Andrés Bárdossy, Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing.
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
 Pfaffenwaldring 61
 70569 Stuttgart

thomas.mueller@iws.uni-stuttgart.de
 andras.bardossy@iws.uni-stuttgart.de

Tobias Mosthaf, Dr.-Ing
 Bureau d'études Micha Bunusevac
 107, rue de Mamer
 L-8081 Bertrange
 t.mosthaf@bureaumb.lu

Literaturverzeichnis

- ANDRÉS-DOMÉNECH, I., A. MONTANARI & J. B. MARCO (2010): Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, Bd. 14, 7, S. 1221-1232. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-14-1221-2010>
- ATV-A128 (1992): Arbeitsblatt ATV-A 128 - Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ISBN: 978-3-933693-16-7
- ATV-DVWK-M165 (2004): Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung. Hennef: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2004. ISBN: 3-924063-93-1
- BÁRDOSSY, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research* 34 (7), S. 1737-1744. <https://doi.org/10.1029/98WR00981>
- BÁRDOSSY, A. & G. PEGRAM. (2014): Infilling missing precipitation records – A comparison of a new copula-based method with other techniques. *Journal of Hydrology*, Bd. 519, Part A, S. 1162-1170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.025>
- BÁRDOSSY, A. & G. PEGRAM. (2013): Interpolation of precipitation under topographic influence at different time scales. *Water Resources Research*, Bd. 48, 8, S. 4545-4565. <https://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20307>
- BERNE, A., G. DELRIEU, J.-D. CREUTIN & C. OBLED (2004): Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, Bd. 299, 3, S. 166 - 179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.002>
- BRUNNER, P. G., W.F. HENRICH, H. ROTH, R. GÜNTHER & H. BROMBACH (1997): Wirtschaftliche Aspekte bei Gestaltung, Konstruktion und Ausrüstung von Regenbecken, 148 S. pp., LfU, Referat 15 - Bibliothek, Karlsruhe.
- CRESSIE, N. A. C. (1993): *Statistics for spatial data*. Revised edition. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
- DRECHSEL, U. (1991): Repräsentanz und Übertragbarkeit von Niederschlags-ersatzbelastungen zur Durchführung von Schmutzfrachtberechnungen. *Inst. für Wasserbau, Techn. Hochsch. Darmstadt*, Bd. 45, S. 1-112
- DUNKERLEY, DAVID (2008): Rain event properties in nature and in rainfall. *Hydrological Processes*, Nr. 22, S. 4415-4435, <https://dx.doi.org/10.1002/hyp.7045>
- DWA-A102-ENTWURF (2016): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer - Entwurf (Oktober 2016). Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ISBN: 978-3-88721-383-1
- DWA-A118 (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen (März 2006). (Korrigierte Fassung, Stand: September 2011). Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ISBN: 978-3-939057-15-4
- DWA-A531 (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531 Starkregen in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit und Dauer. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2012. ISBN: 978-3-942964-28-9
- EFRON, B. & TIBSHIRANI, R. (1986): Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy. [Hrsg.] *Institute of Mathematical Statistics. Statistical Science*, 1, S. 54-75
- GAUME, E., N. MOUHOUS & H. ANDRIEU (2007): Rainfall stochastic disaggregation models: Calibration and validation of a multiplicative cascade model. *Advances in Water Resources*, Bd. 30, 5, S. 1301-1319. <https://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.11.007>
- JUNGHÄNEL, T., H. ERTEL & T. DEUTSCHLÄNDER (2017): KOSTRA-DWD-2010R - Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Offenbach: Deutscher Wetterdienst - Abteilung Hydrometeorologie
- KITANIDIS, P. K. (1997): *Introduction to Geostatistics: Application to Hydrogeology*. New York: Cambridge University Press
- KOUTSOYIANNIS, D. & C. ONOF (2011): Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*, Bd. 206, 1. [https://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00097-3](https://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00097-3)
- MALITZ, G. (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland, Grundlagenbericht. Offenbach: 97. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V
- MALITZ, G. & H. ERTEL (2015): KOSTRA-DWD-2010 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010)-Abschlussbericht. Offenbach: Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie
- MOLNAR, P. & P. BURLANDO (2005): Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. *Atmospheric Research*, Bd. 77, 1, S. 137-151. <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.024>
- MOSTHAF, T. & A. BÁRDOSSY (2017): Regionalizing nonparametric models of precipitation amounts on different temporal scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, Bd. 21, 5, S. 1-39. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-21-2463-2017>
- MÜLLER, H. & U. HABERLANDT (2016): Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology. *Journal of Hydrology*, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.031>
- MÜLLER, T. (2017): *Generation of a Realistic Temporal Structure of Synthetic Precipitation Time Series for Sewer Applications*. Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Mitteilungen, H. 252; Doktorarbeit. ISBN 978-3-942036-56-6; in Druck
- MÜLLER, T., T. MOSTHAF, S. GUNZENHAUSER, J. SEIDEL & A. BÁRDOSSY (2017a): Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator. Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Mitteilungen, H: 255. ISBN 978-3-942036-59-7
- MÜLLER, T., M. SCHÜTZE & A. BÁRDOSSY (2017b): Temporal asymmetry in precipitation time series and its influence on flow simulations in combined sewer systems. *Advances in Water Resources*, 107, S. 56-64. <https://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.06.010>
- PASCHALIS, A, P. MOLNAR, S. FATICHI & P. BURLANDO (2014): On temporal stochastic modeling of precipitation, nesting models across scales. *Advances in Water Resources*, Bd. 63, S. 152-166. <https://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.11.006>
- PUI, A., A. SHARMA, R. MEHROTRA, B. SIVAKUMAR & E. JEREMIAH (2012): A comparison of alternatives for daily to sub-daily rainfall disaggregation. *Journal of Hydrology*, Bde. 470-471, S. 138-157. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.041>

- ROSSMAN, L. A. & W. C. HUBER (2016): Storm Water Management Model Reference Manual Volume 1 - Hydrology (Revised). United States Environmental Protection Agency (EPA)
- SALVADORI, G. & C. DE MICHELE (2006): Statistical characterization of temporal structure of storms. *Advances in Water Resources*, Bd. 29, 6, S. 827-842. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.07.013>
- SCHAFMEISTER, M.-T. (1999): Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
- SCHILLING, W. (1991): Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research*, Bd. 27, 1, S. 5-21. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(91\)90003-F](https://doi.org/10.1016/0169-8095(91)90003-F)
- SCHMITT, T. G. & H. H. HAHN (1986): Schmutzfrachtberechnung für Kanalnetze. Karlsruhe: Institut für Siedlungswasserwirtschaft Universität Karlsruhe, Nr: 44
- SINGH, V. P. (1997): Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrological Processes*, Bd. 11, 12, S. 1649-1669. [https://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19971015\)11:12<1649::AID-HYP495>3.0.CO;2-1](https://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19971015)11:12<1649::AID-HYP495>3.0.CO;2-1)
- VAES, G., P. WILLEMS & J. BERLAMON (2001): Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water*, Bd. 3, 1, S. 107-112. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00020-6)
- VAN DER HEIJDEN, S., A. CALLAU, H. MÜLLER, C. BERNDT, T. MÜLLER, T. MOSTHAF, A. WAGNER, M. LORENZ, S. ROHDE, K. SCHROEDER, K. TEUBER, S. MASSMANN, M. SCHÖNFELD, & S. KRÄMER (2017): Abschlussbericht für das INIS-Projekt SYNOPSIS. Förderkennzeichen 033W002B
- VANDENBERGHE, S., N. E. C. VERHOEST, C. ONOF, & B. DE BAETS (2011): A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events: A case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall. *Water Resources Research*, Bd. 47, 7. <https://dx.doi.org/10.1029/2009WR008388>