

Uwe Haberlandt, Stefan Krämer, András Bárdossy, Anne Bartens, Philipp Birkholz, Micha Eisele, Lothar Fuchs, Ole-Christian Herrmann, Andreas Kuchenbecker, Stefanie Maßmann, Ross Pidoto, Thomas Müller, Jochen Seidel & Klaus Sympher

Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland

Continuous synthetic precipitation for Germany for design in urban hydrology

Der Beitrag präsentiert Ergebnisse eines Forschungsprojektes, welches sich mit der Untersuchung von Niederschlagsmodellen zur Erzeugung von synthetischen Niederschlagsdaten für stadthydrologische Anwendungen beschäftigt hat. Es werden zwei ausgewählte Niederschlagsmodelle vorgestellt und verglichen. Die Modelle wurden unter Verwendung der Daten von ungefähr 800 Niederschlagsstationen für ganz Deutschland regionalisiert und für 45 ausgewählte repräsentative Standorte über Statistiken von Niederschlag und simuliertem Abfluss in Kanalnetzen validiert. Die Ergebnisse zeigen die Überlegenheit der synthetischen Niederschläge im Vergleich zu einem Praxiszenario, welches immer die nächstgelegene verfügbare Station zur Datenlieferung verwendet. Die besten Ergebnisse liefert eine Mischung der Daten aus beiden Modellen, die zu einer Fehlerkompensation führt. Es werden Empfehlungen zur notwendigen Zeitreihenlänge für die praktische Bemessung gegeben. Die synthetischen Niederschläge stehen jetzt für beliebige Punkte in Deutschland auf einer Webplattform für die wasserwirtschaftliche Praxis zur Verfügung.

Schlagwörter: Niederschlagsmodell, synthetische Niederschlagsdaten, Urbanhydrologie

Results from a research project are presented, dealing with the analyses of precipitation models for the generation of stochastic rainfall for urban hydrology. Two selected rainfall models are presented and compared. The models are regionalised for Germany using data from about 800 rainfall stations. They are validated on a representative subset of 45 stations based on precipitation statistics and simulated discharge in sewer systems. The results show the superiority of synthetic rainfall compared to a practice scenario where the nearest neighbour station always serves as data provider for the target location. The best results are reached using a mixture of data from both stochastic rainfall models leading to a compensation of errors. Recommendations for the required time series length for practical design are given. The synthetic rainfall data are now available on a web platform for practical applications for any location in Germany.

Keywords: Precipitation model, synthetic precipitation data, urban hydrology

1 Einführung

Für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen mittels mathematischer Simulationsmodelle werden lange kontinuierliche, zeitlich hoch aufgelöste Reihen des Niederschlages benötigt. Beobachtungsdaten stehen gewöhnlich nur in unzureichendem Maße zur Verfügung, häufig in einer zu kurzen Länge und vor allem an zu wenigen Orten. Auf Basis der beobachteten Daten können jedoch synthetische Niederschlagszeitreihen in beliebiger Länge und für unbeobachtete Orte erzeugt werden, welche die örtlichen Besonderheiten des Niederschlagsverhaltens gut nachbilden und daher eine bessere Planungsgrundlage sind (MÜLLER et al., 2018; CALLAU & HABERLANDT, 2017). Ziel der vorliegenden Untersuchungen war zunächst die Weiterentwicklung von Niederschlagsmodellen sowie die Eignungsprüfung der mit diesen Modellen erzeugten synthetischen Zeitreihen als Bemessungsgrundlage für die Stadtentwässerung. Ein weiteres Ziel ist die Bereitstellung der synthetischen Niederschlagszeitreihen auf einem Raster von 1 km x 1 km flächendeckend für Deutschland. Diese Untersuchungen wurden innerhalb des Forschungsprojektes "Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen – SYNOPSE" durchgeführt, über dessen Ergebnisse hier auszugsweise berichtet wird (HABERLANDT et al., 2020).

Stochastische Niederschlagsmodelle werden seit langem zur Lösung der verschiedensten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen herangezogen. Einen Überblick

zu den verschiedenen Typen von Niederschlagsmodellen geben zum Beispiel ONOF (2000) oder HABERLANDT (2011). Die Niederschlagsmodelle werden gewöhnlich spezifisch für bestimmte Anwendungen entwickelt. Für die Anwendung in der Stadthydrologie sind Modelle notwendig, die kontinuierliche Zeitreihen mit einer zeitlichen Mindestauflösung von 5 Minuten liefern (ARNBJERG-NIELSEN, 2012; COWPERTWAIT, 2010; LICZNAR et al., 2015; PARK et al., 2021).

Im vorliegenden Fall geht es bei den stadthydrologischen Anwendungen einerseits um die hydraulische Leistungsfähigkeit am Beispiel der Nachweisgröße "Überstau" (Überstaunachweis) nach DWA-A 118 (2006) und andererseits um die hydrologische "Schmutzfracht-Berechnung" (DWA-A 102, 2020). Diese unterschiedlichen Anwendungsziele verlangen Niederschlagsmodelle, die sowohl Extremwerte als auch die Niederschlagskontinua gut abbilden können. Es können allerdings Abstriche bei der Nachbildung der räumlichen Niederschlagsverteilung gemacht werden, da nur die langjährige Statistik bemessungsrelevant ist. Zudem werden vergleichsweise kleine Gebiete betrachtet, da die Verwendung der synthetischen Zeitreihen auf kleine bis mittelgroße Siedlungsgebiete bzw. Städte zielt, da diese im Gegensatz zu Betreibern großstädtischer Entwässerungssysteme häufig nicht über eigene Niederschlagsmessstationen verfügen.

Im Kapitel 2 werden zunächst das Vorgehen und die Methodik näher erläutert. Das Kapitel 3 geht auf die verwendeten Modelle

und Daten ein. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse präsentiert, welche die Validierung anhand des Niederschlags und anhand simulierter Abflüsse betreffen. Das Kapitel 5 beinhaltet Mapping, Datenbereitstellung und Unsicherheiten. Im Kapitel 6 werden Empfehlungen für die Zeitreihenlänge gegeben und im Kapitel 7 Schlussfolgerungen gezogen.

2 Methodik

Das grundlegende Vorgehen für die Erzeugung, Analyse und Bereitstellung der synthetischen Niederschläge lässt sich in sechs Schritte einteilen:

1. Auswahl und (Weiter-) Entwicklung der Niederschlagsmodelle anhand beobachteter Orte
2. Regionalisierung der Modelle für ausgewählte, unbeobachtete Orte des Niederschlags
3. Niederschlagsseitige Validierung der Modelle bzw. synthetischen Zeitreihen anhand beobachteter Niederschläge für ausgewählte Referenzstandorte
4. Abflusssseitige Validierung für den hydraulischen Überstau nachweis für ausgewählte Referenzstandorte und benachbarte Standorte
5. Abflusssseitige Validierung für die hydrologische Schmutzfracht-Berechnung für ausgewählte Referenzstandorte und benachbarte Standorte
6. Regionalisierung der Niederschlagsmodelle auf ein Raster von 1 km x 1 km für Deutschland

Die Weiterentwicklung der Niederschlagsmodelle (Schritte 1 und 2) wurde teilweise iterativ bzw. mehrfach ausgeführt, solange bis die abflusssseitige Validierung (Schritte 4 und 5) zufriedenstellende Ergebnisse geliefert hat.

2.1 Niederschlagsbelastungen für die Validierung

Für die niederschlags- und abflusssseitige Validierung wurden jeweils folgende Niederschlagsszenarien einbezogen:

- A. Referenz: beobachteter langjähriger Niederschlag am Ort (Zeitreihenlänge: 20 a),
- B. Synthetischer Niederschlag von Niederschlagsmodellen:
 - i) B-WAWI: Modell der Leibniz Uni Hannover (Zeitreihenlänge: 300 a),
 - ii) B-LHG: Modell der Uni Stuttgart (Zeitreihenlänge: 300 a),
 - iii) B-Mixed: Gemischte Daten der Modelle von WAWI & LHG (Zeitreihenlänge: 300 a),
- C. Praxisszenario: Niederschlag von der nächstgelegenen Beobachtungsstation des DWD (Zeitreihenlänge: 10 bis 20 a).

Für die Validierung wird eine Stichprobe von Orten mit langen Niederschlagsbeobachtungen (20 a) ausgewählt (Kap. 3). Diese werden als Referenz (Szenario A) betrachtet.

Mithilfe der beiden Modelle WAWI und LHG werden jeweils 300 Jahre synthetische Niederschlagsdaten erzeugt und geprüft;

dazu gehört auch ein Mixed-Datensatz, der jeweils 150 Jahre der Modelle WAWI und LHG im Jahreswechsel umfasst (Szenario B).

Außerdem wird ein sogenanntes "Praxisszenario" (C) untersucht, für das jeweils die dem Validierungspunkt nächstbenachbarte DWD-Station zur Bemessung verwendet wird. Dieses Vorgehen entspricht der Praxis, wenn keine ortsgültigen Niederschlagsbeobachtungen verfügbar sind. Dieses Verfahren impliziert natürlich teilweise erhebliche Unsicherheiten in Abhängigkeit vom Abstand der Praxisstation zum Ort der Bemessung, in Abhängigkeit von der Zeitreihenlänge und dem gewünschten Wiederkehrintervall (Kap. 6). Für die Validierung der synthetischen Zeitreihen erfolgt eine räumliche Aufteilung in Stichproben (Splitsampling). Der Gesamtdatensatz an Stationen (950 Stück) wird aufgeteilt in eine größere Schätzstichprobe zur Ermittlung der Parameter der Niederschlagsmodelle und eine kleinere Validierungsstichprobe (45 Referenzstationen, Kap. 3). Die Validierungsstichprobe dient der Überprüfung der Modellgüte; die Daten dieser Stichprobe wurden nicht für die Parameterschätzung oder Regionalisierung der Niederschlagsmodelle verwendet. Dieses Splitsampling wurde konsequent für alle Validierungsstufen (Niederschlag, Schmutzfracht und Überstauverhalten) angewendet.

2.2 Zielgrößen

Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von wichtigen Zielkriterien, die für die Validierung der synthetischen Zeitreihen genutzt wurden.

Für die Auswertung wurden die simulierten Zielkriterien aus den Szenarien B und C mit den Kriterien aus dem Referenzszenario A grafisch und unter Verwendung verschiedener Fehlermaße verglichen. Folgende Fehlermaße werden für die Vergleiche im Kapitel 4 verwendet:

prozentualer systematischer Fehler (percent Bias)

$$pBIAS [\%] = \frac{z_i^* - z_i}{z_i} \cdot 100 \quad (1)$$

absoluter Standardfehler (Root Mean Squared Error)

$$RMSE [-] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i^* - z_i)^2} \quad (2)$$

Tabelle 1

Zielkriterien für die Validierung der synthetischen Zeitreihen.
Performance criteria for the validation of the synthetic time series.

Niederschlag

1. Jahressumme NJ [mm/a]
2. Ereignisvolumen EV, -intensität EI, -dauer ED [mm, mm/h, d]
3. Trockendauer TD [d]
4. Extremwertquantile für verschiedene Dauerstufen PQ [mm]

Hydrodynamische Kanalnetzberechnung (hydraulische Leistungsfähigkeit, DWA-A 118)

1. Überstauvolumen $V_{\bar{u}}$ [m³]
2. Überstauwiederkehrzeit $T_{\bar{u}}$ [a]

Schmutzfracht-Berechnung (DWA-A 102)

1. Anzahl der Überlaufereignisse n_{ue} [1/a]
2. Überlaufvolumen V_{Que} [m³]
3. Überlaufdauer T_{ue} [d]

relativer Standardfehler (relative Root Mean Squared Error)

$$rRMSE [-] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{z_i^* - z_i}{z_i} \right)^2} \quad (3)$$

Die Größe z_i beschreibt jeweils das Referenzkriterium (Szenario A) und z_i^* jeweils das simulierte Kriterium (Szenarien B oder C). Für eine gute Modellgüte sollten der pBias nahe Null und der RMSE bzw. der rRMSE möglichst klein sein.

Zur Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Simulation von Überstau, resultierend aus den kurzen Beobachtungsreihen, wird für die abflusseitige Validierung eine zusätzliche Maßzahl PERC eingeführt. Sie beschreibt den Anteil der Schächte mit der geschätzten Überstauwiederkehrzeit auf Grundlage der synthetischen Zeitreihen (z_i^*), die innerhalb des geschätzten Vertrauensbereiches der Überstauwiederkehrzeiten auf Basis der Referenzzeitreihe liegen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Schächte mit Überstau (z_i). Der Vertrauensbereich des Überstauverhaltens der Schächte wurde auf Basis der Referenzzeitreihe mithilfe eines Bootstrap-Verfahrens geschätzt. Die Zielgröße PERC ist somit eine Maßzahl für die Übereinstimmung der simulierten Werte mit dem Vertrauensbereich aus der Beobachtung und wird als Prozentwert angegeben.

$$PERC = \frac{z_i^*}{z_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Die Validierung der synthetischen Niederschläge erfolgt zunächst durch Vergleich mit beobachteten Niederschlägen (Schritt 3) für charakteristische Niederschlagsgrößen und anschließend durch Vergleich von Nachweisgrößen für die Kanalnetz bemessung, die auf der Basis synthetischer und beobachteter Niederschläge simuliert wurden (Schritt 6).

3 Modelle und Eingangsdaten

Nach umfangreichem Testen verschiedener Niederschlagsmodelle (HABERLANDT et al., 2020) wurden zwei Modelle, eines der Universität Hannover (WAWI) und eines der Universität Stuttgart (LHG), für die weiteren Berechnungen und die Regionalisierung für das Untersuchungsgebiet Deutschland ausgewählt (Schritt 1). Beide Modelle werden im Folgenden kurz beschrieben.

3.1 Niederschlagsmodelle

3.1.1 Parametrisches Modell der Leibniz Universität Hannover (WAWI)

Das Modell der Universität Hannover ist ein parametrisches ereignisbasiertes Modell. Eine detaillierte Beschreibung kann CALLAU PODUJE & HABERLANDT (2017) entnommen werden. Der Niederschlag wird in dieser Version des Modells jeweils univariat für jeden gewünschten Zielpunkt modelliert. Das Niederschlagsmodell beruht auf der Theorie

der Alternating-Renewal-Prozesse. Der Niederschlag wird durch zwei Strukturen vollständig beschrieben: die äußere und die innere. Die äußere Struktur ist die Abfolge von unabhängigen Regenereignissen, die durch Nass- und Trockenperioden sowie die Gesamtregenmenge innerhalb der Nassperiode beschrieben werden. Die innere Struktur dagegen beschreibt die zeitliche Verteilung der Gesamtregenmenge innerhalb der Nassperiode (Abb. 1). Die Niederschlagsereignisse werden aus einer kontinuierlichen Zeitreihe abgeleitet. Es werden Schwellenwerte zur Definition der Ereignisse festgelegt. Marginale Ereignisse werden zunächst ausgeschlossen, jedoch nach Generierung der äußeren Struktur über ein Random-Resampling aus den Beobachtungen wieder hinzugefügt.

Für die äußere Struktur werden Kappa-Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die Ereignischarakteristika Nassdauer (WSD), Trockendauer (DSD) und Ereignisvolumen (WSA) angepasst.

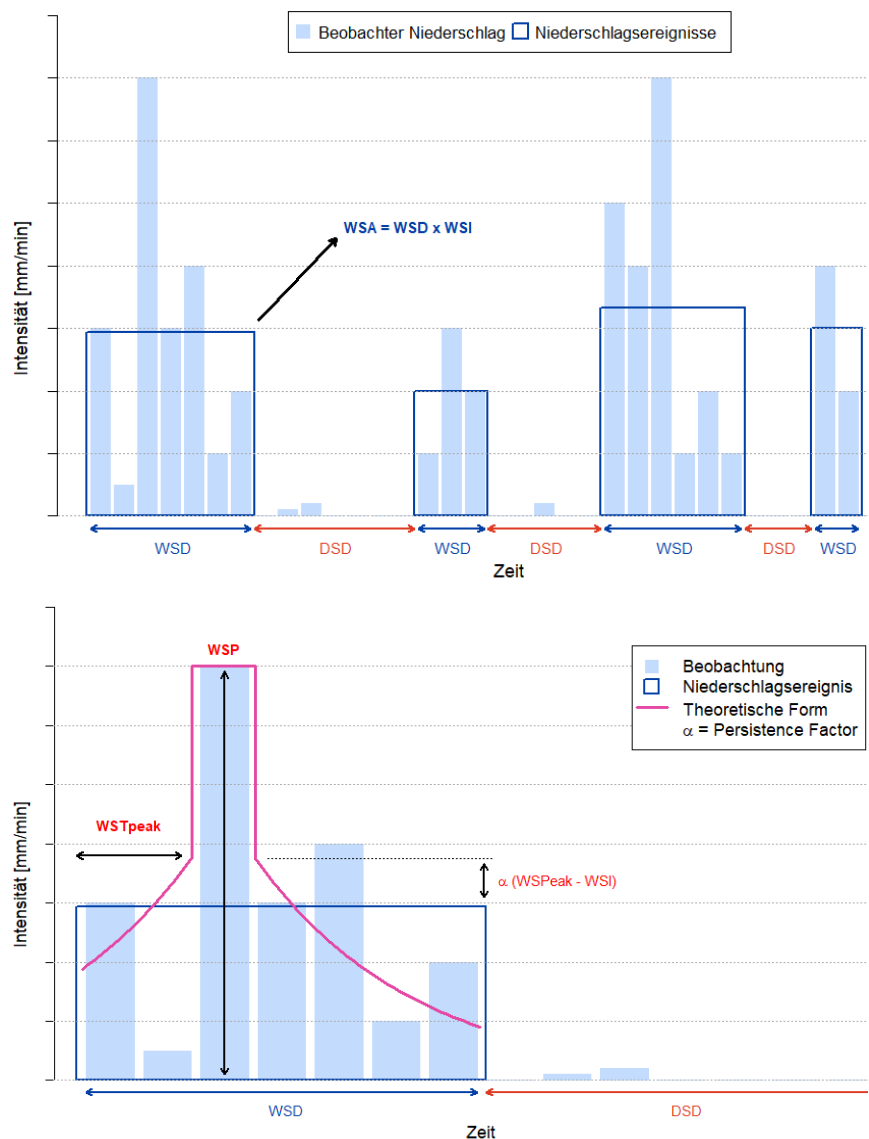


Abbildung 1

Äußere Struktur (oberes Bild) und innere Struktur (unteres Bild) des Niederschlagsprozesses im WAWI-Niederschlagsmodell.
External structure (upper panel) and internal structure (lower panel) of precipitation process for the WAWI precipitation model.

Abhängigkeiten zwischen WSD und WSA werden über empirische Copulas berücksichtigt. Für die innere Struktur werden die Ereignisse in 5-Minuten-Intervalle zerlegt. Die Ereignisspitze (WSPeak) wird aus einer Normalverteilung bedingt an die mittlere Intensität (WSI) über eine Normal-Copula geschätzt. Der Eintrittszeitpunkt der Intensitätsspitze (WSTpeak) wird aus einer Gleichverteilung gezogen, und es wird ein exponentiell abnehmender Verlauf um die Spitze angenommen. Die Modellparameter werden getrennt für Sommer und Winter auf Basis der L-Momente bestimmt.

Die Regionalisierung des Modells auf ein Raster von 1 km x 1 km für Deutschland erfolgt mithilfe von External-Drift-Kriging der L-Momente für die Ereignisvariablen unter Nutzung von Gebiets- und mittleren Klimaeinflussgrößen wie z. B. Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Ortskoordinaten, Höhenlage u. a. (HABERLANDT et al., 2010).

3.1.2 Nicht-parametrisches Modell der Universität Stuttgart (LHG)

Das Modell der Universität Stuttgart (LHG) ist ein nicht-parametrisches Modell, welches im Kern auf Simulated Annealing, einer diskreten nicht-linearen Optimierung beruht (BÁRDOSY, 1998) und bereits als NiedSim-Verfahren bekannt ist (MÜLLER et al., 2018). Der Niederschlag wird in dieser Version ebenfalls nur für Einzelpunkte erzeugt. Die Abbildung 2 schematisiert den Programmablauf dieses Modells. Zunächst werden relevante Niederschlagscharakteristika wie Jahressummen, Monatssummen, Extremwerte, Autokorrelation usw. aus Stationsdaten abgeleitet und mit External-Drift-Kriging auf ein Raster von 1 km x 1 km interpoliert (2.1 Erstellung Datenbank). Dann erfolgt für jeden relevanten Punkt eine Generierung von zeitlich ungeordneten Stundenwerten aus empirischen Verteilungsfunktionen (2.2 A Verteilung). Die zufälligen stündlichen Verteilungen werden nun mithilfe von Simulated Annealing so optimiert, dass Autokorrelation, Clusterung und andere wesentliche Charakteristika aufgeprägt werden (2.2 B Struktur). Im nächsten Schritt werden die Stundenwerte wiederum mit Simulated Annealing in 5-Minuten-Werte zeitlich disaggregiert (2.3). Abschließend werden die simulierten Niederschlagswerte anhand vorgegebener Starkregenstatistiken weiter optimiert (2.4). Die Regionalisierung des Modells ist a priori über den ersten Schritt der Bereitstellung der Niederschlagscharakteristika flächendeckend auf einem Raster bereits erfolgt.

Für weitere Details wird auf MÜLLER et al. (2018) und HABERLANDT et al. (2020) verwiesen.

3.2 Niederschlag-Abfluss-Modelle

Zur objektiven Überprüfung der synthetischen Niederschläge wurden neben der niederschlagsseitigen Validierung Kanalnetzrechnungen entsprechend der Schritte 4 und 5 (Kap. 2) durchgeführt. Es wird grundsätzlich zwischen hydrodynamischen und hydrologischen Kanalnetzmodellen unterschieden. Erstere werden mit dem Ziel eingesetzt, die hydraulische Leis-

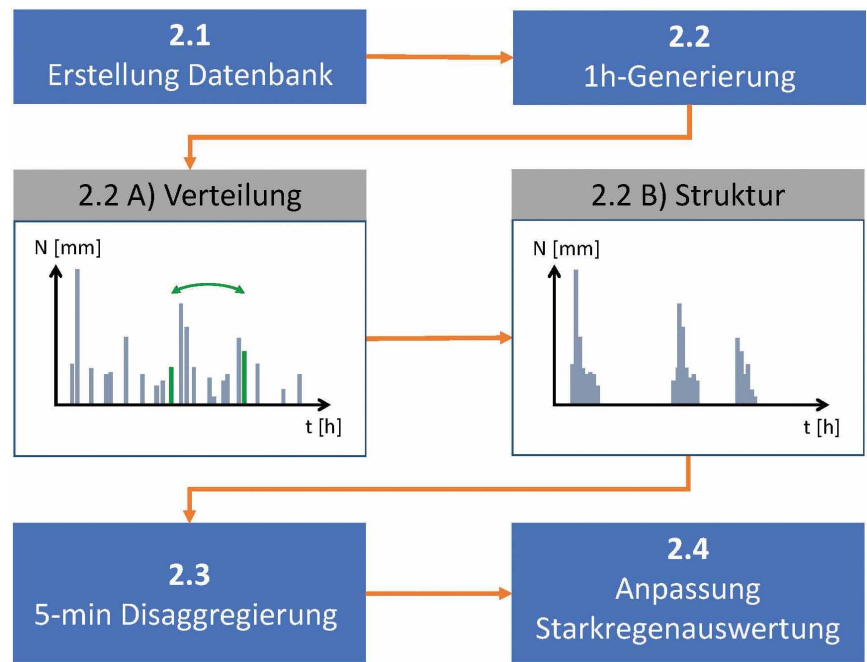


Abbildung 2

Schematische Übersicht zum Programmablauf im LHG-Niederschlagsmodell.
Scheme of the procedures in the LHG precipitation model.

tungsfähigkeit von Entwässerungssystemen nachzuweisen, das heißt die Haltungsquerschnitte zu dimensionieren. Letztere werden verwendet, um das langzeitliche Entlastungsverhalten von Regen- und Mischwasserbauwerken zu bilanzieren und Schmutzfracht-Berechnungen zu ermöglichen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden die hydrodynamischen Modelle HYSTEN EXTRAN (ITWH, 2018a) und ++SYSTEMS (Tandler.com, 2018) verwendet. Für die Schmutzfracht-Berechnungen wurde das hydrologische Modell KOSIM (ITWH, 2018b) genutzt.

Die Kanalnetzrechnungen wurden für alle 45 Referenz- bzw. Validierungsstandorte durchgeführt. Dafür wurden zwei modelltechnische Ersatzsysteme, jeweils eins für die hydraulischen Berechnungen und eins für die Schmutzfracht-Berechnungen, entsprechend der verwendeten Simulationssoftware implementiert. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Ersatzsysteme und listen deren wesentliche Systemeigenschaften auf.

Den Ersatzsystemen liegen reale Entwässerungssysteme zugrunde. Die Auswahl der Entwässerungssysteme erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer weitgehend umfassenden Abbildung deutschlandweit typischer Systemcharakteristiken. Diese Ersatzsysteme wurden anschließend für alle Validierungsstandorte unter Berücksichtigung der lokalen Topographie und Niederschlagscharakteristik hinsichtlich ihrer relevanten Systemgrößen (angeschlossene, abflusswirksame Flächen, Speichergrößen bzw. -flächen) angepasst (HABERLANDT et al., 2020).

3.3 Niederschlagsdaten

Das betrachtete Untersuchungsgebiet ist ganz Deutschland. Als Primärdaten für die Entwicklung der Niederschlagsmodelle stehen insgesamt 950 Stationen mit einer zeitlichen Auflösung

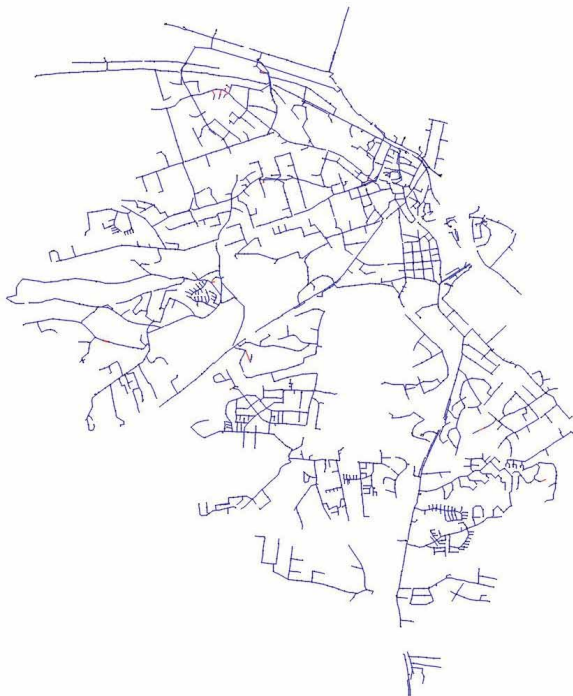
Reales System Teilnetze: 36 Kanalnetzlänge: 158 km Fließzeiten der Teilnetze: 5 min bis 90 min Abflusswirksame Flächen: 534 ha Haltungsgefälle: -9,2 % bis 42,8 % Längengewichtetes Mittel: 2,1 % Schachtsohle: 180 bis 261 m ü. NN Verschiedene Profile: Kreis-, Ei- und Drachenprofil	
Modelltechnisches Ersatzsystem Systemelemente: 8.277 Transportelemente • Haltungen: 4.148 • Pumpen: 3 • Wehre: 2 • Schachtelemente • Schächte: 4.030 • Speicherschächte: 25 • Auslässe: 69	

Abbildung 3

Synthetisches Kanalnetz für die hydraulischen Berechnungen mit HYSTEM-EXTRAN und ++SYSTEMS.
Synthetic network for hydraulic simulations using HYSTEM-EXTRAN and ++SYSTEMS.

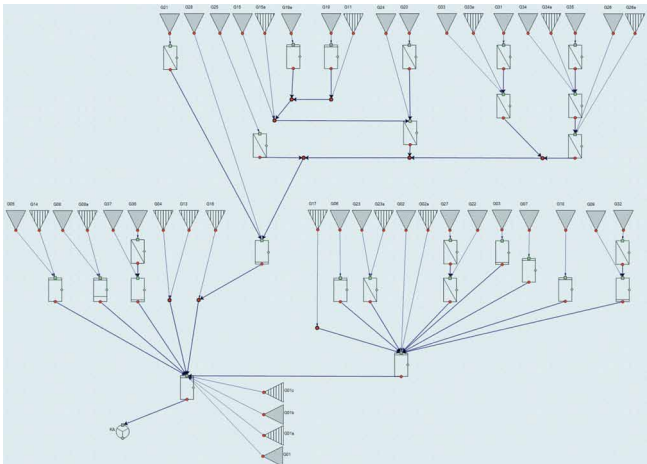
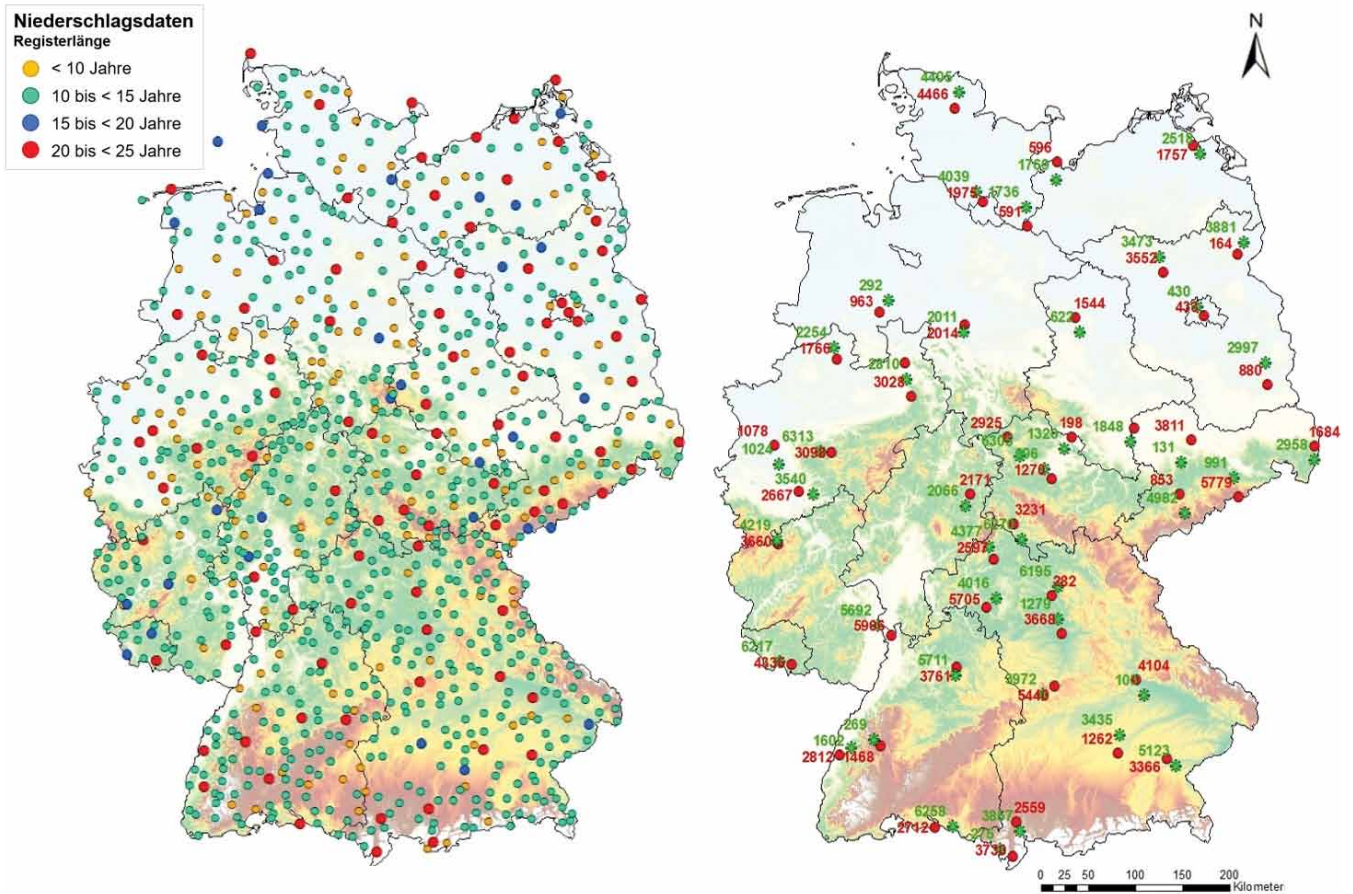
Netzelemente: • 9 Regenüberlaufbecken mit 146 m³ bis 7.208 m³ • 4 Stauraumkanäle mit 131 m³ bis 925 m³ • 10 Regenrückhaltbecken • 14 Regenüberläufe • 14 Pumpwerke • 4 Hochwasserpumpwerke • Kläranale mit 935 l/s Trockenwetterabfluss Höhenlage: 95 mNN bis 220 mNN Kanalnetzlänge: 158 km Druckleitungen: 80 km Freispiegelleitungen: 287 km Fläche: 11,6 km²	
---	--

Abbildung 4

Synthetisches Kanalnetz für die Schmutzfracht-Berechnung mit KOSIM.
Synthetic network for pollution load simulations using KOSIM.

von 1 Minute mit unterschiedlichen Beobachtungsdauern (Abb. 5, links) und sämtliche Tagesstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung. Im LHG-Modell werden in Abhängigkeit der zu ermittelnden Niederschlagscharakteristik entweder nur die registrierenden Stationen oder zusätzlich die Tagesstationen verwendet. Dabei wird die unterschiedliche Zeitreihenlänge gewichtet berücksichtigt (MÜLLER et al., 2018).

Im WAWI-Modell werden nur registrierende Stationen mit einer Beobachtungslänge größer als 10 Jahre (803 Stationen) für die Parameterschätzung genutzt. Für die Validierung wurden ca. 5 % der verfügbaren Stationen (45 von 803) als Referenzstationen ausgewählt (Abb. 5 rechts). Entscheidungskriterien für diese Auswahl waren die Qualität und Kontinuität sowie die zeitliche Parallelität der verfügbaren Daten. Alle ausgewählten Referenz-

**Abbildung 5**

Linkes Bild: Verwendete registrierende Niederschlagsstationen des DWD. Rechtes Bild: Referenzstationen für Validierung (rot) und Praxisstationen (grün).
 Left panel: Utilised recording precipitation stations of the DWD. Right panel: reference stations for validation (red) and practice stations (green).

stationen sollten zeitlich parallel über den Zeitraum 1998 bis 2017 (20 Jahre) ohne größere Ausfallzeiträume gemessen haben. Ergänzend wurde darauf geachtet, dass die Referenzstationen möglichst repräsentativ sind unter Berücksichtigung der Lage, des Klimas, der Orographie und der Verteilung im Bundesgebiet. Diese 45 Referenzstationen wurden nicht für die Erzeugung der synthetischen Zeitreihen mit den Niederschlagsmodellen verwendet. Diese Vorgehensweise wurde konsequent für alle Validierungen (Niederschlag, Überstaunachweis und Schmutzfracht-Berechnung) angewendet.

Für das Praxisszenario (C) wird die jeweils nächstgelegene Station zum Ort der Untersuchung verwendet. Deshalb wurden außerdem die 45 zu den Referenzstationen nächstgelegenen DWD Stationen selektiert (Praxisstationen, Abb. 5 rechts). Die Entfernungen der Praxisstationen zu den Referenzstationen variiert zwischen 4 km und 26 km. Die Beobachtungsdauer ist für alle Praxisstationen größer als 10 Jahre.

4 Ergebnisse

4.1 Niederschlagsseitige Validierung

Vor ihrer Verwendung in der Kanalnetzmodellierung werden zunächst die synthetisch generierten Zeitreihen der beiden Nie-

derschlagsmodelle miteinander verglichen (Szenarios B-WAWI, B-LHG, 300 a jeweils). Außerdem wurde eine Mischzeitreihe beider Modelle evaluiert (Szenario B-MIXED, 150 a von jedem Modell). Für den Vergleich wurde eine Vielzahl von Niederschlagscharakteristiken verwendet, wobei hier nur über die in der Tabelle 1 aufgelisteten Vergleichskriterien berichtet wird (für mehr Details siehe HABERLANDT et al., 2020). Dabei kann zwischen ereignisbasierten Kriterien und Extremwertkriterien unterschieden werden. Eine möglichst adäquate Nachbildung Ersterer ist insbesondere für die Schmutzfracht-Berechnung und die gute Nachbildung Letzterer für die Kanalnetzdimensionierung relevant. Die Abbildung 6 zeigt den systematischen Fehler für die ereignisbasierten Kriterien.

Bis auf die Niederschlagsintensität, welche deutlich unterschätzt wird, liefern die stochastischen Modelle Niederschlagswerte mit vergleichbaren oder geringeren Fehlern als die aus dem Praxisszenario. Außerdem zeigt sich, dass die beiden Modelle teilweise Abweichungen in unterschiedliche Richtungen haben, welche durch Mischung der Daten kompensiert werden können. Dies betrifft zum Beispiel das Niederschlagsvolumen der Ereignisse.

Zur Evaluation der Extremwerteigenschaften wurden die Zeitreihen auf Basis partieller Serien nach DWA-A531 (2012) extrem-

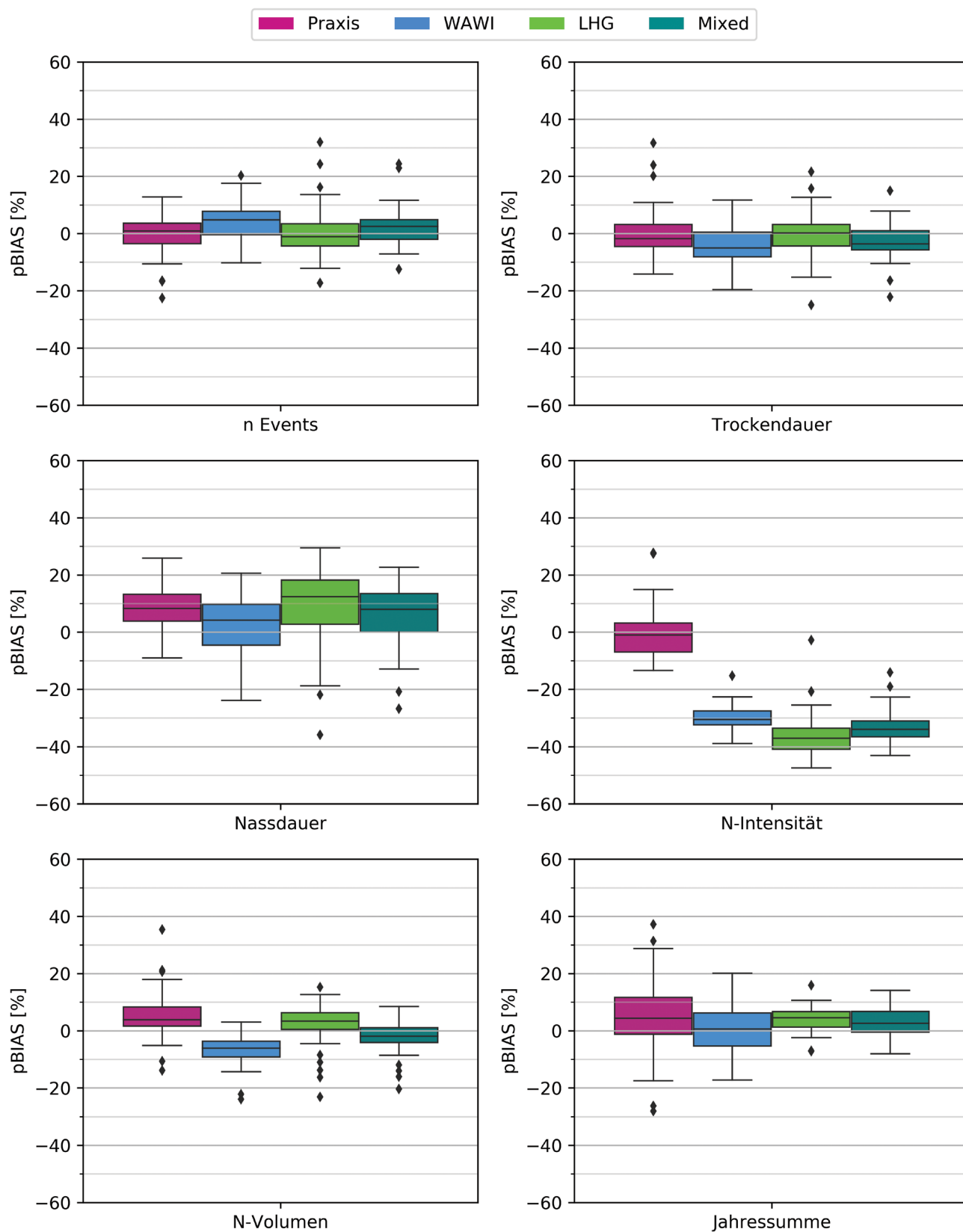


Abbildung 6

Boxplots des prozentualen systematischen Fehlers für verschiedene Ereigniskriterien und die Jahresniederschlagssumme für die Niederschlagsmodelle (Szenarien B-WAWI, B-LHG und B-MIXED) und das Praxisszenario (C) für die 45 Validierungsstationen.

Box plots for the percentage bias for different event properties and the annual rainfall for the rainfall models (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) and the practice scenario (C) for the 45 validation stations.

Tabelle 2

Mittlerer relativer Standardfehler (rMSE) der geschätzten Starkniederschläge für verschiedene Dauerstufen und Wiederkehrzeiten für das Praxisszenario (C) und die synthetischen Zeitreihen (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) für die 45 Validierungsstationen. Die jeweils geringsten Fehler pro Dauerstufe und Wiederkehrintervall sind grau hervorgehoben.

Mean relative standard error of the estimated heavy precipitation for different durations and return periods for the practical scenario (C) and the synthetic time series (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) for the 45 validation stations. The smallest error for each duration and return period is highlighted in grey.

rRMSE [-]		Dauer [min]	5	15	30	60	180
Wiederkehrzeit [Jahre]	2	Praxis	0,15	0,18	0,18	0,18	0,17
		WAWI	0,14	0,18	0,16	0,15	0,12
		LHG	0,12	0,12	0,12	0,12	0,09
		Mixed	0,12	0,13	0,11	0,12	0,09
	5	Praxis	0,19	0,23	0,23	0,26	0,23
		WAWI	0,12	0,19	0,18	0,16	0,16
		LHG	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
		Mixed	0,10	0,14	0,14	0,14	0,13
	10	Praxis	0,20	0,25	0,23	0,28	0,26
		WAWI	0,14	0,17	0,19	0,18	0,19
		LHG	0,14	0,15	0,19	0,20	0,18
		Mixed	0,12	0,15	0,18	0,18	0,16
	20	Praxis	0,27	0,33	0,37	0,36	0,39
		WAWI	0,18	0,18	0,21	0,21	0,28
		LHG	0,18	0,19	0,22	0,20	0,21
		Mixed	0,16	0,18	0,21	0,19	0,21

wertstatistisch analysiert. Die Ergebnisse hinsichtlich der relativen Standardfehler rRMSE sind in Tabelle 2 dargestellt. Beide Modelle (B-WAWI und B-LHG) liefern in der Regel kleinere Fehler als das Praxisszenario (C), wobei das LHG-Modell hier besser als das WAWI-Modell abschneidet. Eine Kombination der Daten aus beiden Modellen ist hier besonders vorteilhaft und liefert teilweise kleinere Fehler als jedes einzelne Modell für sich. Dies könnte mit einer besseren Anpassung der Verteilungsfunktionen an die Mischdaten erklärt werden.

Abbildung 7 zeigt ergänzend einen Vergleich des systematischen Fehlers zwischen Praxisszenario (C) und Mischszenario (B-MIXED) dieser extremwertstatistischen Auswertung. Die Fehlerspannweite für das Mischszenario ist immer kleiner als die des Praxisszenarios. Für kurze Dauerstufen (bis $D = 30$ min) zeigt sich eine leichte Unterschätzung der Extremwerte durch die Niederschlagsmodelle, für längere Dauerstufen verschwindet diese jedoch.

Zusammenfassend kann aus der niederschlagsseitigen Validierung geschlossen werden, dass beide Niederschlagsmodelle gute Ergebnisse hinsichtlich der Nachbildung der Niederschlagscharakteristiken erzielen. Bei der Gegenüberstellung der synthetisch generierten Zeitreihen mit den beobachteten des Praxisszenarios erreichen die Niederschlagsmodelle größtenteils vergleichbare oder bessere Ergebnisse. Vor allem bei der Abbildung der Extremwerte, die für die Kanalnetzmodellierung von besonderer Bedeutung sind, zeigen die synthetischen Reihen durchweg geringere Abweichungen bei einer kleineren Streubreite. Das Mischszenario, welches Daten beider Niederschlagsmodelle verwendet, schneidet insgesamt am besten ab. Eine abschließende Beurteilung hinsichtlich der Güte der gemischten synthetischen Niederschlagszeitreihen ist

nur mittels urbanhydrologischer Modellierung an den 45 Referenzstationen möglich (Kap. 4.2).

4.2 Abflusssseitige Validierung

Für die abflusssseitige Validierung wurden wiederum die 45 Validierungsstandorte verwendet. Es wurden hydrodynamische und Schmutzfracht-Berechnungen für alle Szenarien anhand der Ersatznetze durchgeführt. Die Schmutzfracht-Berechnungen erfolgten einheitlich mit dem hydrologischen Modell KOSIM. Die hydrodynamischen Berechnungen erfolgten für 30 Standorte mit dem Modell HYSTEM-EXTRAN und für 15 Standorte mit dem Modell ++SYSTEMS separat durch zwei Expertenteams, um die Unabhängigkeit der Validierung vom verwendeten, abflusssseitigen Modell zu unterstreichen. Die zwei unterschiedlichen Modelle wurden entsprechend der jeweiligen Expertise verwendet. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde vorab an ausgewählten Standorten nachgewiesen, dass die Modelle sehr ähnliche Resultate liefern. Bei dem Überstaunachweis erfolgt eine Auswertung der Zielgrößen für jeden Schacht separat und wird anschließend mithilfe der Zielkriterien über alle Schächte ausgewertet. Bei der Schmutzfracht-Berechnung werden für jedes Entlastungsbauwerk die mittleren Jahresergebnisse betrachtet und mithilfe der Zielkriterien analysiert.

4.2.1 Anwendungsbereich Überstaunachweis

Die Ergebnisse für den Anwendungsbereich Überstaunachweis sind für die Zielgröße Überstauwiederkehrzeit in der Abbildung 8 dargestellt. Für die Überstauwiederkehrzeit liefert das Mischszenario (B-MIXED) insgesamt das beste Ergebnis. Für das Gütemaß PERC sind die größten Übereinstimmungen mit dem Vertrauensbereich der Referenzzeitreihe festzustellen; der RMSE zeigt parallel für alle Szenarien die geringsten Fehler. Allerdings ist für den pBIAS im Median eine leichte systematische Über-

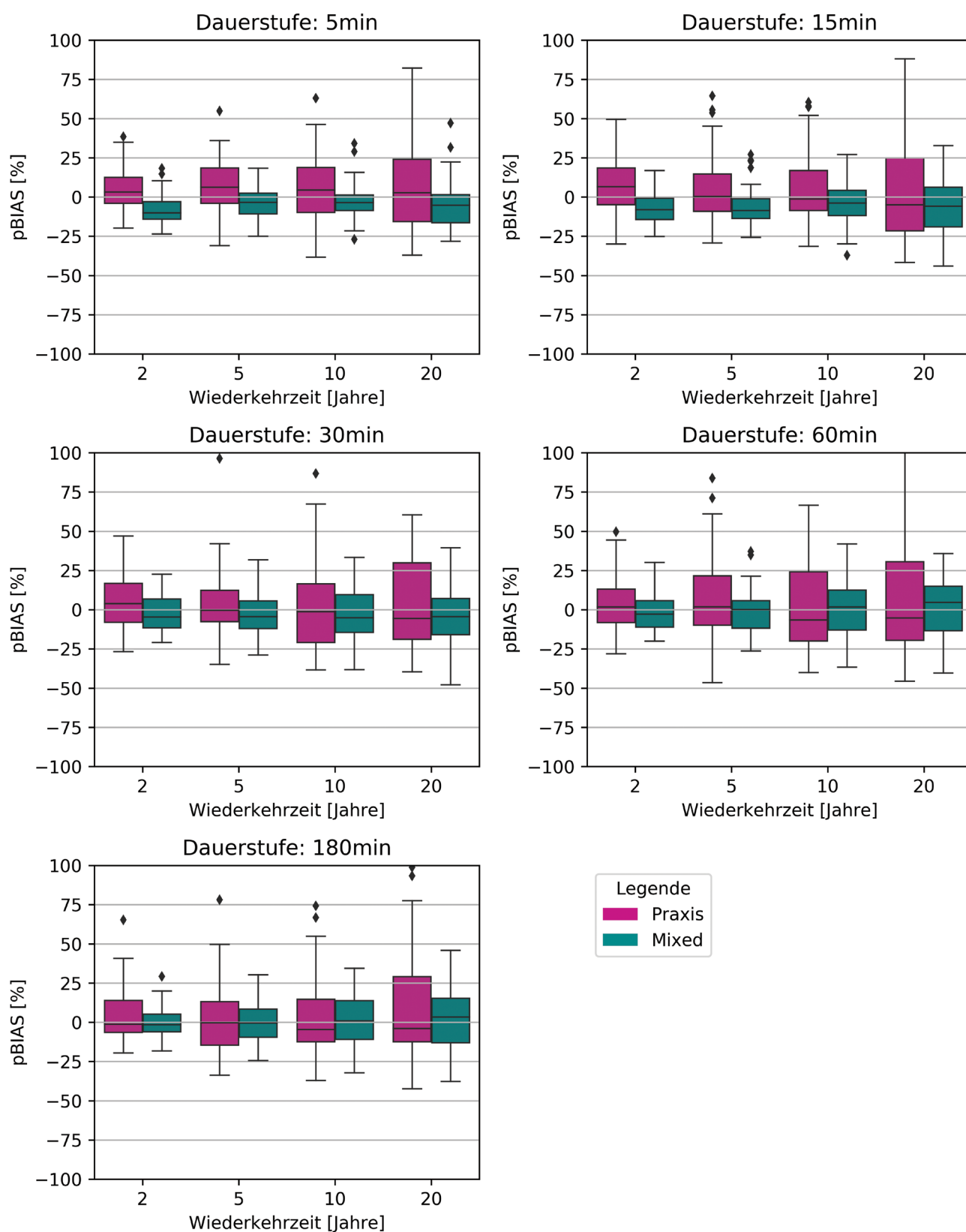
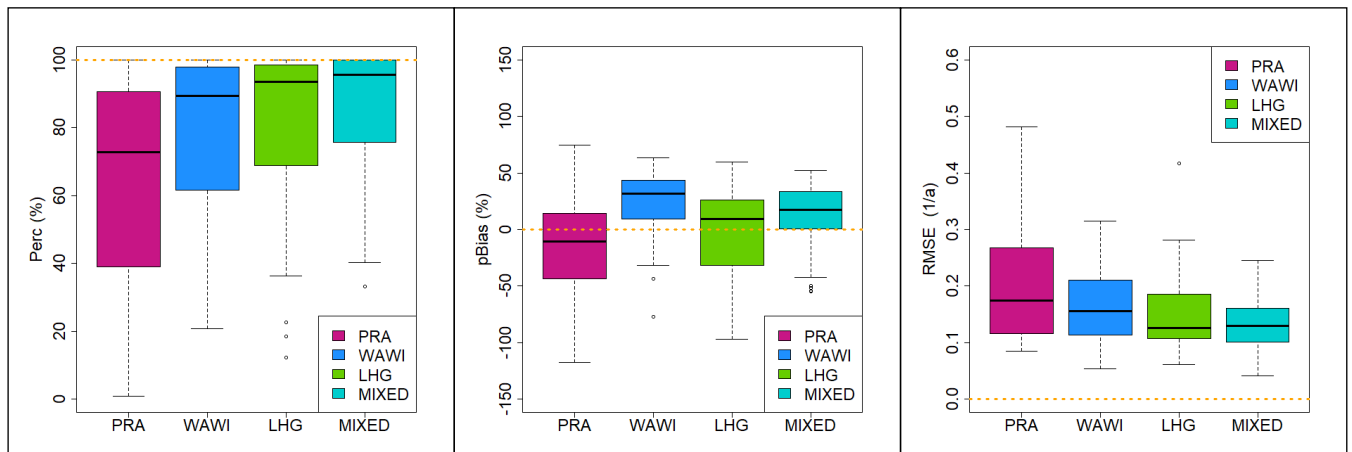


Abbildung 7

Boxplots des prozentualen systematischen Fehlers der geschätzten Starkniederschläge für verschiedene Dauerstufen und Wiederkehrzeiten für das Praxisszenario (C) und das Mischszenario (B-MIXED) für die 45 Validierungsstationen.

Box plots for the percentage bias for extreme precipitation with different durations and return periods considering the practice scenario (C) and the mixed synthetic rainfall (B-MIXED) and for the 45 validation stations.

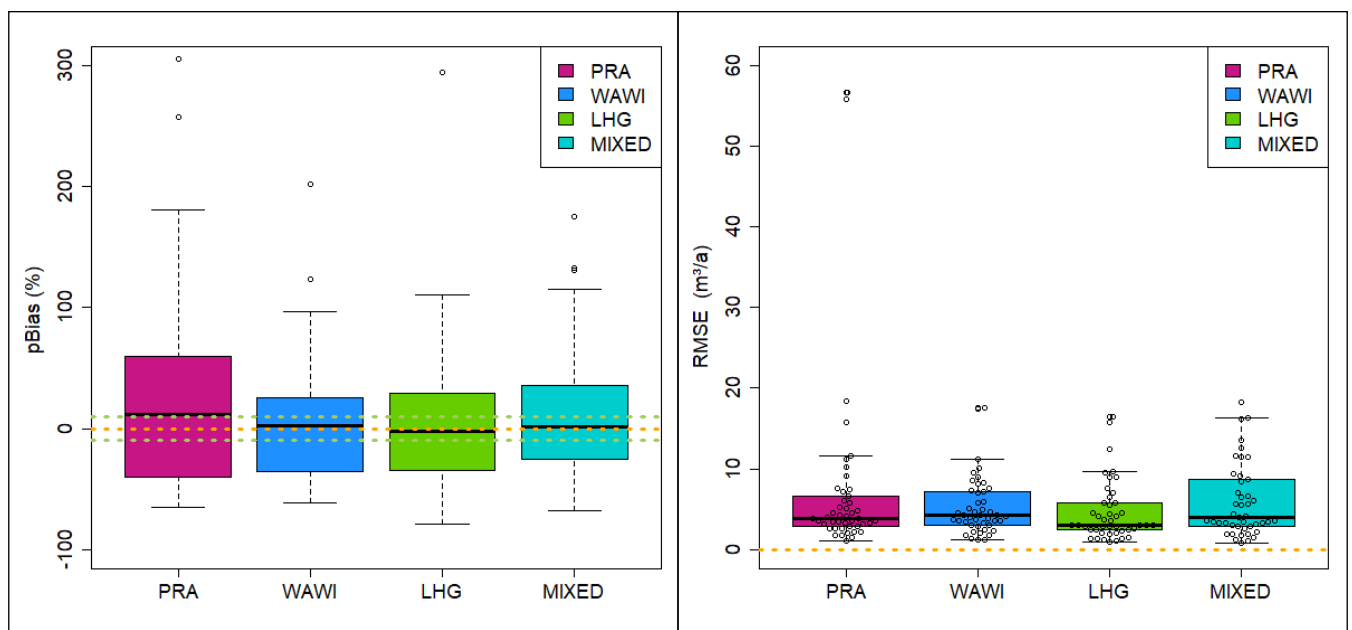
**Abbildung 8**

Boxplots für die Übereinstimmung mit dem Vertrauensbereich (PERC), des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Überstauwiederkehrzeit aus der hydrodynamischen Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the agreement with the confidence interval (PERC) as well as the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the return period of inundations from hydrodynamic simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

schätzung der Überstauwiederkehrzeit zu beobachten, was an der Unterschätzung der Niederschlagsintensität liegen könnte. Dies könnte in der Praxis zu einer leichten Unterbemessung führen, die eventuell durch einen geringen Sicherheitsaufschlag ausgeglichen werden kann. Die Bandbreite und damit extreme Fehler sind jedoch beim Mischszenario deutlich geringer als beim Praxisszenario.

Die Abbildung 9 zeigt für die hydraulische Berechnung die Simulationsergebnisse für die Zielgröße Überstauvolumen. Für den pBIAS ist für die synthetischen Zeitreihen eine zentrale Lage der Mediane ersichtlich, die nahezu bei dem 0-Wert liegt, während das Praxisszenario eine systematische Überschätzung in der Größenordnung von +10 % zeigt und die Bandbreite am größten ist. Für den RMSE zeigen die Ergebnisse der synthetischen Zeit-

**Abbildung 9**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für das Überstauvolumen aus der hydraulischen Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for inundation volume from hydraulic simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

reihen für B-WAWI und B-LHG tendenziell geringfügig bessere Werte als das Praxisszenario. Auffällig sind für das Praxisszenario zwei extreme Ausreißer. Die MIXED-Zeitreihen zeigen allerdings eine größere Streuung im Vergleich zum Praxisszenario; die Lage des Medians ist jedoch gut vergleichbar.

4.2.2 Anwendungsbereich Schmutzfracht-Berechnung

Für die Schmutzfracht-Berechnung werden in den Abbildungen 10 bis 12 Vergleiche für die Zielgrößen "jährliche Anzahl der Überläufe", "Überlaufdauer" und "Überlaufvolumen" gezeigt. Für alle drei Zielgrößen zeigen die synthetischen Reihen im Vergleich zum Referenzszenario deutlich geringere Fehler als das Praxisszenario. Außerdem zeigt sich hier der Kompensationseffekt der gemischten synthetischen Reihen, welche hier nochmal besser abschneiden als bei Verwendung von Niederschlagsdaten von jedem Niederschlagsmodell allein.

Zusammenfassend kann aus der abflussseitigen Validierung geschlossen werden, dass die gute Übereinstimmung mit den beobachteten Referenzzeitreihen (absolute Aussage) als auch die Überlegenheit gegenüber den Ergebnissen des Praxisszenarios (relative Aussage) die Eignung der synthetischen Zeitreihen für die Bemessungspraxis nachweisen. Durch die Mischung der Zeitreihen (MIXED) wird ein höheres Maß an Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Referenzzeitreihen erzielt, d. h. die Genauigkeit wird verbessert. Es ist weiterhin festzustellen, dass die Übereinstimmung der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen mit denen auf Basis der beobachteten Referenz für den Anwendungsbereich der Schmutzfracht-Berechnung generell größer ist als für den Anwendungsbereich der hydraulischen Überstaunachweisführung. Die Ursache ist im Wesentlichen auf die Ereignischarakteristik zurückzuführen; während bei

der Schmutzfracht-Berechnung die kontinuierlichen Zeitreihen maßgebend sind, die die gesamte Ereignisbandbreite enthalten, d. h. die durch häufige Ereignisse mit kleiner oder mittlerer Ereignishöhe dominiert werden, sind für den Bemessungsbereich der hydraulischen Leistungsfähigkeit seltenere intensive bzw. Starkregenereignisse mit Wiederkehrzeiten $T > 1$ Jahr maßgebend, die eine höhere Ereignisdynamik besitzen. Abschließend ist den synthetischen Zeitreihen eine höhere Robustheit gegenüber möglichen Extrema in dem Praxisszenario zu unterstellen. Durch die Synthese der Niederschlagsinformation für ein Zielgebiet aus mehreren regionalisierten Beobachtungszeitreihen werden hydrometeorologische Extreme, die z. B. in einer einzelnen Station (Praxisszenario) enthalten sein können, abgemindert bzw. ausgeglichen.

5 Mapping, Datenbereitstellung und Unsicherheitsaspekte

Zur deutschlandweiten Bereitstellung der synthetischen Daten wurden die Modellparameter vom WAWI-Modell und die Charakteristiken vom LHG-Modell auf einem Raster von 1 km x 1 km regionalisiert (Kap. 2). Die Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Regionalisierung für die Ereignisparameter des WAWI-Modells im Sommer. Ähnliche Darstellungen liegen für die weiteren Parameter und Charakteristiken vor. Diese bilden zusammen mit den beiden Niederschlagsmodellen die Basis für eine Webapplikation, mit der für jeden beliebigen Standort in Deutschland synthetische Regenreihen erzeugt und bereitgestellt werden können (<https://regen.itwh.de/>).

Neben der durchgeführten Validierung (Kap. 4.1 und 4.2) war es auch von Interesse, die Unsicherheiten räumlich zu unter-

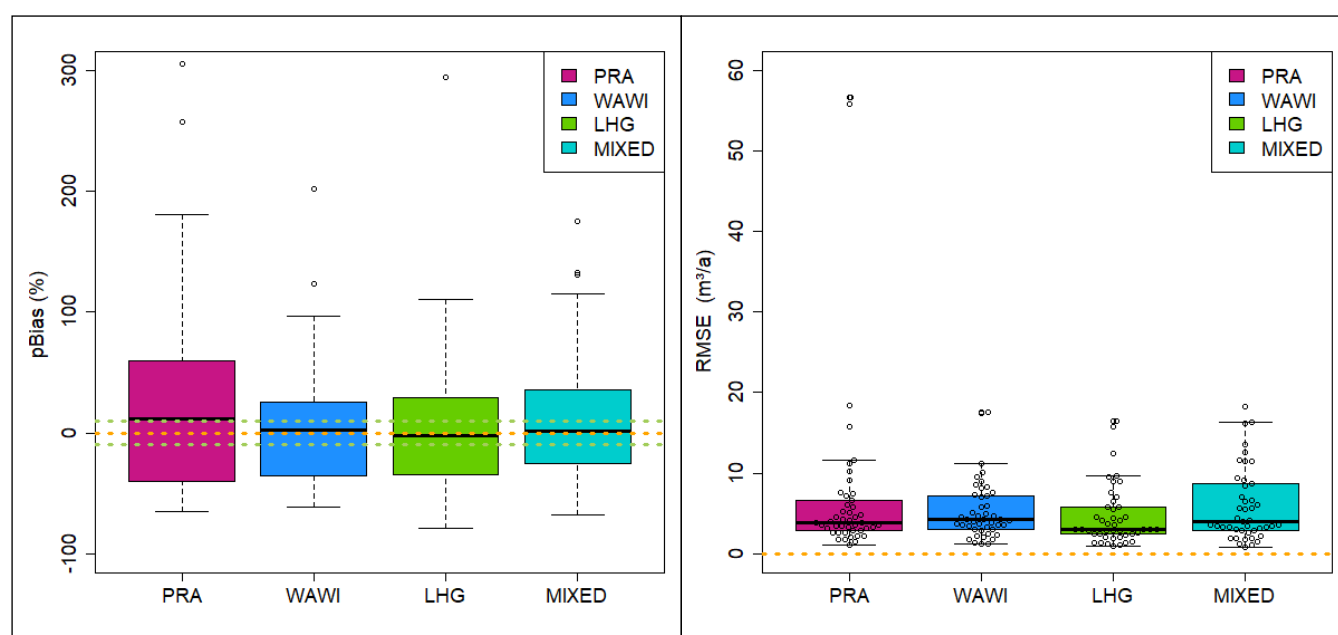
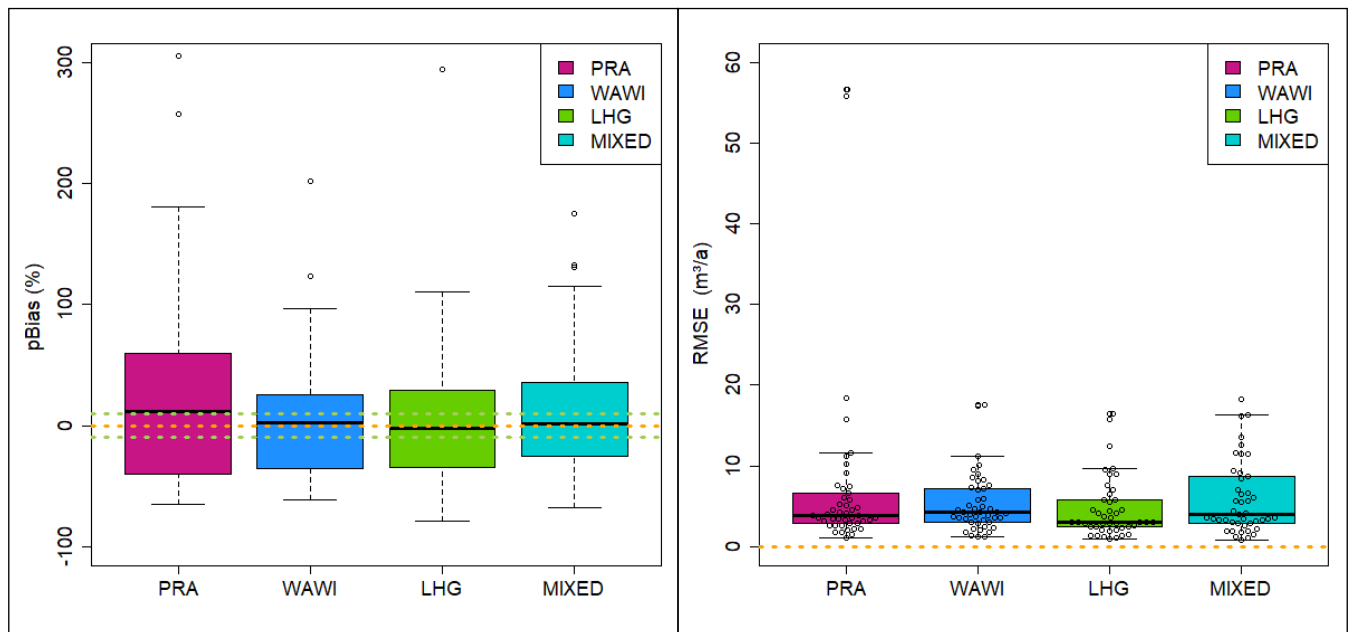


Abbildung 10

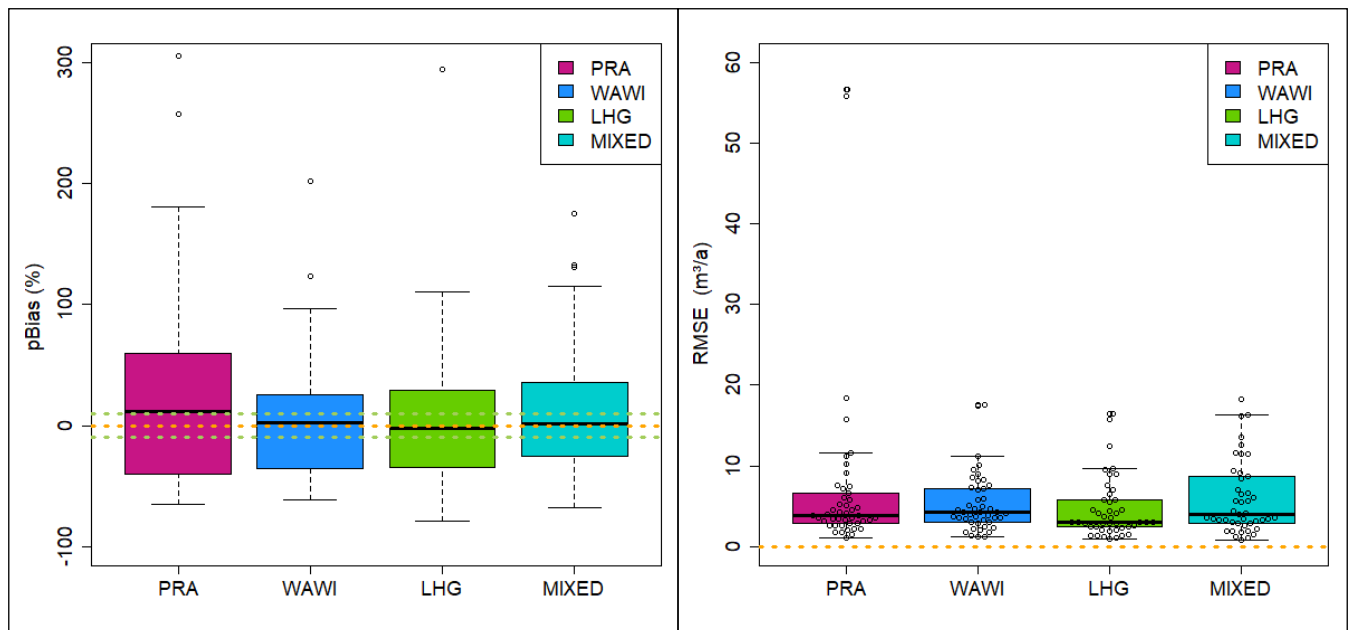
Boxplots des systematischen (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Anzahl der Überläufe (NUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the number of discharge events (NUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

**Abbildung 11**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Überlaufdauer (TUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the discharge duration (TUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

**Abbildung 12**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für das Überlaufvolumen (VQUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the discharge volume (VQUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

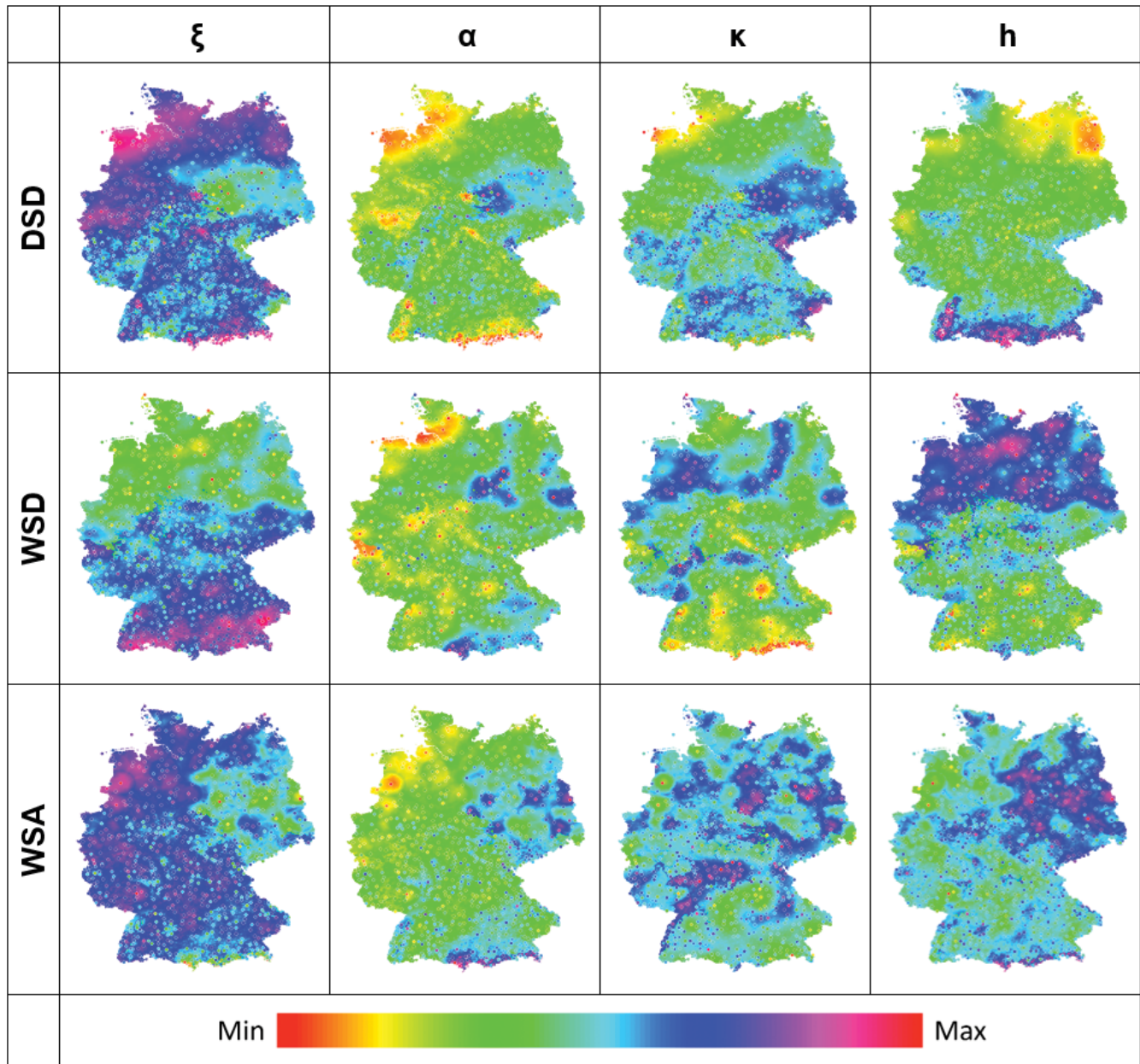


Abbildung 13

Schematische Visualisierung von regionalisierten Parametern des WAWI-Modells (Parameter der Kappaverteilung: ξ – Lage, α – Maßstab, κ, h – Form; CALLAU PODUJE & HABERLANDT, 2017) für die verschiedenen Ereignisseigenschaften im Sommer auf deutschlandweitem Raster von 1 km x 1 km und beobachtete Parameter an 803 Stationen (Punkte).

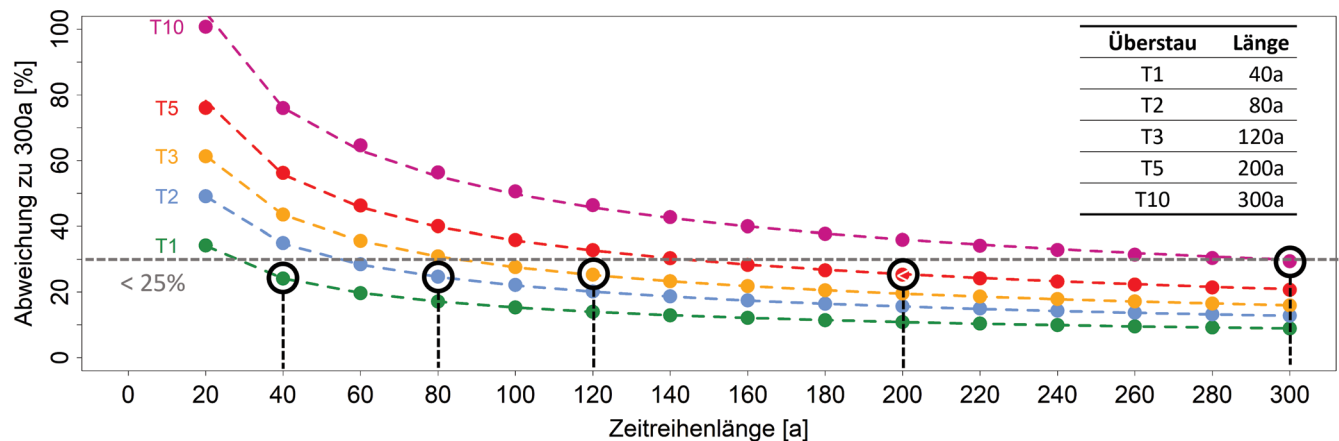
Schematic of the regionalised parameters of the WAWI model (parameters of the Kappa distribution: ξ – location, α – scale, κ, h – shape; CALLAU PODUJE & HABERLANDT, 2017) for different event characteristics in summer on a German wide 1 km x 1 km grid and observed parameters for the 803 locations (points).

suchen. Dafür wurden die Fehlerkriterien der Überstau- und der Schmutzfracht-Berechnung für alle 45 Validierungsstandorte räumlich analysiert. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass die Fehler im Raum zufällig sind. Für praktische Zwecke kann der Schätzfehler somit nur als Mittelwert der Fehler über alle Standorte abgeschätzt werden, so wie dies bereits im Kapitel 4.2 dargestellt wurde.

6 Empfehlungen zur Zeitreihenlänge

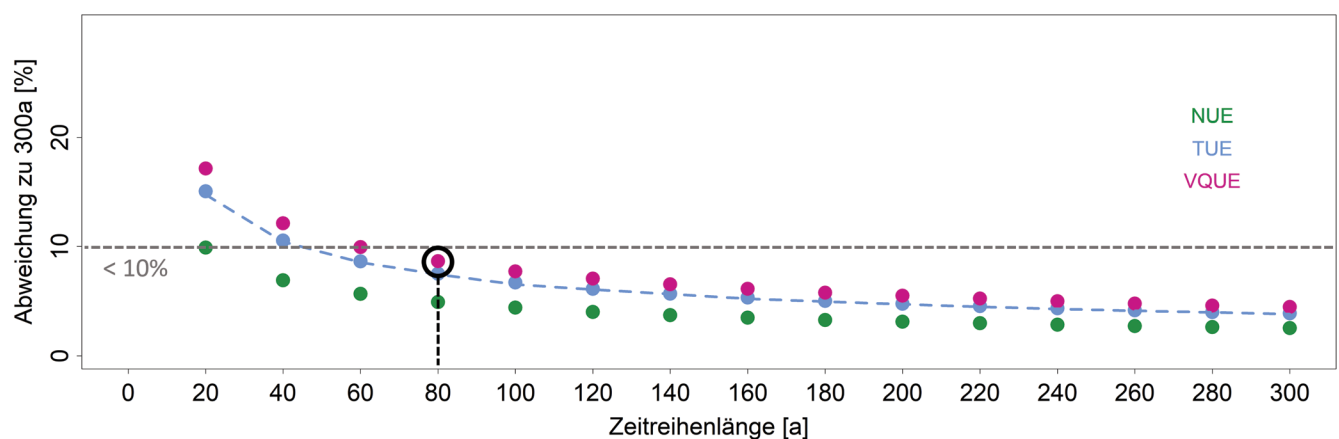
Die Ergebnisse in den Kapiteln 4.1 und 4.2 basieren auf synthetischen Regenreihen mit einer Länge von 300 Jahren, welches als

ausreichende Länge für die statistische Beurteilung der Ergebnisse angesehen wurde. Hydraulische Berechnungen für größere Kanalnetze mit diesen langen Zeitreihen sind rechenzeitintensiv. Deshalb wurde für die praktische Bemessung untersucht, welche Unsicherheit bei einer Verkürzung der Zeitreihenlänge zu erwarten ist. Dafür wurde ein Postprozessing der Simulationsergebnisse für die hydrodynamischen und Schmutzfracht-Berechnungen durchgeführt. Mit Bootstrapping wurden aus den 300-jährigen Ergebnisreihen stufenweise mit Wiederholung Stichproben, die weniger Jahre umfassen, gezogen und das Ergebnis jeweils mit dem für die 300-jährige Zeitreihe verglichen. Die Unsicherheiten, die sich daraus ergeben, sind für die Überstaunachweis-

**Abbildung 14**

Unsicherheit der hydraulischen Bemessung bei der Ermittlung der Überstauwiederkehrzeit (90%-Quantil aus 1.000 Bootstrap-Stichproben) bei Verkürzung der Zeitreihenlänge im Vergleich zur Verwendung einer 300-jährigen Zeitreihe gemittelt über alle 45 Validierungsstandorte; die gestrichelte graue Linie markiert einen Wert von 25 % Unsicherheit.

Uncertainty of hydraulic simulations for the estimation of the inundation return period (90% quantile from 1.000 bootstrap samples) for shortening the time series compared to a 300 yr series averaged over all 45 validation locations; the dashed grey line indicates 25% uncertainty.

**Abbildung 15**

Unsicherheit der Schmutzfracht-Berechnung für die Zielkriterien Anzahl der Überläufe (NUE), Überlaufdauer (TUE) und Überlaufvolumen (VQUE) (90%-Quantil aus 1.000 Bootstrap-Stichproben) bei Verkürzung der Zeitreihenlänge im Vergleich zur Verwendung einer 300-jährigen Zeitreihe gemittelt über alle 45 Validierungsstandorte; die gestrichelte graue Linie markiert einen Wert von 10 % Unsicherheit.

Uncertainty of pollution load simulations for the estimation of no of discharge events (NUE), duration of discharge (TUE) and discharge volume (VQUE) (90% quantile from 1.000 bootstrap samples) for shortening the time series compared to a 300 yr series averaged over all 45 validation locations; the grey line indicates 10 % uncertainty.

führung in Abbildung 14 und für die Schmutzfracht-Berechnung in Abbildung 15 dargestellt.

Die Unsicherheit der Überstauachweisführung ist für kurze Zeitreihen von 20 bis 30 Jahren, wie sie typischerweise Verwendung finden (Praxiszenario), sehr hoch. Sie hängt stark vom Wiederkehrintervall ab. Wenn für die rechtechnisch aufwändige Überstauachweisführung eine Unsicherheit von 25 % toleriert wird, werden z. B. für die Bemessung mit einem Wiederkehrintervall von $T = 5$ a mindestens Zeitreihen mit 200 Jahren benötigt. Bei der weniger durch einzelne Extreme beeinflussten Schmutzfracht-Berechnung hingegen ist der Fehler, der mit kürzeren Zeitreihen gemacht wird, deutlich kleiner. Toleriert man hier eine Unsicherheit von 10 %, wird empfohlen, mit einem Kontinuum von wenigstens 80 Jahren zu rechnen.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Generierung der synthetischen Regenzeitreihen in Deutschland wurden zwei Niederschlagsmodelle verwendet, die mit verschiedenen statistisch-stochastischen Ansätzen arbeiten. Sie liefern kontinuierliche Regenzeitreihen in 5-minütiger Auflösung, die die Niederschlagscharakteristiken des Zielortes wiedergeben. Die Niederschlagsmodelle wurden anhand von ca. 800 Niederschlagsstationen in Deutschland parametrisiert und flächendeckend für ein Raster von 1 km x 1 km regionalisiert. Die Validierung der Modelle erfolgte anhand von 45 Teststandorten, wofür 20-jährige Referenzzeitreihen zur Verfügung standen. Dies geschah einerseits über Niederschlagscharakteristika wie z. B. Ereignisseigenschaften, Extremwertstatistik und andererseits über Abflusscharakteristika, d. h. Überlauf- und Über-

staustatistiken, die aus der Simulation mit Kanalnetzmodellen gewonnen wurden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Niederschlagsmodelle Praxisreife erreicht haben und im Vergleich zum Referenzszenario meistens gleichwertige oder bessere Ergebnisse als ein Praxisszenario liefern. Eine Mischung der synthetischen Daten beider Niederschlagsmodelle führt durch Fehlerkompensation zu besseren Simulationsergebnissen als die Verwendung der Daten eines einzelnen Modells.

Für die wasserwirtschaftliche Praxis wurde eine Softwareplattform entwickelt, mit der nun für beliebige Standorte in Deutschland synthetische Regenreihen zur Verfügung gestellt werden können. Eine sinnvolle Weiterentwicklung der Niederschlagsmodelle für die Zukunft wäre die multivariate Niederschlagsimulation, welche eine räumliche variable Niederschlagsbelastung über einem Untersuchungsgebiet erlaubt. Als eine weitere zukünftige Untersuchung sollte die instationäre Niederschlagsimulation betrachtet werden, mit der klimabedingte Änderungen im Niederschlagsgeschehen berücksichtigt werden können.

8 Summary and Conclusions

For the generation of the synthetic rainfall time series in Germany, two stochastic precipitation models were used that work with different statistical stochastic approaches. They provide continuous rainfall time series in 5-minute resolution that reflect the precipitation characteristics of the target location. The precipitation models were parameterised using approx. 800 precipitation stations in Germany and regionalised for a grid of 1 km x 1 km. The validation of the models was carried out on the basis of 45 test sites, for which 20-year long reference time series were available. This was done on the one hand via precipitation characteristics such as event characteristics and extreme value statistics and on the other hand via runoff characteristics, i.e. overflow and surcharge statistics, which were obtained from the simulation with sewer network models. The results have shown that the precipitation models have reached practical maturity and mostly provide equivalent or better results than a practical scenario compared to the reference scenario. A mixture of the synthetic data of both precipitation models leads to better simulation results than the use of the data of a single model due to error compensation. A software platform has been developed for water management practice with which synthetic rainfall series can now be made available for any locations in Germany. A sensible further development of the precipitation models for the future would be the multivariate precipitation simulation, which allows a spatially variable precipitation load over a study area. Transient precipitation simulation should be considered as a further future investigation, with which climate-related changes in the precipitation pattern can be taken into account.

Datenverfügbarkeit

Alle Analysen basieren auf gemessenen Niederschlagsdaten, die vom DWD frei zur Verfügung gestellt werden: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html. Die entwickelten Niederschlagsmodelle selbst eignen sich aufgrund ihrer Komplexität und mangelnden Dokumentation nicht für eine Veröffentlichung. Die fünf Niederschlagsdatensätze, welche zur Validierung genutzt wurden: A) das Referenzszenario, B) die stochastischen Niederschläge von WAWI, LHG und MIXED sowie C) das Praxisszenario wurden für alle 45 Referenzstandorte auf dem Datenrepositorium des GFZ-Potsdam veröffentlicht und

sind frei verfügbar (<https://doi.org/10.5880/fidgeo.2022.018>). Für praktische Bemessungsaufgaben kann man sich synthetische Niederschlagsdaten für beliebige Standorte über die Webapplikation <https://regen.itwh.de/> gegen ein Aufwandsentgelt generieren lassen. Die verwendeten urbanhydrologischen Modelle sind kommerzielle Produkte und nicht frei verfügbar.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung zur Fortführung des Verbundvorhabens SYNOPSE II innerhalb der Fördermaßnahme "Intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (INIS)" im Rahmenprogramm "Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA". Außerdem gilt unser Dank den zwei anonymen Gutachtern, die mit ihren nützlichen Hinweisen zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt
Dr.-Ing. Anne Bartens (geb. Fangmann)
Ross Pidoto, M.Sc.
Leibniz Universität Hannover
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Appelstr. 9a
30167 Hannover
haberlandt@iww.uni-hannover.de
fangmann@iww.uni-hannover.de
pidoto@iww.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Stefan Krämer
Dr.-Ing. Lothar Fuchs
Stefanie Maßmann, Dipl.-Ing.
Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH
Engelbosteler Damm 22
30167 Hannover
s.kraemer@itwh.de
l.fuchs@itwh.de
s.massmann@itwh.de

Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Micha Eisele, M.Sc.
Dr.-Ing. Jochen Seidel
Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart
bardossy@iws.uni-stuttgart.de
eisele@iws.uni-stuttgart.de
seidel@iws.uni-stuttgart.de

Dr. Thomas Müller
WALD + CORBE Consulting GmbH
Fritz-Reuter-Straße 18
70193 Stuttgart
t.mueller@wald-corbe.de

Klaus-Jochen Sympher, Dipl.-Ing.
 Philipp Birkholz, M.Sc.
 Dr.-Ing. Pecher und Partner Ingenieurgesellschaft mbH
 Sachsendamm 93, Aufgang B
 10829 Berlin
 klaus.sympher@pecherundpartner.de
 philipp.birkholz@pecherundpartner.de

Andreas Kuchenbecker, Dipl.-Ing.
 Ole-Christian Herrmann, M.Sc.
 HAMBURG WASSER
 Billhorner Deich 2
 20539 Hamburg
 Ole-Christian.Herrmann@hamburgwasser.de
 Andreas.Kuchenbecker@hamburgwasser.de

Literaturverzeichnis

- ARNBJERG-NIELSEN, K. (2012): Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, 9(2): 57-65.
- BÁRDOSSY, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Wat. Resour. Res.*, 34(7): 1737-1744.
- CALLAU PODUJE, A.C. & U. HABERLANDT (2017): Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology*, 552: 182-197.
- COWPERTWAIT, P.S.P. (2010): A spatial-temporal point process model with a continuous distribution of storm types. *Water Resour. Res.*, 46(12): W12507.
- DWA-A118 (2006): Arbeitsblatt DWA-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A531 (2012): Arbeitsblatt: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A102 (2020) Arbeitsblatt: Regenwetterabflüsse. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- HABERLANDT, U., A. BÁRDOSSY, P. BIRKHOLZ, M. EISELE, A. FANGMANN, L. FUCHS, O.-C. HERRMANN, S. KRÄMER, A. KUCHENBECKER, S. MAßMANN, B. MORALES, R. PIDOTO, T. MÜLLER, J. SEIDEL & K. SYMPHER (2020): Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen – SYNOPSE II. Abschlussbericht im BMBF Schwerpunkt INIS. Institut für Wasserwirtschaft, Hannover.
- HABERLANDT, U., Y. HUNDECHA, M. PAHLOW & A. SCHUMANN (2011): Rainfall generators for application in flood studies. In: A. Schumann (Editor), *Flood Risk Assessment and Management*. Springer, pp. 117-147.
- ITWH (2018a): HYSTEM-EXTRAN Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.
- ITWH (2018b): KOSIM, Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftlich Hydrologie GmbH, Hannover.
- LICZNAR, P., C. DE MICHELE & W. ADAMOWSKI (2015): Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(1): 485-506.
- MÜLLER, T., T. MOSTHAF & A. BÁRDOSSY (2018): Bewertung der Eignung synthetischer NiedSim3 Niederschlagszeitreihen für Kanalnetzsimulationen unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Niederschlags. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62(4): 233-247.
- ONOF, C., R.E. CHANDLER, A. KAKOU, P. NORTHROP, H.S. WHEATER & V. ISHAM (2000): Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: A review of developments. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 14: 384-411.
- PARK, J., D. CROSS, C. ONOF, Y. CHEN & D. KIM (2021): A simple scheme to adjust Poisson cluster rectangular pulse rainfall models for improved performance at sub-hourly timescales. *Journal of Hydrology*, 598: 126296.
- TANDLER.COM (2018): ++SYSTEM Modellbeschreibung, Ges. für Umwelt-informatik mbH, Buch am Erlbach.