

# Können synthetische Niederschlagszeitreihen fehlende Niederschlagsmessungen ersetzen? – Untersuchung an drei großstädtischen Kanalnetzen

S. Krämer<sup>1)</sup>, S. Maßmann<sup>1)</sup>, N. Schmidt<sup>1)</sup>, K. Schroeder<sup>2)</sup>, K.-J. Sympher<sup>2)</sup>, S. Rohde<sup>3)</sup>, K.-I. Großkopf<sup>3)</sup>, A. Callau<sup>4)</sup>, H. Müller<sup>4)</sup>, T. Mosthaf<sup>5)</sup>, T. Müller<sup>5)</sup>, M. Lorenz<sup>6)</sup>, A. Wagner<sup>6)</sup>, S. Wagner<sup>6)</sup>, U. Haberlandt<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover

<sup>2)</sup>Dr.-Ing. Pecher und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Sachsendamm 93 | Aufgang B, 10829 Berlin

<sup>3)</sup>HAMBURG WASSER, Billhorner Deich 2, 20539 Hamburg

<sup>4)</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Appelstr. 9A, 30167 Hannover

<sup>5)</sup>Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart

<sup>6)</sup>Universität Augsburg, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie

\*Email des korrespondierenden Autors: s.kraemer@itwh.de

**Kurzfassung** Für Bemessungsaufgaben in der Stadtentwässerung werden langjährige, kontinuierlich und ortsspezifisch gemessene Niederschlagszeitreihen in hoher zeitlicher Auflösung benötigt. Deren Verfügbarkeit ist jedoch begrenzt. Eine Alternative sind synthetische Niederschlagszeitreihen die mit Hilfe von Niederschlagsmodellen generiert werden. Der Beitrag behandelt die Anwendung von synthetischen Zeitreihen, die von drei unterschiedlichen Niederschlagsmodellen für drei klimatisch unterschiedliche Gebiete erzeugt worden sind, in hydrodynamischen Niederschlag-Abflussmodellen für drei großstädtische Kanalnetze. Die abflussseitigen Ergebnisse zeigen deutlich die generelle Eignung synthetischer Niederschlagszeitreihen im Vergleich mit beobachteten Referenzzeitreihen.

**Schlagwörter:** Niederschlagsmodell, Zeitreihen, Kanalnetz, Simulation

## 1 EINLEITUNG

Kanalnetze sind das bedeutendste Anlagevermögen der Kommunen und Städte. Zentrale Werkzeuge für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen sind mathematische Simulationsmodelle, die das Niederschlag-Abflussgeschehen an der Oberfläche und im Kanalnetz detailliert abbilden (N-A-Modell). Als Belastungsgröße für die N-A-Modelle sind lange kontinuierliche und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagszeitreihen erforderlich (Tabelle 1), damit die Systeme optimal dimensioniert werden können; d. h., die Anforderungen an die Entsorgungssicherheit entsprechend der festgelegten Bemessungsziele sind unter wirtschaftlichen Aspekten zu erfüllen. Die erforderlichen, gemessenen Niederschlagszeitreihen stehen oft nur unzureichend zur Verfügung, häufig in einer zu kurzen Länge und an zu wenigen Orten. Auf Basis gemessener Niederschlagsdaten können jedoch synthetische Zeitreihen in beliebiger Länge und für unbeobachtete Orte erzeugt werden, die die örtlichen Besonderheiten des Niederschlags gut nachbilden. Im Rahmen des Forschungsprojektes "Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen" (SYNOPSE) wurden mit drei unterschiedlichen Niederschlagsmodellen synthetische Zeitreihen für drei Städte (Braunschweig, Hamburg und Freiburg) generiert und als Belastungsgröße für die zugehörigen Kanalnetzmodelle angewendet.

Tabelle 1: Empfohlene Überstauhäufigkeiten und Minstdauern der Niederschlagszeitreihen für Bemessungsziele (DWA-A 118, Tabelle 3 und Tabelle 5).

Ort	Überstauhäufigkeit	Mindestlänge d. Zeitreihe
Ländliche Gebiete	1 in 1 bis 1 in 2 Jahren	10 Jahre
Wohngebiete	1 in 3 Jahren	15 Jahre
Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete	1 in 5 Jahren	20 Jahre
Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	Seltener als 1 in 10 Jahren	50 Jahre

Die Kanalnetzmodellergebnisse unter Verwendung der synthetischen Zeitreihen werden für verschiedene Aufgabenstellungen bzw. Ziel- und Nachweisgrößen der Stadtentwässerung mit Modellergebnissen unter Verwendung ortspezifisch beobachteter Niederschlagszeitreihen verglichen, analysiert und bewertet. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Bewertung der synthetischen Zeitreihen für die hydraulische Bemessung und den Nachweis von Entwässerungssystemen gem. DWA-A 118 (2006). Die Eignung der synthetischen Zeitreihen für kontinuierliche Schmutzfrachtberechnungen wurde parallel untersucht; die Ergebnisse sind in diesem Beitrag aufgrund des begrenzten Umfangs jedoch nicht dargestellt.

## **2 DATEN UND MODELLE**

### **2.1 Niederschlagsgeneratoren für synthetische Zeitreihen**

Für die Generierung der synthetischen Regenzeitreihen wurden drei Niederschlagsmodelle entwickelt, die mit verschiedenen statistisch-stochastischen Ansätzen arbeiten. Das Ergebnis sind kontinuierliche Regenzeitreihen in 5-minütiger Auflösung, die die Niederschlagscharakteristiken des Zielortes wiedergeben.

Der Niederschlagsgenerator der Universität Stuttgart besteht aus zwei Teilen, einer Datenbank und der eigentlichen Generierung (Bárdossy, 1998). In der Datenbank sind die statistischen Eigenschaften des Niederschlags (z. B. Autokorrelation, Niederschlagsverteilung) abgelegt. Diese werden aus gemessenen Zeitreihen mehrerer Stationen berechnet und mittels Interpolation auf den Zielort übertragen. Die Generierung verläuft jahresweise in zwei Schritten. Zunächst wird eine stündliche Zeitreihe mit ortsspezifischen Niederschlagsmengen stochastisch erzeugt. Anschließend wird diese Zeitreihe auf gemessene, stündliche Niederschlagscharakteristika sowie Eigenschaften hoher zeitlicher Auflösungen optimiert.

Der Niederschlagsgenerator der Leibniz Universität Hannover basiert auf einem Alternating Renewal-Ansatz (Haberlandt et al., 2008). Der synthetische Niederschlag wird als kontinuierliche Zeitreihe über externe und interne Strukturen beschrieben. Die externe Struktur beschreibt die Aufeinanderfolge trockener und nasser Perioden sowie das Niederschlagsvolumen. Die interne Struktur beschreibt die Niederschlagsverteilung innerhalb der Nassperiode. Für die Modellierung der Variablen beider Strukturen werden Verteilungsfunktionen und Copulas genutzt. Das Modell wurde für mehrere Niederschlagsmessstationen in Niedersachsen und Baden-Württemberg aufgesetzt und für die untersuchten Städte regionalisiert. Die Regionalisierung erfolgte unter Schätzung der L-Momente mittels der Methode "Nächster Nachbar" und multilinearer Regression von Stationskoordinaten, -höhe und Niederschlagsseigenschaften.

Der Niederschlagsgenerator der Universität Augsburg basiert auf einem dynamisch-stochastischen Modell zur Erstellung hochaufgelöster synthetischer Niederschlagszeitreihen. Grundlage sind mit dem regionalen Wettermodell WRF (Skamarock et al. 2008) simulierte Niederschlagswerte in Stunden- oder Tagesauflösung (Berg et al. 2013). Nach einer Biaskorrektur werden die WRF-Niederschläge mit Hilfe von stochastischen, Copula-basierten Methoden auf 5 Minuten Intervalle disaggregiert. Auf Basis gemessener Stationsdaten in 5 Minuten-Auflösung werden eine statistische Verteilung angepasst und freie Simulationen durchgeführt (ca. 500.000 pro Monat und Standort). Aus dieser Stichprobe werden unter Verwendung definierter Fuzzy-Regeln (z. B. Niederschlagssumme von Stunden- oder Tageswerten) Zeitabschnitte für die Erzeugung der synthetischen Zeitreihen gewählt. Aufgrund der räumlichen Eingangsdaten ist zusätzlich die Generierung von räumlich und zeitlich korrelierten Niederschlagswerten möglich.

### **2.2 Niederschlagsbeobachtungen und Referenzzeitreihen**

Für den Vergleich und die Bewertung der synthetischen Zeitreihen wurden Referenzzeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten verwendet, die in den jeweiligen Stadtgebieten beobachtet worden sind. Tabelle 2 enthält eine Übersicht der Beobachtungszeiträume und des Klimacharakters. Die Niederschlagsmodelle verwenden Eingangsdaten in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung: Tages-, Stundenwerte und zeitlich hochauflösend. Die Eingangsdaten wurden durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt; dabei wurden die o. g. Referenzzeitreihen nicht als Eingangsdaten für die Niederschlagsmodelle verwendet. Zur Berücksichtigung einer großen Ereignisvariabilität wurden die synthetischen Zeitreihen für eine Gesamtlänge von bis zu 600 Jahren für jedes Stadtgebiet erzeugt. Mit Hinblick auf die statistische Vergleichbarkeit und Bewertung wurden die synthetischen Zeitreihen entsprechend der Länge der Referenzzeitreihe in Realisationen unterteilt.

Tabelle 2: Übersicht Niederschlagsdaten

	<b>Hamburg</b>	<b>Braunschweig</b>	<b>Freiburg</b>
<b>Beobachtete Niederschlagszeitreihen</b>			
Klimacharakter	maritimes Klima	maritim-kontinentales Klima	zentraleuropäisches Übergangsklima
Mittlere Jahresniederschlagshöhe	770 mm	642 mm	908 mm
Länge der Referenzzeitreihe	50 Jahre (1961 – 2010)	30 Jahre (1985 – 2014)	20 Jahre (1995 – 2014)
<b>Synthetische Niederschlagszeitreihen</b>			
WAWI (Universität Hannover)	600 Jahre (12 × 50 Jahre)	600 Jahre (20 × 30 Jahre)	600 Jahre (30 × 20 Jahre)
Eingangsdaten in 5-Minuten Auflösung	24 Stationen für Niedersachsen u. Hamburg	24 Stationen für Niedersachsen u. Hamburg	21 Stationen für Baden- Württemberg
LHG (Universität Stuttgart)	600 Jahre (12 × 50 Jahre)	600 Jahre (20 × 30 Jahre)	600 Jahre (30 × 20 Jahre)
Eingangswerte als Tages- Stundenwerte und in 5-Minuten Auflösung	24-h: 0; 60-min: 7, 5-min: 83 Stationen für Hamburg u. Niedersachsen	24-h: 0; 60-min: 7, 5-min: 83 Stationen für Hamburg u. Niedersachsen	24-h: 474, 60-min: 114, 5-min: 136 Stationen für Baden-Württemberg
IGUA (Universität Augsburg)	300 Jahre (10 × 30 Jahre)	300 Jahre (10 × 30 Jahre)	300 Jahre (10 × 30 Jahre)
Eingangsdaten in 5-Minuten Auflösung	68 Stationen für Nieder- sachsen u. Hamburg	68 Stationen für Nieder- sachsen u. Hamburg	130 Stationen für Baden-Württemberg

### 2.3 Kanalnetzmodelle

Für die Bewertung und Eignungsprüfung der synthetischen Zeitreihen wurden die drei Kanalnetze der Städte Hamburg, Braunschweig und Freiburg betrachtet, die aufgrund des Klimas unterschiedlichen Regenbelastungen ausgesetzt sind und unterschiedliche Systemeigenschaften aufweisen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht der Kanalnetze

	<b>Hamburg</b>	<b>Braunschweig</b>	<b>Freiburg</b>
Entwässerungssystemart	Mischsystem	Mischsystem	Misch- und Trennsystem
Länge [km]	1.729 (Teilsystem)	278 (Teilsystem)	794 (Gesamtsystem)
Anzahl der Schächte [-]	24.464	6.303	22.664
Angeschlossene, versiegelte Fläche [ha]	4.135	379	1.546
Höhendifferenz im Kanalnetz [m]	45	27	284
Simulationssoftware	HYSTEM-EXTRAN	++SYSTEMS	HYSTEM-EXTRAN

## 3 ERGEBNISSE

### 3.1 Ergebnisse extremwertstatistischer Niederschlagsauswertungen

Für die niederschlagsseitige Bewertung der synthetischen Zeitreihen wurden die Ergebnisse der drei Niederschlagsgeneratoren für die drei Stadtgebiete extremwertstatistisch auf Grundlage partieller Serien für verschiedene Dauerstufen ( $D = 5$  bis  $D = 360$  Minuten) gem. DWA-A 531 (2012) untersucht. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Vergleich der 30 bzw. 10 Realisationen der synthetischen Zeitreihen für Freiburg mit der ortspezifischen Referenzzeitreihe für die Dauerstufe  $D = 15$  Minuten. Ergänzend sind

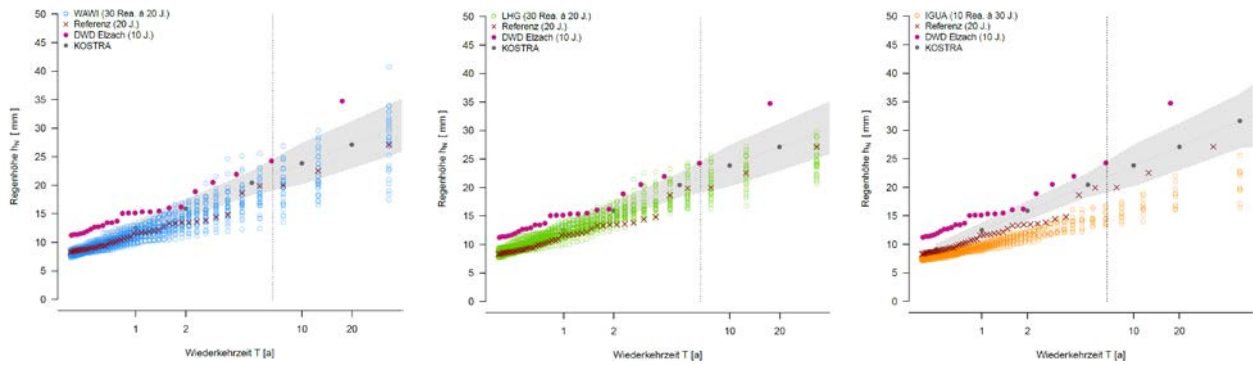


Abbildung 1: Partielle Serien der 30 Realisationen der synthetischen Zeitreihen der Dauerstufe D = 15 Minuten für den Standort Freiburg, links: WAWI, mittig: LHG, rechts: IGUA.; Abszisse: Wiederkehrzeit, Ordinate: Regenhöhe.

die unteren und oberen Grenzen nach KOSTRA DWD 2000 angegeben (grauer Bereich) sowie die Ergebnisse einer ca. 30 km entfernten DWD-Nachbarstation. Letztere sind als „Praxiszenario“ zu betrachten, wenn ortspezifische Messungen nicht vorhanden sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Realisationen der synthetischen Zeitreihen von LHG und WAWI die Ergebnisse der gemessenen Referenz gut wiedergeben. Auffällig sind die deutlichen Abweichungen der Referenzzeitreihe und der DWD-Nachbarstation von KOSTRA. Die Feststellungen gelten sowohl für alle untersuchten Dauerstufen für Freiburg als auch für die Ergebnisse für Hamburg und Braunschweig. Die synthetischen Zeitreihen von IGUA zeigen generell eine Tendenz zur Unterschätzung.

### 3.2 Abflusssseitige Ergebnisse für die Ziel- und Nachweisgröße Überstau

Die abflusssseitige Bewertung der synthetischen Zeitreihen erfolgte für die Zielgröße Überstauhäufigkeit. Abbildung 2 zeigt auf Grundlage der N-A-Simulationsergebnisse die mittlere jährliche Zahl von Ereignissen die zu Überstau im jeweiligen Stadtgebiet führen. Dargestellt sind die Ergebnisse für die synthetischen und die Referenzzeitreihe sowie die Ergebnisse benachbarter DWD-Stationen, die außerhalb der Stadtgebiete liegen (Praxis, vgl. Entfernungsangaben in Abbildung 2). Der grau markierte Bereich beschreibt die Unsicherheitsbandbreite der Simulationsergebnisse der Referenzzeitreihe auf Basis eines Bootstrapping-Verfahrens der Jahresergebnisse (90% Konfidenzintervall von 1000 Stichproben generiert durch Ziehen mit Zurücklegen). Die Box-Whisker-Plots für die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen liegen überwiegend innerhalb der grau markierten Bandbreite der Referenzzeitreihe. Die Boxen und Whisker umfassen dabei den Einzelwert der beobachteten Referenzzeitreihe mit Ausnahme von LHG für Hamburg und IGUA für Freiburg. Auffällig ist die große Ergebnisbandbreite der Referenz und der Nachbarstationen (ausgefüllter Kreis: Station mit der größten angegebenen Entfernung).

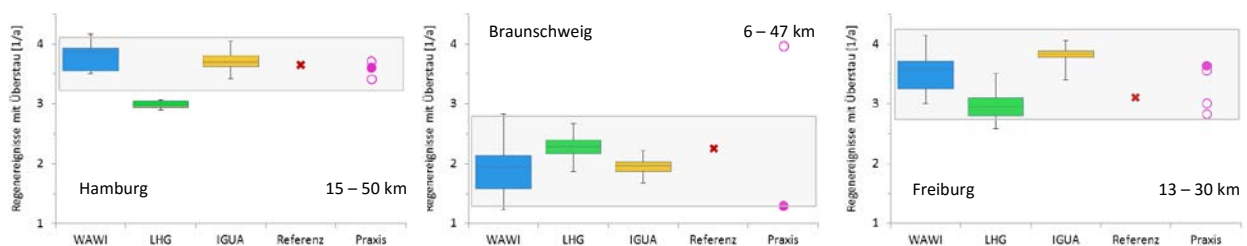
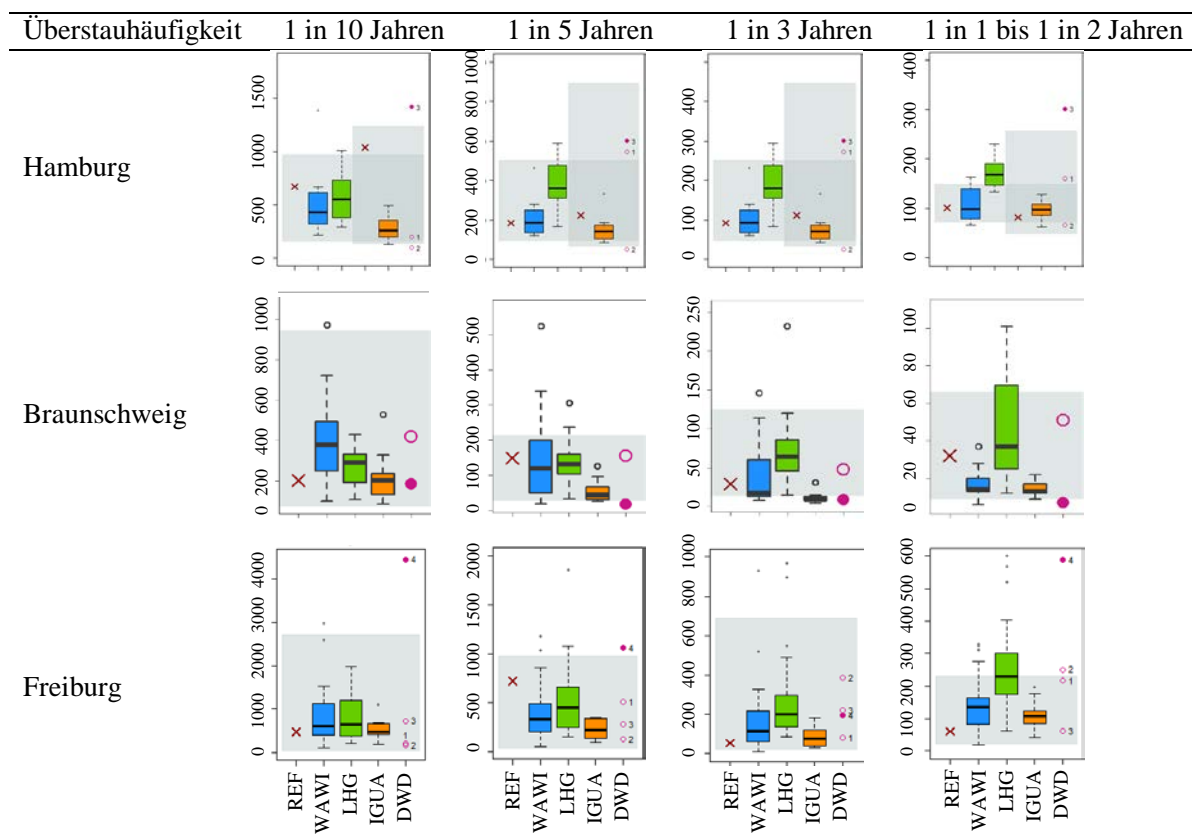


Abbildung 2: Mittlere Ereigniszahl pro Jahr mit Überstau im Stadtgebiet.

Für die detaillierte Analyse wurden die simulierten Überstauhäufigkeiten der Schächte für die verschiedenen Niederschlagsbelastungen ausgewertet und gemäß der Überstauhäufigkeitsklassen nach DWA-A 118 (vgl. Tabelle 1) klassifiziert. Analog zur Darstellung für die mittlere jährliche Ereigniszahl mit Überstau enthält die Abbildung 3 die Ergebnisse für die drei Stadtgebiete. Offensichtlich ist, dass die Ergebnisse auf Grundlage der synthetischen Zeitreihen von WAWI und LHG (blaue, grüne Boxen, Whisker) sowohl die Ergebnisse der beobachteten Referenzzeitreihe (rotes Kreuz) als auch die Bandbreite der Referenzzeitreihe unter Anwendung des Bootstrapping gut abbilden (grauer Bereich). Dies gilt auch für die unterschiedlichen Stadtgebiete bzw. Klimaregionen und für die Klassen der Überstauhäufigkeit. Die Zeitreihen von IGUA zeigen die geringsten Anzahlen und belegen die Tendenz zur Unterschätzung.

Signifikant ist die ausgeprägte Streuung der Ergebnisse der DWD-Nachbarstationen im Vergleich zur Referenz, die größer ist als die Bandbreite der synthetischen Zeitreihen.

Tabelle 4: Anzahl von Schächten nach Überstauhäufigkeit gem. DWA-A 118 für die Niederschlagsbelastungen.



## 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse belegen die Eignung synthetischer Zeitreihen als Planungsgrundlage für Bemessungsaufgaben in der Stadtentwässerung. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen ortsspezifischer Referenzmessungen; die Streubandbreite der Ergebnisse ist überwiegend kleiner als die Unsicherheitsbandbreite, die aus der Verwendung entfernt benachbarter Zeitreihen resultiert. Die verwendeten Niederschlagsmodelle haben in Abhängigkeit der Klimaregion und der Bemessungshäufigkeit eine unterschiedliche Güte im Vergleich zur Referenzzeitreihe. Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die Wahl der Niederschlagsbelastung entscheidend für die Bemessungsergebnisse ist.

## 5 REFERENZEN

- Bárdossy, A., (1998). Generating precipitation time series using simulated annealing. *Wat. Res. Research* 34(7), 1737-1744.
- Berg, P., Wagner, S., Kunstmann, H., Schädler, G. (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany: part I — validation. *Climate Dynamics*, 40(1): 401-414.
- DWA-A 118. Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2006.
- DWA-A 531. Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2012.
- Haberlandt, U., Ebner von Eschenbach, A.-D., and Buchwald, I. (2008). A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1353-1367, doi:10.5194/hess-12-1353-2008.
- KOSTRA-DWD 2000. „Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung, Deutscher Wetterdienstes, Offenbach.
- Skamarock, W.C. et al. (2008): A description of the advanced research WRF version 3. Tech. Rep. 459, NCAR, Boulder, Colorado, USA.