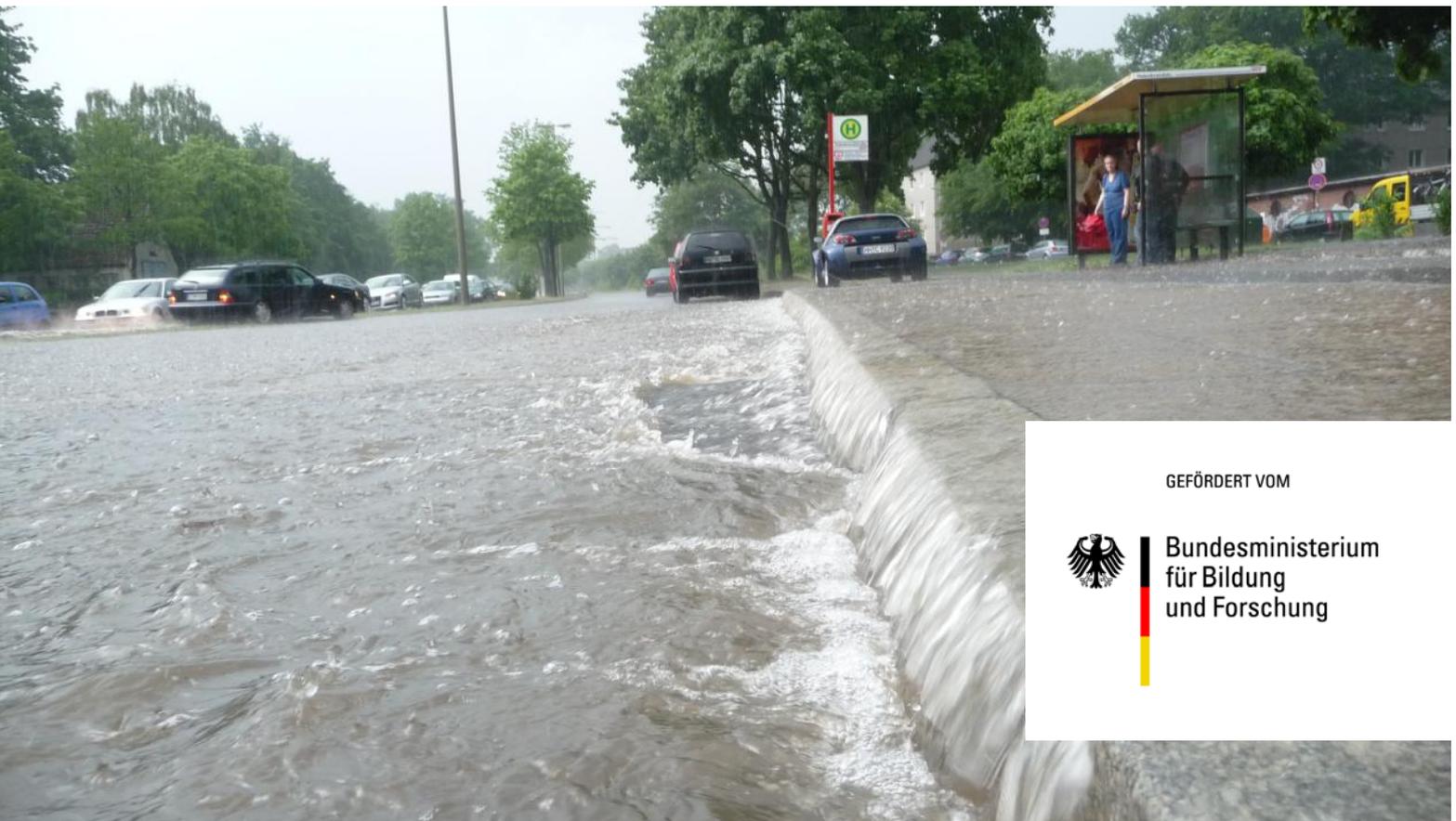


# S Y N O P S E

## Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen

INIS-Forschungsprojekt von Mai 2013 bis Oktober 2016

Universität Hannover / Universität Stuttgart / Universität Augsburg  
itwh / Pecher&Partner / Stadtentwässerung Braunschweig / HAMBURG WASSER



# Abschlussbericht

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> SYNOPSE – Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2013 – 31.10.2016
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.05.2013 – 31.10.2016

## **Projektkoordination:**

Leibniz Universität Hannover (Förderkennzeichen 033W002A)

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (WAWI)

Teilprojektleiter: Prof. U. Haberlandt

## **Projektpartner:**

Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (Förderkennzeichen 033W002B)

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG)

Teilprojektleiter: Prof. A. Bárdossy

Universität Augsburg, Institut für Geographie (Förderkennzeichen 033W002C)

Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie (IGUA)

Teilprojektleiter: Prof. H. Kunstmann

Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover (ITWH) (Förderkennzeichen 033W002D)

(mit Unterauftragnehmer Eigenbetrieb Stadtentwässerung Freiburg, ESE)

Teilprojektleiter: Dr. L. Fuchs

Dr.-Ing. Pecher und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin (PP) (Förderkennzeichen 033W002E)

Teilprojektleiter: Dipl.-Ing. K.-J. Sympher

Hamburger Stadtentwässerung (HSE) (Förderkennzeichen 033W002F)

Teilprojektleiter: M.Sc. S. Rohde

Stadtentwässerung Braunschweig (SEBS) (Förderkennzeichen 033W002G)

Teilprojektleiter: Dipl.-Ing. A. Hartmann

## Inhalt

Autoren: .....	4
1 Einleitung.....	5
1.1 Problemstellung und Ziele .....	5
2 Untersuchungsgebiete und Daten .....	8
2.1 Daten für die N-Modellierung.....	8
2.1.1 Niedersachsen .....	8
2.1.2 Baden-Württemberg.....	9
2.1.3 Klimaszenarien .....	10
2.2 Kanalnetzmodelle .....	11
2.2.1 Kanalnetze .....	11
2.2.2 Regenbelastungsszenarien .....	15
3 Niederschlagsmodellierung .....	20
3.1 Niederschlagsmodelle für Punktniederschlag.....	20
3.1.1 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI-I).....	20
3.1.2 Nicht-Parametrisches stochastisches N-Modell (LHG) .....	27
3.1.3 Dynamisch-stochastisches N-Modell (IGUA) .....	30
3.1.4 Spezielle Aspekte: Merging von Stations- und Radardaten .....	34
3.2 Räumliche Niederschlagsmodelle .....	39
3.2.1 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI).....	39
3.2.2 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI-II).....	41
3.2.3 Nicht-parametrisches stochastisches N-Modell (LHG-I und LHG-II) .....	45
3.2.4 Dynamisch-stochastisches N-Modell (IGUA) .....	46
3.3 Ergebnisse .....	50
3.3.1 Ereignisbasierter Vergleich .....	50
3.3.2 Analyse des Niederschlagskontinuums .....	55
3.3.3 Extremwertanalyse .....	58
3.3.4 Zusammenfassende Auswertung der Niederschlagscharakteristiken...	59
3.3.5 Fazit .....	62
4 Kanalnetzberechnungen.....	63
4.1 Methodik.....	63
4.1.1 Grundlagen und technisches Regelwerk .....	67
4.1.2 Ziel- und Vergleichsgrößen.....	68
4.1.3 Validierung und Bewertung.....	70

4.2	IST-Zustand.....	73
4.2.1	Braunschweig .....	73
4.2.2	Freiburg .....	75
4.2.3	Hamburg .....	76
4.3	Validierung der synthetischen Zeitreihen.....	78
4.3.1	Ergebnisse der gleichmäßigen Überregnung.....	78
4.3.2	Einfluss der Zeitreihenlänge.....	88
4.3.3	Ergebnisse der ungleichmäßige Überregnung.....	91
4.3.4	Klimabetrachtung .....	105
5	Bewertung der Ergebnisse .....	108
5.1	Eignung synthetischer Niederschlagsreihen für die Stadtentwässerung ...	108
5.2	Kosten-Nutzen-Analyse.....	111
5.3	Praxisempfehlungen und Verwertung.....	115
6	Zusammenfassung.....	117
	Literatur .....	120
7	Anhang.....	i
7.1	Validierung räumlicher bivariater Kriterien.....	i
7.2	Erläuterung der beim Vergleich der Kanalnetzrechnungsergebnisse verwendeten Vertrauensbereiche .....	ii
7.3	Ergänzende Ergebnisse der Validierung der synthetischen Zeitreihen .....	v
7.3.1	Ergebnisse aus dem Modellgebiet Hamburg-Harburg .....	v
7.3.2	Ergebnisse der ungleichmäßigen Überregnung.....	vi
7.4	Kontinuierliche Schmutzfrachtberechnungen .....	xi
7.4.1	Gleichmäßige Überregnung.....	xiii
7.4.2	Ungleichmäßige Überregnung .....	xvii
7.4.3	Klima.....	xix
7.5	Anwendungsbeispiele und Systemoptimierung .....	xxii
7.5.1	Anwendungsbeispiel Braunschweig.....	xxii
7.5.2	Anwendungsbeispiel Freiburg.....	xxv
7.5.3	Anwendungsbeispiel Hamburg .....	xxviii
7.5.4	Anwendungsbeispiel Steuerung (Freiburg).....	xxxiii

## **Autoren:**

Hannes Müller, Sven van der Heijden, Ana Callau, Christian Berndt, Thomas Müller, Tobias Mosthaf, Jochen Seidel, Andreas Wagner, Sven Wagner, Manuel Lorenz, Sophia Rohde, Kai-Immo Großkopf, Andreas Kuchenbecker, Kai Schroeder, Katharina Teuber, Stefanie Maßmann, Martin Schönfeld, Stefan Krämer, Nane Schmidt, Helge Günther

# 1 Einleitung

Mit einem Wiederbeschaffungswert in Deutschland von etwa 687 Mrd. € stellen die Kanalnetze das bedeutendste Anlagevermögen der Kommunen und Städte dar. Die optimale Planung und der Betrieb dieser Infrastruktursysteme erfordern eine adäquate Datengrundlage, welche heute in großen Teilen Deutschlands nicht gegeben ist. Für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen mittels mathematischer Simulationsmodelle werden lange, kontinuierliche und zeitlich hoch aufgelöste Reihen des Niederschlages benötigt. Beobachtungen stehen oft 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, die die örtlichen Besonderheiten des Niederschlagsverhaltens gut nachbilden. Die Erzeugung und das umfangreiche Testen solcher Reihen hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Fragen der Stadtentwässerung ist das Hauptziel dieses Forschungsvorhabens.

## 1.1 Problemstellung und Ziele

Die Aufgaben bezüglich der Entwässerungssysteme in Siedlungsgebieten haben sich von der reinen Bemessung mit geringen Wiederkehrzeiten zu ganzheitlicher Planung und Bewirtschaftung verlagert. Risikoabschätzungen und Klimawandel spielen hier ebenso eine Rolle wie ökonomische Betrachtungen über die Lebensdauer der Anlagen. Für die Beantwortung daraus erwachsender Fragestellungen sind langjährige Zeitreihen des Regengeschehens unerlässlich, um mittels Simulation der Niederschlags-Abfluss-Prozesse belastbare Aussagen bezüglich des Auftretens auch sehr extremer Abflussverhältnisse zu erhalten.

Insbesondere bei komplexeren Systemen ist die statistische Auswertung der Abflussdaten erforderlich, die aus den Niederschlag-Abfluss-Simulationen mit langjährigen Regenzeitreihen gewonnen werden, da nur so das stochastische Regengeschehen in all seinen Abfolgevarianten und seiner zeitlich-räumlichen Variabilität ausreichend berücksichtigt werden kann. Beobachtete, langjährige und zeitlich hoch aufgelöste Reihen des Regengeschehens liegen jedoch in Deutschland nur für wenige Orte und nicht flächendeckend vor. Dies führt dazu, dass intelligente

Planungskonzepte mit unsicheren oder ungeeigneten Niederschlagsdaten durchgeführt werden müssen und damit wenig wirtschaftlich und nicht nachhaltig sind. Die Verwendung synthetischer, langer Niederschlagszeitreihen als Belastung für die Simulationsmodelle kann eine gute Alternative zu den bisher verwendeten, nicht repräsentativen oder zu kurzen Beobachtungszeitreihen sein. Die DWA-AG HW1.1 „Niederschlag“ hält es deshalb für erforderlich, dass solche synthetischen, langjährigen Regenzeitreihen ebenso flächendeckend zur Verfügung stehen sollten wie statistische Regenwerte, für die seit der Einführung von KOSTRA im Jahre 1990 Planungssicherheit bei breiter Akzeptanz besteht.

Für die flächendeckende Anwendung, die Akzeptanz und die Konsistenz in Planung und Bewertung ist es erforderlich, ein einheitliches Verfahren für die Generierung von synthetischen Regenzeitreihen zu entwickeln und zu testen und dieses den Anwendern in benutzerfreundlicher Form zur Verfügung zu stellen. Mit dem Verfahren soll es möglich sein, beliebig viele Realisationen, beliebig langer Zeitreihen zu erzeugen, um diese dann als Input für Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtberechnungen in der Stadtentwässerung verwenden zu können. Für das Verfahren muss sichergestellt sein, dass die generierten Zeitreihen bezüglich aller abflussbezogenen Zielgrößen (z.B. Spitzenabflüsse und –wasserstände oder Überlaufvolumen und –frachten) zu prinzipiell den gleichen Ergebnissen führen wie bei der Simulation mit gemessenen Niederschlagszeitreihen.

Hauptgegenstand der Untersuchungen in diesem Forschungsverbund ist die Weiterentwicklung, die Testung und der Vergleich von Niederschlagsmodellen zur Erzeugung synthetischer Niederschlagsdaten für die Planung und Optimierung von Stadtentwässerungssystemen. Dabei werden speziell drei stadthydrologische Anwendungsbereiche betrachtet: 1) die Bemessung von Entwässerungssystemen bezüglich Abfluss und Überstau, 2) die Schmutzfrachtberechnung und die daraus resultierenden Bemessung von Speicheranlagen o.ä., und 3) die Einschätzung der Steuerungswürdigkeit von Entwässerungssystemen. Die synthetischen Niederschlagszeitreihen werden für aktuelles und zukünftig erwartetes Klima sowie räumlich gleichmäßige und ungleichmäßige Überregnung erzeugt und getestet.

Um synthetische Niederschlagsdaten zu erzeugen, die optimal einer multifunktionalen Bemessung im o.g. Sinne gerecht werden, ist es erforderlich,

verschiedene State-of-the-art-Ansätze der Niederschlagsmodellierung zu betrachten, weiterzuentwickeln, für die Stadthydrologie anzupassen, umfassend zu validieren und objektiv zu vergleichen. Resultierend aus den Ergebnissen soll schließlich ein geeignetes Verfahren oder Vorgehen abgeleitet werden, mit welchem konsistent für Deutschland synthetische Niederschlagsdaten erzeugt und bereitgestellt werden können.

## **2 Untersuchungsgebiete und Daten**

Die Generierung der synthetischen Niederschläge erfolgt zunächst für die Bundesländer Niedersachsen und Baden-Württemberg. Der Test der Regenreihen wird anhand der Kanalnetze der drei Modellregionen Hamburg, Braunschweig und Freiburg durchgeführt. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die im Projekt verwendete Datengrundlage.

### **2.1 Daten für die N-Modellierung**

Die Niederschlagsmodellierung basiert in erster Linie auf gemessenen Niederschlagsdaten, anhand derer die Modelle entwickelt werden. Hierzu gehören die Daten hochauflösender Niederschlagsstationen, Tageswertstationen und Niederschlagsradardaten. Es werden nicht alle Daten von allen Modellen verwendet, Einzelheiten sind in den Modellbeschreibungen in Kapitel 3 zu finden. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Daten in den beiden Bundesländern Niedersachsen und Baden-Württemberg.

Für das Downscaling-Modell der Universität Augsburg (siehe Kapitel 3.1.3) wird zudem auf Klimasimulationen aus dem Projekt CEDIM zurückgegriffen, die für Deutschland flächendeckend mit einer räumlichen Auflösung von 7 km x 7 km und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vorliegen. Auch der REGNIE-Niederschlagsdatensatz des DWD mit einer Auflösung von 1 km x 1 km wird verwendet.

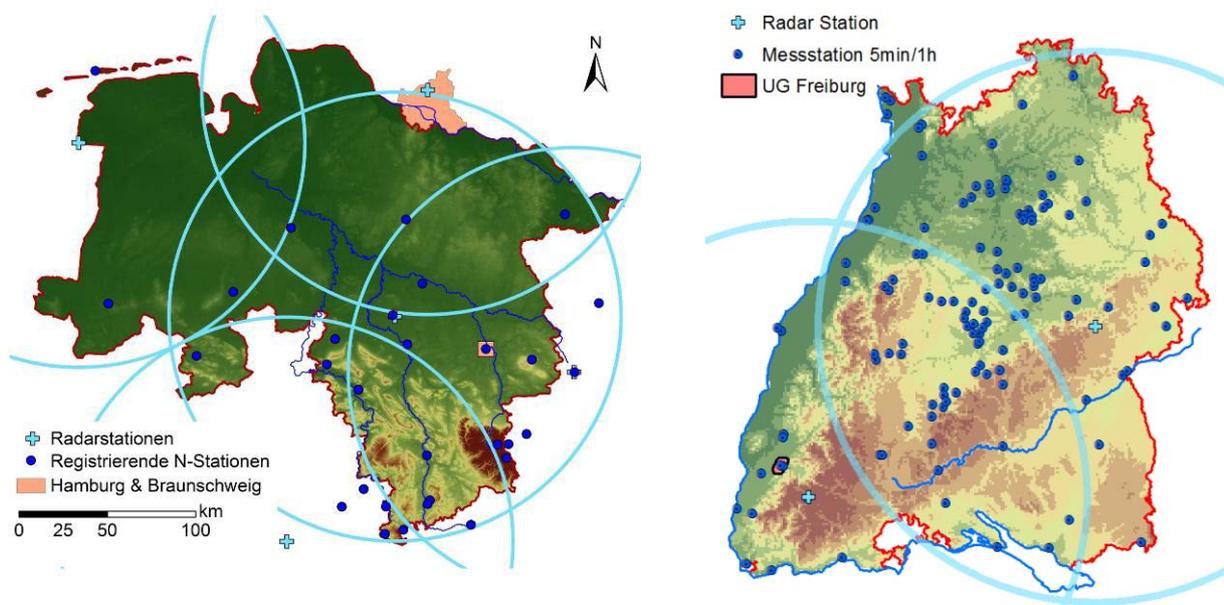
#### **2.1.1 Niedersachsen**

Für Niedersachsen stehen 82 hochauflösende (1-minütig) Niederschlagsstationen des DWD mit einer Zeitreihenlänge zwischen 6 und 20 Jahren zur Verfügung. Dazu kommen mehrere hochauflösende (5-minütig) Stationen der Praxispartner (Hamburg 14, Braunschweig 11), die jedoch nur zur Validierung verwendet werden. In Niedersachsen stehen zusätzlich 701 Tageswertstationen sowie 8 Stundenwertstationen mit sehr unterschiedlichen Start- und Endpunkten ihrer Messreihen zur Verfügung. Neben den Stationsdaten existieren noch Radardaten

von 4 Radarstandorten für eine komplette Abdeckung des Bundeslandes in 5-min-Auflösung mit Beginn im Jahr 2000.

### 2.1.2 Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg sind die Daten von 140 hochauflösenden (1-minütig) Stationen mit einer Länge zwischen einem und 18 Jahren verfügbar. Vom Praxispartner wurden für die Stadt Freiburg zusätzlich 8 Stationen für die Validierung bereitgestellt. Mit gröberer Auflösung sind 115 Stundenwert- und 474 Tageswertstationen vorhanden, auch hier mit sehr unterschiedlichen Längen und Betriebszeiträumen. Das Land Baden-Württemberg wird nahezu komplett von zwei Radarstandorten abgedeckt, deren Daten ab 2000 zur Verfügung stehen.



**Abbildung 2.1** Die Untersuchungsgebiete Niedersachsen (links) und Baden-Württemberg (rechts) mit den Modellstädten Hamburg, Braunschweig und Freiburg und die Verteilung der hochauflösenden Niederschlagsstationen (NDS: 5 min, BW: 5 min oder 1h) mit mindestens 10 Jahren Reihenlänge sowie die Radarabdeckung und Topografie beider Bundesländer.

### 2.1.3 Klimaszenarien

Die Klimaszenarien wurden mit Hilfe des Klimamodells der Universität Augsburg abgeleitet. Ausgangspunkt sind Daten des globalen Klimamodells ECHAM5, welche mit RCM auf ein quadratisches Rastergitter mit 7 km Kantenlänge und mit Tageswertauflösung skaliert wurden. Die betrachteten Zeiträume sind der Vergleichszeitraum C20 (1971 - 2000) und die nahe Zukunft (2021 - 2050).

Für die Generierung der Zeitreihen mit Klimasignal wird eine Quantil-Quantil-Transformation (Quantile-Mapping, Delta-Change-Approach) verwendet (Bárdossy u. Pegram, 2011). Hierbei werden die absoluten Niederschlagswerte der Klimaszenarien verworfen und nur der Trend zwischen Ist-Lauf und Klima-Lauf betrachtet. Die Q-Q-Transformation erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird für jede Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Quantil,  $F(x) = u$ ) ein Faktor dcf ermittelt, der die Änderung zwischen Ist und Klima-Lauf abbildet.

$$dcf(u) = \frac{F_{Klima}^{-1}(u)}{F_{Ist}^{-1}(u)}$$

Anschließend werden die 5-Minuten Werte der gemessenen (oder synthetischen) Reihe mit Hilfe der Faktoren tagesweise transformiert. Hierzu werden alle 5-Minuten Werte eines Tages mit dem gleichen Faktor dcf multipliziert (skaliert). Der Faktor wird über das Quantil der jeweiligen Tagessumme definiert. Jeder Tag wird nach folgender Formel transformiert:

$$N_5^* = N_5 * dcf(F_{Mess}(N_{24}))$$

$N_5^*$ : Niederschlagswerte eines Tages in 5 Min. Auflösung mit Klimatrend

$N_5$ : Niederschlagswerte eines Tages in 5 Min. Auflösung

$N_{24}$ : Tagessumme

$F_{Mess}(N_{24})$ : Verteilungsfunktion der gemessenen Tagessummen

Der Klimatrend wird mit der Quantil-Quantil-Transformation auf die synthetischen Zeitreihen der drei Universitäten (IGUA, IWS und WAWI), für jeweils alle Städte (Hamburg, Freiburg und Braunschweig) aufgeprägt.

## 2.2 Kanalnetzmodelle

Grundlage für die Kanalnetzberechnungen sind die Niederschlag-Abfluss-Modelle der drei Untersuchungsgebiete. Die in den Modellen abgebildeten Misch- und Regenwassernetze sind im Folgenden kurz beschrieben. Wichtigste Eingangsgröße für die Modelle sind die Regendaten. Neben den zu testenden synthetischen Niederschlagszeitreihen stehen in allen Modellgebieten langjährige Messreihen als Referenzdaten zu Verfügung. Zur Abbildung eines Praxisszenarios werden außerdem benachbarte DWD-Stationen für die Simulation verwendet. Eine Übersicht über alle gerechneten Szenarien und ihre Datengrundlagen gibt Kapitel 2.2.2.

### 2.2.1 Kanalnetze

Die Validierung der synthetischen Regendaten im Hinblick auf ihre Verwendung für die Planung und Optimierung von Stadtentwässerungssystemen erfolgt anhand ausgewählter Kanalnetzeinzugsgebiete der Städte Braunschweig, Hamburg und Freiburg. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Untersuchungsgebiete.

Tabelle 2.1 Übersicht verwendeter Kanalnetze

	Braunschweig	Freiburg	Hamburg
<b>Betreiber</b>			
<b>Klima</b>	Übergang maritim-kontinental	Zentraleuropäisches Übergangsklima	Maritim
<b>Mittlerer jährlicher Niederschlag</b>	618 mm	908 mm	770 mm
<b>Betrachtete Kanalnetze</b>	Stadtzentrum: 278 km	Stadtgebiet: 794 km	Stadtzentrum: 1.729 km Harburg: 168 km
<b>Modellierungs-Software</b>	++SYSTEMS	HYSTEM-EXTRAN und KOSIM	HYSTEM-EXTRAN

	<b>Braunschweig</b>	<b>Freiburg</b>	<b>Hamburg</b>
<b>Referenz-Niederschlagsreihe</b>	30 Jahre 1985-2014	20 Jahre 1995-2014	50 Jahre 1961-2010

### 2.2.1.1 Kanalnetz Braunschweig

Als Untersuchungsgebiet dient das Einzugsgebiet des Hauptpumpwerks Braunschweig-Ölper, über das die Innenstadt sowie Teile der angrenzenden Stadtbezirke Nordstadt, Westliches und Östliches Ringgebiet, Viewegsgarten-Bebelhof/Zuckerberg und Lehdorf entwässert werden (Abbildung 2.2). Daneben nimmt das Hauptpumpwerk auch das Schmutzwasser von den Außenbezirken im südlichen und östlichen Raum Braunschweigs auf, insgesamt wird das Schmutzwasser von rd. 220.000 Einwohnern gesammelt und zum Klärwerk Steinhof gefördert. Innenstadt sowie Westliches und Östliches Ringgebiet werden zu einem großen Teil im Mischsystem entwässert, die anderen Stadtbezirke mit sehr wenigen Ausnahmen im Trennsystem. Das Untersuchungsgebiet verfügt über eine Gesamtfläche von 2.123 ha und eine abflusswirksame Fläche von 723 ha. Das untersuchte Kanalnetz verfügt über eine Gesamtlänge von 278 km, davon 97 km Mischwasserkanäle, 36 km Schmutzwasserkanäle und 145 km Regen- und Regenüberlaufkanäle (im Modell werden nur Regen- und Schmutzwasserkanäle berücksichtigt, die einen Einfluss auf das Mischwassernetz haben). In der Innenstadt ist das Kanalnetz stark mit einem verzweigten Grabensystem vermascht, das teils offen, teils verdolt verläuft und zur Aufnahme von Regenwasserabflüssen sowie Mischwasserüberläufen dient. Insgesamt befinden sich 96 Regenüberlaufbauwerke im betrachteten Kanalnetz. Am Hauptpumpwerk Ölper liegt das einzige Regenüberlaufbecken mit einem Volumen von 6.500 m<sup>3</sup>. Als Vorflut dienen die Oker, die sich im Innenstadtbereich in zwei Umflutgräben aufteilt, sowie deren Nebengewässer.

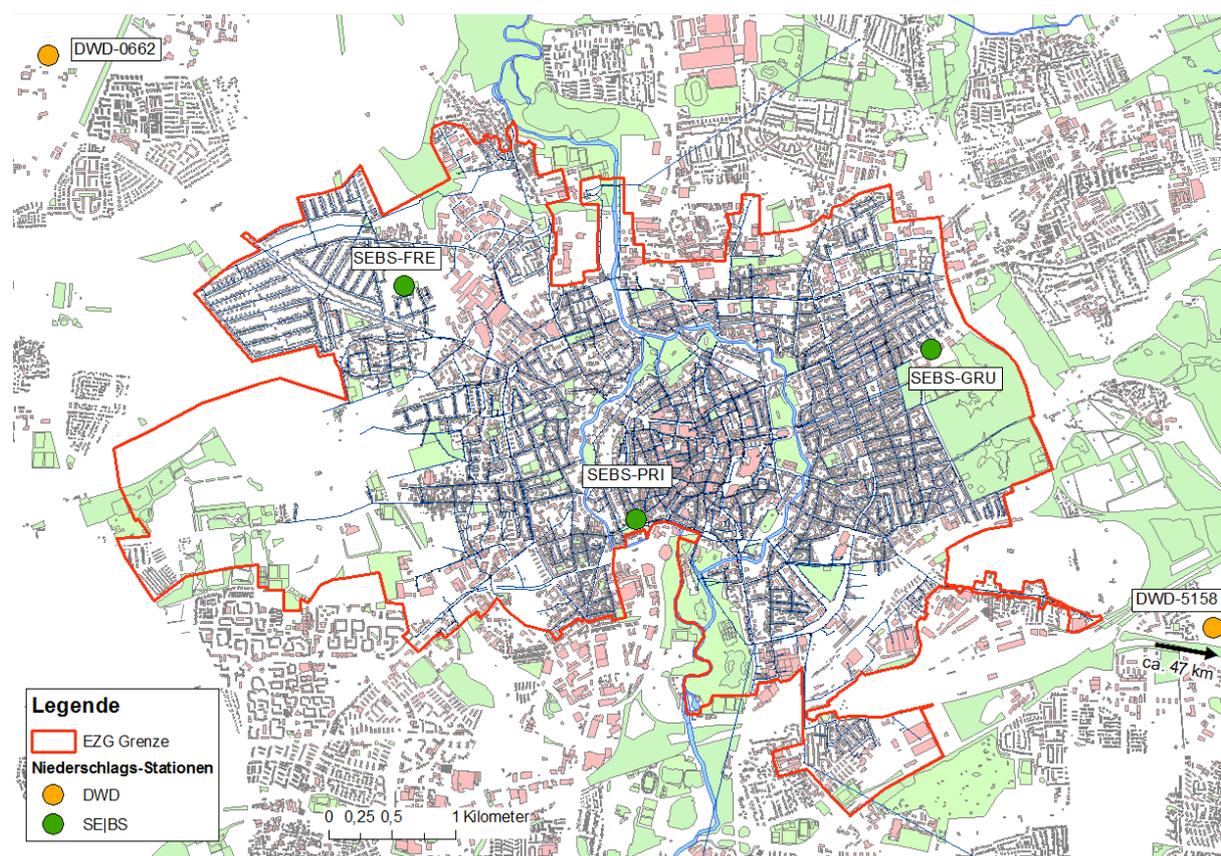
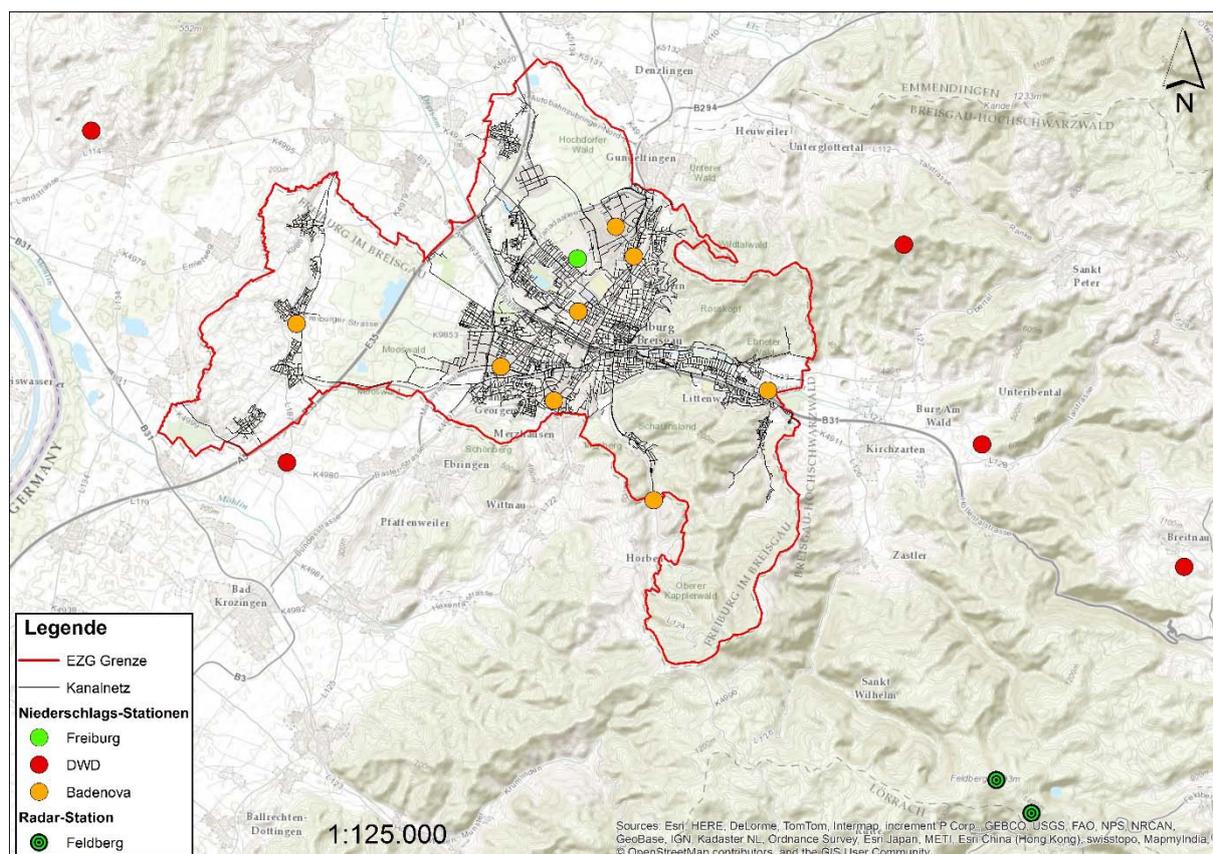


Abbildung 2.2 Untersuchungsgebiet Braunschweig mit Niederschlagsstationen

### 2.2.1.2 Kanalnetz Freiburg

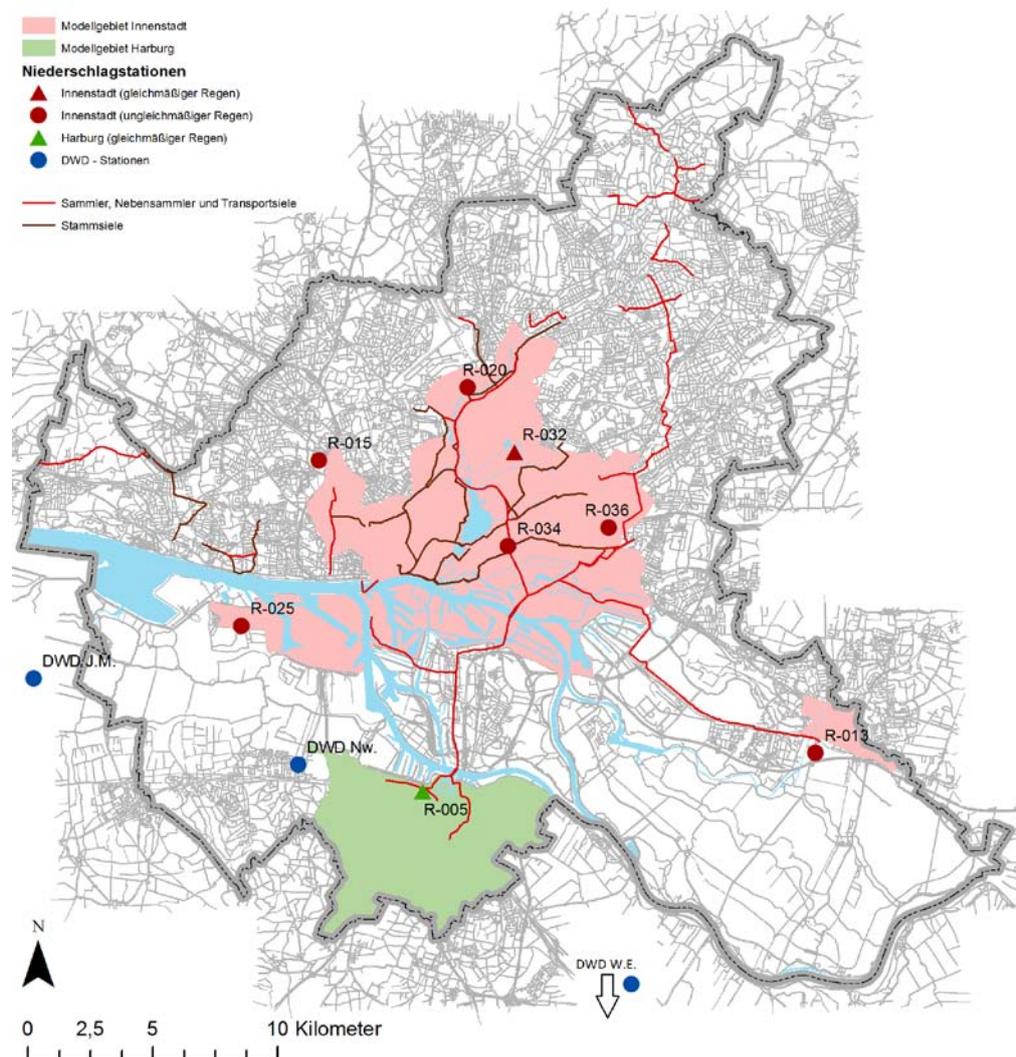
Gegenstand der Untersuchungen sind die öffentlichen Kanalisationsanlagen zur Ableitung von Abwasser innerhalb der Stadtgrenzen Freiburgs (Abbildung 2.3). Die angeschlossene Einzugsgebietsfläche umfasst 4.910 ha mit einer Zahl von 205.000 Einwohnern. Das Stadtzentrum befindet sich im Bereich des Bergvorlandes des Schwarzwaldes auf einer geringen bis mittleren Geländehöhe. Weiter südlich und östlich gelegene Stadtteile befinden sich in Tallagen, während die nördlichen und westlichen Bereiche bereits in der offenen Rheinebene liegen. Die Hauptentwässerungsrichtung des Kanalnetzes und der Vorfluter verlaufen in nordwestliche Richtung. Eine besondere Stellung nehmen die Tuniberggemeinden ein. Sie liegen im Westen, getrennt vom restlichen Stadtgebiet am Fuß des Tuniberges und entwässern über einen Transportsammler in das städtische Entwässerungssystem Freiburgs. Das Kanalnetz umfasst eine Länge von 794 km, davon 247,5 km Mischwasserkanäle, 248,5 km Schmutzwasserkanäle und 298 km Regenwasserkanäle. Die Hälfte des Kanalnetzes entwässert im Trennsystem. Die Rohrsohlen liegen zwischen 192 mNN und 719 mNN.



**Abbildung 2.3** Untersuchungsgebiet Freiburg mit Niederschlagsstationen

### 2.2.1.3 Kanalnetz Hamburg

Für die hydraulischen Vergleichssimulationen im Untersuchungsraum Hamburg wurden zwei Kanalnetzmodelle ausgewählt (Abbildung 2.4). Das Mischwassernetz entwässert mit einer Länge von 925 km die Hamburger Innenstadt und transportiert Schmutzwasser von 640.000 Einwohnern und Regenwasser von einer Fläche von 9.400 ha gemeinsam zum Klärwerksverbund Köhlbrandhöft-Dradenau. Die angeschlossenen Flächen der Innenstadt weisen im Durchschnitt einen Befestigungsgrad von 60 % auf. Der ebenfalls mischkanalisierte, im Südosten Hamburgs gelegene Stadtteil Bergedorf ist über einen 16 km langen Transportkanal mit dem Innenstadtnetz verbunden. Das Netz verfügt außerdem über 10 Speicherbauwerke, sowie 153 Mischwasserüberläufe. Im Starkregenfall können die Rückhaltebecken gemeinsam mit den Speicherkanälen bis zu 510.000 m<sup>3</sup> Mischwasser zurückhalten. Einige trennkanalisierte Gebiete in Innenstadtnähe sind mit dem Netz verbunden und werden im Modell ebenfalls abgebildet.



**Abbildung 2.4 Untersuchungsgebiete Hamburg mit Niederschlagsstationen**

Das zweite Modell ist das Regenwassernetz im Hamburger Stadtteil Harburg, welches mit einer Länge von 168 km deutlich kleiner ist. Hier wird das Regenwasser von insgesamt 1.079 ha kanalisiert und an 121 Regenauslässen in die umliegenden Gewässer geleitet. Die Flächen haben einen mittleren Versiegelungsgrad von 34 % und verfügen für Hamburger Verhältnisse über deutliches Gefälle. Acht Regenrückhaltebecken erfüllen zudem wichtige Funktionen im Netz.

### 2.2.2 Regenbelastungsszenarien

In Tabelle 2.2 sind die verschiedenen Regenbelastungsszenarien aufgeführt, die für die Vergleichsrechnungen in den drei Städten angesetzt werden.

Eine lange (20 bis 50 Jahre) und möglichst lückenlose örtliche Regenzeitreihe in hoher zeitlicher Auflösung (5 Min.) bildet das jeweilige **Referenzszenario** für die Vergleichsrechnungen. In jedem Modellgebiet wird eine solche gemessene Zeitreihe als zentraler Modellinput für die Kanalnetzsimulation verwendet. Die resultierenden Simulationsergebnisse werden dann zur Validierung der verschiedenen synthetischen Regenszenarien herangezogen.

In der Praxis bildet die Zeitreihe der nächstgelegenen DWD-Station häufig die einzig verfügbare Datengrundlage. Im Untersuchungsraum Niedersachsen liegen diese im Mittel in 38 km und in Baden-Württemberg in 30 km Entfernung vom Betrachtungsort. Zur Simulation eines typischen **Praxisszenarios** wird deshalb in jedem Untersuchungsgebiet eine DWD-Station ausgewählt, die sich ungefähr in dieser Entfernung zum Kanalnetz befindet. Mit dem Ziel Aussagen über den Einfluss der Entfernung machen zu können, wird zusätzlich mit den Zeitreihen von bis zu drei ergänzenden DWD-Stationen verschiedener Entfernung simuliert.

Die von den drei Universitäten spezifisch für jedes Untersuchungsgebiet erzeugten **synthetischen Regenzeitreihen** haben einen unterschiedlichen Umfang: WAWI und LHG 600 Jahre, IGUA 300 Jahre. Die synthetischen Zeitreihen sind entsprechend der Länge der Referenzzeitreihen in Realisationen gleicher Länge unterteilt, um die statistische Vergleichbarkeit zwischen der jeweiligen Referenzzeitreihe und einzelnen Realisationen sicherzustellen. Ausnahme bilden die Realisationen des IGUA-Modells auf Grund ihrer realzeitlichen Bindung (30 Jahre).

Da die Niederschlagsmodelle im Laufe des Projektes weiter entwickelt werden, wird in jedem Untersuchungsgebiet zunächst mit ein bis zwei Testdatensätzen und später mit einem optimierten Enddatensatz gerechnet.

Der potentielle Nutzen synthetischer Regendaten für die **ungleichmäßige Überregnung** wird anhand zusätzlicher Simulationen mit simultanen Punktzeitreihen erprobt. Als Referenz dienen gemessene Zeitreihen mehrerer benachbarter Niederschlagsstationen in den Untersuchungsgebieten. Analog zur gleichmäßigen Überregnung wird die Bandbreite innerhalb der synthetischen Niederschlagsdaten durch Berechnung mehrerer Realisationen abgebildet.

Die beschriebenen Szenarien haben alle das Ziel, die Anwendbarkeit synthetischer Regenzeitreihen für verschiedene Einsatzbereiche der Stadtentwässerungsplanung und für verschiedene Untersuchungsräume zu prüfen. Darüber hinaus werden die

Niederschlagsmodelle zur Simulation eines **Zukunftsszenarios** genutzt, um in jedem der Untersuchungsgebiete eine mögliche Klimaänderung abzubilden.

**Tabelle 2.2 Szenarienmatrix**

				Kanalnetze			
				Hamburg		Braunschweig	Freiburg
				Innenstadt	Harburg		
Niederschlag gemessen	Referenz- Szenarien	gleichmäßig	MESS	HH00 (50 Jahre, 6 mNN)	R005 (50 Jahre, 4,6 mNN)	SEBS_PRI Prinzenweg (30 Jahre, 72 mNN)	Station Freiburg (20 Jahre, 236 mNN)
		ungleichmäßig	MESS	7 Stationen (10 Jahre)	keine ausreichende Datenbasis	3 Stationen (25 Jahre)	8 Stationen (2 Jahre)
DWD-Nachbar	Praxis			3. Nachbar DWD - Wendisch Evern (10 Jahre, 50/43 km entfernt, 62 mNN)		2. Nachbar DWD-Umendorf (20 Jahre, 47 km, 162 mNN)	4. Nachbar DWD- Elzach (10 Jahre, 29 km, 440 mNN)
				2. Nachbar DWD - Jork Moorende (10 Jahre, 21/21 km, 1 mNN)		1. Nachbar DWD- Braunschweig- Völkenrode (15 Jahre, 6 km, 81 mNN)	1. Nachbar DWD- Emmendingen (12 Jahre, 13 km, 201 mNN)
	1. Nachbar DWD – Neuwiedenthal (10 Jahre, 15/5 km, 3 mNN)			-	2. Nachbar DWD-Buchenbach (11 Jahre, 14 km, 445 mNN)		
	-			-	3. Nachbar DWD-Ihringen (9 Jahre, 15 km, 193 mNN)		
Niederschlag	LHG	gleichmäßig	TEST (2x)	50 Jahre 12 Realisationen	50 Jahre 12 Realisationen	30 Jahre 20 Realisationen	20 Jahre 30 Realisationen
			END	50 Jahre 12 Realisationen	50 Jahre 12 Realisationen	30 Jahre 20 Realisationen	20 Jahre 30 Realisationen

			KLIMA	50 Jahre 1 Realisation	50 Jahre 1 Realisation	30 Jahre 1 Realisation	20 Jahre 30 Realisationen
			ungleichmäßig	END (2x)	10 Jahre 5 Realisationen	keine Referenz	25 Jahre 2 Realisationen
Niederschlag synthetisch	IGUA	gleichmäßig	TEST	30 Jahre 10 Realisation	30 Jahre 10 Realisation	30 Jahre 10 Realisation	20 Jahre 10 Realisation
			END	30 Jahre 10 Realisationen	30 Jahre 10 Realisationen	30 Jahre 10 Realisationen	30 Jahre 10 Realisationen
			KLIMA	30 Jahre 1 Realisation	30 Jahre 1 Realisation	30 Jahre 1 Realisation	30 Jahre 10 Realisationen
		ungleichmäßig	END	30 Jahre 1 Realisation	keine Referenz	30 Jahre 1 Realisation	2 Jahre 15 Realisationen
		Niederschlag synthetisch	WAWI	gleichmäßig	TEST (2x)	50 Jahre 12 Realisationen	50 Jahre 12 Realisationen
END	50 Jahre 12 Realisationen				50 Jahre 12 Realisationen	30 Jahre 20 Realisationen	20 Jahre 30 Realisationen
KLIMA	50 Jahre 1 Realisation				50 Jahre 1 Realisation	30 Jahre 1 Realisation	20 Jahre 30 Realisationen
ungleichmäßig	END (2x)			10 Jahre 5 Realisationen	keine Referenz	25 Jahre 3 Realisationen	2 Jahre 30 Realisationen

### 3 Niederschlagsmodellierung

Kern des Projektes ist die Erzeugung synthetischer Niederschläge mit verschiedenen Methoden und deren Vergleich. Dieses Kapitel beschreibt die theoretischen Modellgrundlagen, die projektbezogenen Weiterentwicklungen der Modelle und den Vergleich auf Basis der erzeugten Niederschlagszeitreihen.

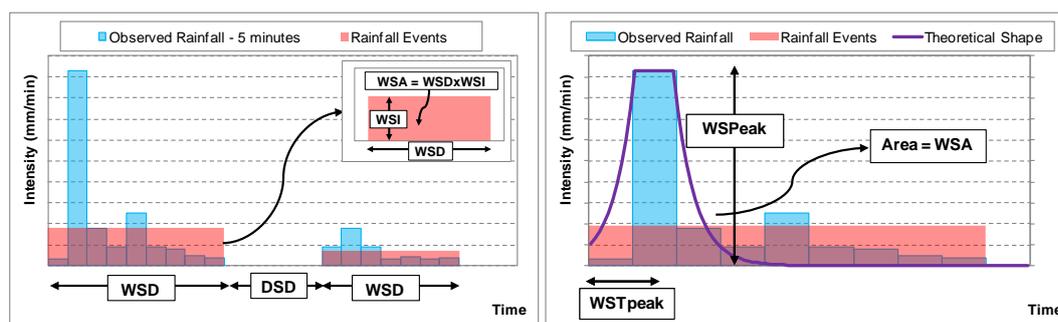
#### 3.1 Niederschlagsmodelle für Punktniederschlag

##### 3.1.1 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI-I)

###### 3.1.1.1 Precipitation model based on Alternating Renewal

The aim of the proposed precipitation model is to generate long synthetic 5-min rainfall time series based on the generation of variables describing rainfall events. It is adapted from an existing one which was developed on an hourly basis (see Haberlandt *et al.* 2008). Rainfall events are described by time between two events or dry spell duration (DSD), time of the rainfall event or wet spell duration (WSD), total volume of water falling during the event or wet spell amount (WSA) and average of rainfall during the event, i.e. WSA divided by WSD, called wet spell intensity (WSI). Estimation of rainfall events from the continuous series requires the setting of the following minimum values:  $WSI_{min}=0.01\text{mm}/5\text{min}$ ,  $WSA_{min}=1\text{mm}$  and  $DSD_{min}=5\text{min}$ . These criteria provide events which have continuous rainfall within the WSD and result in the exclusion of marginal events that are later incorporated back to the time series.

The model is based on the theory of renewal processes. Rainfall is described as two structures: external and internal. The external structure is the succession of independent rain events, each one described by a wet and dry spells along with the total amount of rainfall within the wet spell, whereas the internal structure describes the distribution of the total rainfall within the wet spell (see Abbildung 3.1).



**Abbildung 3.1 External structure (left) and internal structure (right) of rainfall events.**

In this study the external structure is modeled by probability distribution functions which are fitted to the series of variables characterizing the events: DSD, WSD and WSA. The WSI is estimated from the pairs of WSA and WSD. To include the dependence structure that relates WSA and WSD a bivariate frequency analysis is performed with the aid of the copula models. A copula is a function that enables modeling the dependency structure of random variables, independently of their marginal distributions (see e.g. Nelsen, 2006; Genest & Favre, 2007; Salvadori *et al.*, 2007).

The aim of the internal structure is to distribute the total amount of rainfall within the wet spell. A symmetric double exponential function is used (for further details see Haberlandt, 1996) described by the following variables: WSA, WSD, intensity of the peak (WSPeak) and the time of occurrence of the peak (WSTpeak). Copulas are applied to model the joint behavior of WSI and WSPeak. The WSTpeak is modeled by a simple uniform distribution to generate a value between 0 and 1, which is then multiplied by the WSD to derive the value of the time to peak.

The marginal events ( $WSA < 1\text{mm}$ ) can have an important impact in the urban hydrological modeling. To include them, their total seasonal contribution is calculated and a set with all observed marginal events is created. The total seasonal volume corresponding to these events is incorporated in the time series by randomly selecting time steps within dry spells and assigning small events from the observed set until the total volume is reached. The different analyses are performed using R (R Development Core Team 2012) a free software environment for statistical computing, with the aid of the following packages: *Lmomco* (see Asquith 2012), *Fitdistrplus* (see Delignette-Muller *et al.* 2010), and *Copula* (see Yan 2007, Kojadinovic & Yan 2010, Hofert & Maechler 2011).

### **3.1.1.2 Regionalization of the model**

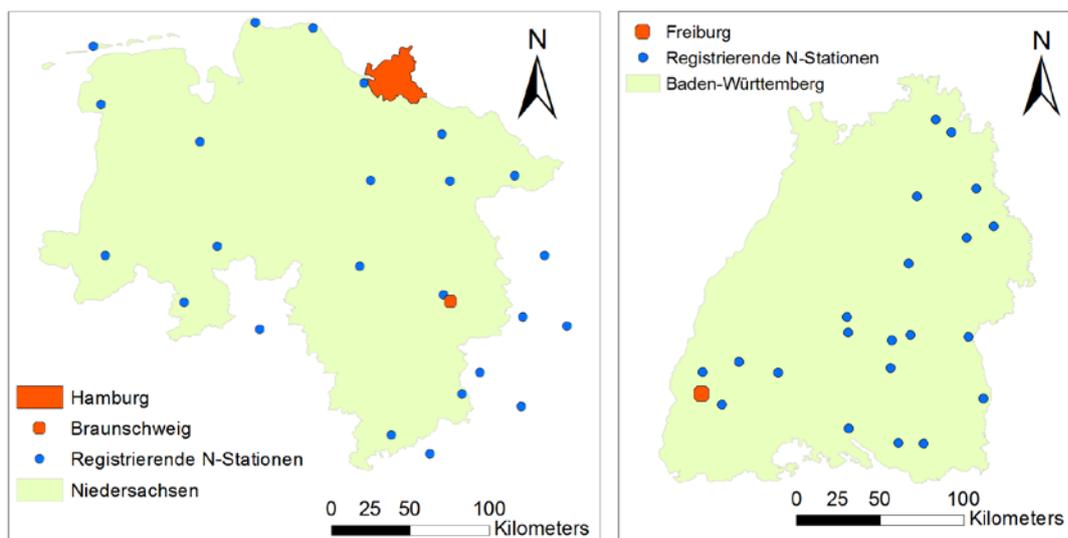
The regionalization of the model, i.e. the synthesis of rainfall time series in areas without observations, consists of estimating the log-moments (LMs) of the characteristics describing rainfall events based on sites with observations. LMs are estimated for each season and station. These values are interpolated in space using multi-linear regression (MLR) based on characteristics of the stations (position and height) and daily properties describing the rainfall events (total seasonal rainfall, proportion of rainy days and LMs describing daily rainfall). As some LMs describing each characteristic show to be significantly correlated, they are also included in the MLR in a sequential way, i.e. only in cases in which they have been estimated previously. A stepwise method was applied to define which variables should be included in the MLR model (stepwise model selection by AIC, for more details see Venables & Ripley 2002). For the WSD, MLR did not show to perform well so the Nearest Neighbor (NN) method was applied, using the values corresponding to stations which are closest to the locations to be estimated.

The regionalized LMs are then used to estimate the parameters of the functions describing the characteristics of the rainfall events. Some LMs might be modified to fulfill minimum possible values (5 min for DSD and 1 mm for WSA).

The total volume and seasonal proportion of marginal events are regionalized by NN. All models involved in the internal structure, the set of marginal events and Copula model relating the WSA-WSD are defined for each region and season, so these models do not need to be regionalized.

### **3.1.1.3 Model set up (Niedersachsen) and transfer (Baden-Württemberg)**

In order to set-up and evaluate the precipitation model, stations with high temporal resolution records, i.e. rainfall data every 5 minutes, provided by Deutscher Wetterdienst (DWD) were used. Selected stations are shown in Abbildung 3.2, 24 stations for Niedersachsen and 21 for Baden-Württemberg. The selection was performed according to the data availability to include the last 10 to 20 years of registers. The stations belonging to Niedersachsen were used to set-up the model, and the ones from Baden-Württemberg were only used for transferring it.



**Abbildung 3.2** Location of selected stations for Niedersachsen (left) and Baden-Württemberg (right). Target cities Freiburg, Hamburg and Braunschweig are as well indicated.

Rainfall events are extracted from the continuous registers for each of the stations, and separated into summer and winter events. The resulting series of rainfall characteristics are analyzed in order to find the best probability distribution models to describe them. The final selected models are described in Tabelle 3.1

**Tabelle 3.1 Description of selected criteria and components of the model**

	Variable	Model	Distribution	Equation	Parameters	Estimation Method
External Structure	DSD	Univariate	Kappa	$F(x) = \left(1 - h \left(1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha}\right)^{1/\kappa}\right)^{1/h}$	$\xi$ : location $\alpha$ : scale $\kappa$ : shape 1 $h$ : shape 2	L-Moments
	WSA*	$C_\theta(u_{WSA}, v_{WSD})$ Empirical Copula (joint distribution)	Weibull or Kappa	$F(x) = 1 - \exp\left(\left(-\frac{x - \xi}{\alpha}\right)^\kappa\right)$  (See DSD)	$\xi$ : location $\alpha$ : scale $\kappa$ : shape	L-Moments
	WSD		Log Normal 3	$F(x) = \Phi\left(\frac{\log(x - \xi) - \mu}{\sigma}\right)$	$\xi$ : lower bounds (RS) $\mu$ : mean (NLS) $\sigma$ : standard deviation (NLS)	L-Moments
Internal Structure	WSI**	$C_\theta(u_{WSPeak}, v_{WSI})$	Kappa			(See DSD)
	WSPeak	Normal Copula (joint conditional distribution)	Generalized Normal	$F(x) = \Phi\left(-\kappa^{-1} \log\left(1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha}\right)\right)$	$\xi$ : location $\alpha$ : scale $\kappa$ : shape	L-Moments
	WSTpeak	Univariate	Uniform	$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases}$	$a$ : 0 $b$ : 1	-
	Profile model	Univariate	Double Exponential	$i_N = WSPeak \cdot e^{c\lambda(t - WSTPeak)}$ $\begin{cases} c = +1, & t < WSTPeak \\ c = -1, & t \geq WSTPeak \end{cases}$	$\lambda$ : exponent	on-line for each events
Marginal Events	<b>Variable</b>		<b>Description</b>			
	WSA and WSD		Regional set of pairs			
	Total Amount		Estimated for each station and season			
	Position within DSD		Probabilities according to regional observations			
Event Definition	<b>Variable</b>		<b>Values</b>			
	<b>Unit</b>					
	WSA <sub>min</sub>	1.0	mm/event			
	WSI <sub>min</sub>	0.01	mm/5min			
DSD <sub>min</sub>	5	min				

\* WSA is modeled by Kappa for all cases except Summer events Baden Württemberg

\*\* WSI is estimated from the external structure (WSA/WSD). Kappa is the marginal distribution for Copula application.

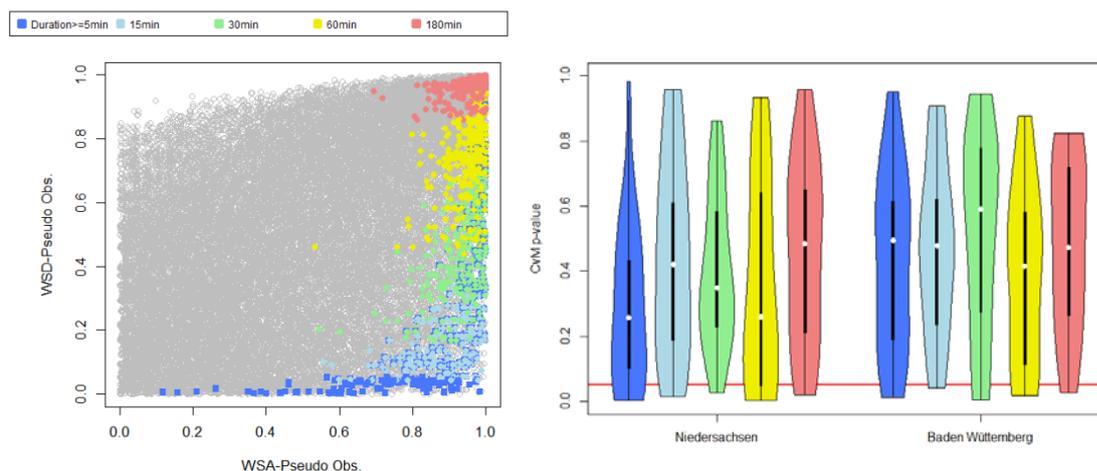
$u$  and  $v$ : marginal distributions describing the variables

RS and NLS: Real and Natural Logarithmic space

$\Phi$ : Standard Normal distribution

As was mentioned copulas are used here for modeling the bivariate behavior of WSA-WSD and WSI-WSPeak. These are special multivariate distributions considering variables which follow uniform distributions. They can therefore model the joint behavior of uniformly transformed observations (e.g. in form of empirical cumulative distributions) denoted as pseudo-observations. Copulas are used for simulating samples of pseudo-observations, which are then transformed to observations by the inverse marginal distributions describing the different involved variables. Pairs of pseudo WSA-WSD from all events registered in Niedersachsen are shown in the left plot (see Abbildung 3.3). The extreme events associated to different durations are as well indicated. It can be seen that the location of these extreme events is concentrated to the right side of the graph, corresponding to high values of WSA, along the whole data set of WSD, since different durations are

considered. A similar figure was obtained with the events observed in Baden-Württemberg. Four empirical copulas (for the two seasons and regions) are created by grouping adimensionalized events registered in all stations and estimating the pseudo pairs. To avoid some really extreme events that lead to unrealistic flooding volumes KOSTRA curves belonging to each of the target cities have been extrapolated to a return period of 600 years and are used for limiting the amount (WSA) for a particular duration (WSD).

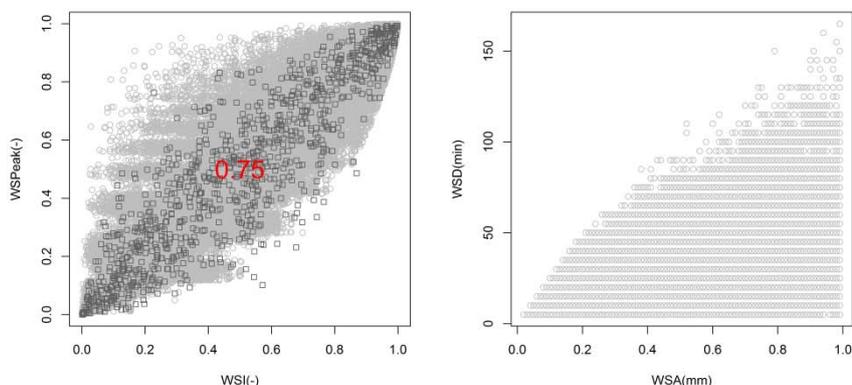


**Abbildung 3.3** Pairs of pseudo-observed WSA and WSD for all events and extreme events registered in Niedersachsen (left) and P-values of test for assessing the simulated summer extreme events (right).

To assess the capability of the models to reproduce the observed extreme events synthetic long series of 1000 years are generated. Annual maxima are identified for different durations (5, 15, 30, 60 and 180 minutes), which are fitted to a General Extreme Value (GEV) distribution. Observed annual maxima are compared to the fitted GEV and the Cramer-von Misses (CvM) test is applied to decide whether the observed extremes belong to the fitted GEV or not. Results are presented as p-values, note that values lower than 0.05 indicate that the observed series do not belong to the fitted ones. P-values are presented for all the stations in both regions as violin plots, which are a combination of box plots and density trace. The right plot (see Abbildung 3.5) shows the results from the CvM test for the different durations and for the summer events, which are for most of the analyzed cases acceptable for both regions.

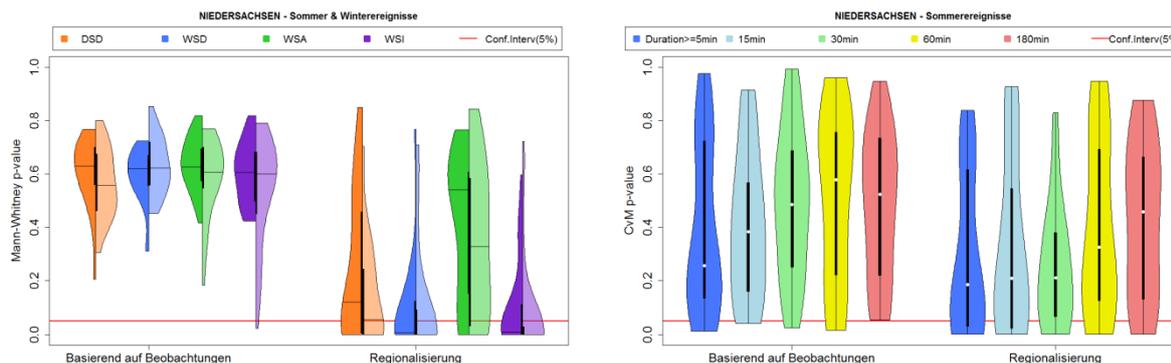
Pairs of pseudo WSI-WSPeak from all events registered in Niedersachsen are shown in the left plot (see Abbildung 3.4), which indicate a strong positive correlation and are well reproduced by a Normal copula. All marginal events are put together into a

regional data set (see right plot, Abbildung 3.4). This set is then used for the synthesis of marginal events, as a random sampling of events until the total seasonal contribution is fulfilled. Similar figures were obtained with the Baden-Württemberg series.



**Abbildung 3.4** Internal Structure: Pairs of pseudo WSI and WSPeak with Tau Kendall correlation for all events registered in Niedersachsen [grey circles] and simulated with the copula [dark grey squares] (left). Marginal Events: Pairs of WSA and WSD of marginal events registered in Niedersachsen (right).

The regionalization of the model is evaluated by using the regionalized LMs for estimating parameters and then generating new long synthetic series which are compared with the observed ones. To assess the capability to reproduce the observed events synthetic long series are compared with the observed ones and the Mann-Whitney (MW) test is applied to decide whether both series belong to the same probability distribution function. The procedure was performed for summer and winter events separately. The p-values resulting from the test which are lower than 0.05 indicate that the two series are not identical. The extreme values are analyzed as well using the CvM test, as described previously. The following graphs show the results from MW test, both for summer and winter, and from the CvM for the different durations (see Abbildung 3.5). The results are shown for the Niedersachsen stations both for non-regionalized and regionalized cases to assess the effect of regionalization.



**Abbildung 3.5 Evaluation of regionalization: p-values of tests for assessing the simulated basic event characteristics (left, shaded colors show winter events) and summer extreme events (right).**

Results indicate that for the non-regionalized case the three characteristics which are directly modeled, i.e. DSD, WSD and WSA, are well reproduced by the models in all seasons. The WSI, which is derived using the WSA and WSD, is as well acceptable. The regionalized case on the other hand shows a deterioration of the results for all variables, especially for the WSD which is then transmitted to the WSI. Nevertheless the extreme events do not show to be so sensitive to the regionalization, as the deterioration of the results is not so strong.

### 3.1.2 Nicht-Parametrisches stochastisches N-Modell (LHG)

Das nicht-parametrische stochastische Niederschlagsmodell des LHG besteht aus zwei unterschiedlichen Teilbereichen. Zum einen aus der zugrundeliegenden Datenbasis und zum anderen aus der eigentlichen Generierung.

#### 3.1.2.1 Ist-Zustand

Die Datenbasis gliedert sich in zwei Parametersätze zur Beschreibung der statistischen Eigenschaften von Niederschlag:

- **Strukturparameter**, die die zeitliche Struktur des Niederschlags beschreiben: Autokorrelation, jahreszeitlich gewichtete Autokorrelation, monatliche Niederschlagssummen, Skalierungsparameter zur Beschreibung des Zusammenhangs von Niederschlagswerten unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen, Überschreitungswahrscheinlichkeiten für Tages- und 5min-Werte.

- **Verteilungen**, die die Niederschlagswahrscheinlichkeiten der stündlichen Werte wiedergeben. Dabei wird eine zwei-parametrische Gamma-Verteilung an die empirischen Verteilungen angepasst. Die beiden Parameter beschreiben dabei ortsspezifisch die Verteilung.

Diese verschiedenen statistischen Eigenschaften werden zunächst an allen Punkten mit Messstationen berechnet und anschließend mit dem geostatistischen Verfahren External Drift Kriging auf ein Raster mit 1 km Auflösung räumlich interpoliert, um für Orte ohne Messwerte auch eine Datenbasis zu erzeugen.

Die Generierung der stündlichen Niederschlagszeitreihen erfolgt jahresweise. Zunächst wird der Ort ausgewählt, für den die Zeitreihe erstellt werden soll. Anschließend werden aus der interpolierten parametrischen Verteilung für diesen Ort so lange stündliche Niederschlagswerte gezogen, bis die erforderliche Jahressumme erreicht ist. Da die Niederschlagswerte bis jetzt in einer zufälligen Reihenfolge vorliegen, muss diese noch optimiert werden, um die interpolierten zeitlichen Strukturparameter richtig abzubilden. Dies geschieht durch Vertauschen der Niederschlagswerte im Rahmen des Simulated Annealing Optimierungsalgorithmus (s. BÁRDOSSY, 1998).

In einem weiteren Optimierungsschritt werden die stündlichen Niederschlagszeitreihen auf 5min-Zeitreihen disaggregiert. Die 5min Werte werden dabei zunächst durch eine Gleichverteilung der jeweiligen Stundenwerte erstellt. D.h. aus einem Stundenwert entstehen 12 gleiche 5min Werte. Anschließend werden diese Werte durch Addieren und Subtrahieren von diskreten Niederschlagswerten so verändert bis sie die statistischen Strukturparameter wiedergeben. Diese Optimierung erfolgt wieder durch einen Simulated Annealing Algorithmus.

### **3.1.2.2 Weiterentwicklung**

Bei der Weiterentwicklung des LHG-Niederschlagsmodells werden sowohl Methoden zur Anpassung von theoretischen Verteilungen an empirische Verteilungen von stündlichen Niederschlagswerten als auch Möglichkeiten zur Verbesserung der Interpolation der unterschiedlichen Parameter untersucht. Weiterhin wird eine Analyse der zeitlichen Struktur der synthetischen Niederschlagszeitreihen

durchgeführt und unterschiedliche Optionen zur Verbesserung der Optimierung geprüft.

Bei der **Anpassung von theoretischen Verteilungen** werden zwei Methoden miteinander verglichen:

- Die bisherige verwendete Anpassung mittels einer zwei-parametrischen Gamma-Verteilung.
- Eine nicht-parametrische Anpassung mittels Kernel-Density-Estimation. Da es sich bei Niederschlagsverteilungen um schiefe Verteilungen handelt, wird dabei zunächst ein Logarithmieren der Niederschlagswerte vorgenommen (s. z.B.: CHARPENTIER UND FLACHAIRE (2014)).

Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf Niederschlagswerten größer als die jeweiligen 95 % Quantile, da diese für die spätere Anwendung die entscheidenden Werte sind.

Außerdem werden die Untersuchungen getrennt für Wintermonate (September bis April) und Sommermonate (Mai bis August) durchgeführt, da die Verteilungen für die beiden Jahreszeiten unterschiedliche Abhängigkeiten von der Höhe aufweisen, welche in die spätere Interpolation der Verteilungen einbezogen wird.

Die Anpassung der beiden Formen von theoretischen Verteilungen wird mit verschiedenen Gütemaßen, u.a. dem Cramer – von Mises Kriterium, bewertet. Die nicht-parametrischen Verteilungen schneiden dabei deutlich besser ab als die bisherige parametrische Anpassung.

Bei der **Interpolation der Verteilungen** wurden geostatistische Verfahren wie Ordinary und External Drift Kriging sowie eine am LHG neu entwickelte Copula basierte Methode (BÁRDOSSY UND HÖRNING, 2016) untersucht. Mit der neuen Copula basierten Methode ist es möglich neben richtungsgeglätteten Höheninformation auch die Verteilungen von Tageswerten in die Interpolation mit einzubeziehen. Die Interpolation wird mittels eines Splitsamplings und den gleichen Gütemaßen wie bei der Anpassung der Verteilungen bewertet.

In den Sommermonaten schneidet die Interpolation der nicht-parametrischen Verteilungen mit der Copula basierten Methode am besten ab. In den Wintermonaten

zeigen die verschiedenen Anpassungsmethoden (parametrisch und nicht-parametrisch) ähnlich gute Ergebnisse bei der Interpolation.

Um eine **Verbesserung der zeitlichen Struktur** der Niederschlagszeitreihen zu erreichen, wird diese zunächst mit einem vereinfachten, synthetischen, hydrologischen Modell untersucht. Dabei zeigt sich, dass die zeitliche Struktur von gemessenem Niederschlag nicht ausreichend gut in den modellierten Zeitreihen abgebildet wird. Um dieses Problem zu beheben, wird ein zusätzlicher Strukturparameter in die Generierung der Stundenreihen eingebaut (Anzahl an Regenereignissen). Zusätzlich werden große Niederschlagswerte schon vor der Generierung mittels eines Poisson-Prozesses in der Zeitreihe platziert.

Die zeitliche Struktur der Niederschlagszeitreihen kann zudem durch eine optimierte **Interpolation der Strukturparameter** weiter verbessert werden. Dabei wird u. a. die Interpolation der Monatssummen untersucht, wobei mittels External Drift Kriging und einem richtungsgeglätteten Höhenmodell die besten Interpolationsergebnisse erzielt werden. Die Interpolation der Autokorrelation führt hingegen mit dem einfacheren Ordinary Kriging zu besseren Ergebnissen. Dabei werden Mittelwert und Standardabweichung der Autokorrelationen  $\geq 60$  min bei der Interpolation anstatt deren jahresweise Werte verwendet, da letztere zu hohe Unsicherheiten aufweisen. Für die Interpolation weiterer Niederschlagscharakteristiken (wie z.B. der Häufigkeiten von Nassperioden) werden verschiedene Regionalisierungsmethoden wie Ordinary Kriging, External Drift Kriging und Inverse Distance Weighting getestet und validiert. Anschließend wird die jeweils beste Regionalisierungsmethode für die Interpolation der jeweiligen Niederschlagscharakteristik verwendet.

### **3.1.3 Dynamisch-stochastisches N-Modell (IGUA)**

Basis des dynamisch-stochastischen N-Modell-Ansatzes für Punktniederschläge des Instituts für Geographie der Universität Augsburg sind Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells (RCM) WRF (Weather Research and Forecasting model, Skamarock et al. 2008) mit einer Auflösung von  $7 \times 7 \text{ km}^2$  und 24 h. Die Modellergebnisse liegen als Reanalyselauf mit ERA-40-Antriebsdaten für den Zeitraum 1971 bis 2000 vor. Für den Klimalauf mit WRF werden Ergebnisse des

globalen Klimamodells ECHAM-5 (A1B-Szenario) für den Zeitraum 1971 bis 2000 (Ist-Zeit) und 2021 bis 2050 (Zukunftsszenario) verwendet (Berg et al. 2013, Wagner et al. 2013).

Regionale Klimamodelle sind in der Lage, raum-zeitliche Prozesse auf Grundlage physikalischer Prozesse nachzubilden. Durch Unsicherheiten bezüglich der meteorologischen Antriebsdaten und der Parametrisierung physikalischer Prozesse, welche auf Skalen unterhalb der räumlichen Modellauflösung ablaufen, sowie durch numerische Effekte, weisen RCM-Simulationen jedoch grundsätzlich gewisse Fehler auf. In unseren Simulationen treten eher zu viele Niederschlagstage auf und die Niederschlagsintensität wird überschätzt. Für die anschließenden hydraulischen Berechnungen ist es daher notwendig, eine Fehlerkorrektur durchzuführen (Bias-Korrektur). Zusätzlich ist eine zeitliche Disaggregation der simulierten Tageswerte auf die endgültige 5-Minuten-Auflösung nötig. RCMs simulieren zwar intern mit noch feineren Modellzeitschritten, doch dies geschieht zu einem großen Teil, um die numerische Stabilität der Modelle bei einer bestimmten räumlichen Auflösung zu gewährleisten. Tageswerte werden von RCMs generell besser getroffen als zeitlich höher aufgelöste Werte.

Das dynamisch-stochastische Niederschlagsmodell der Universität Augsburg (Akronym: IGUA) wurde innerhalb des Projekts SYNOPSE neu entwickelt. Es wurde ein iterativer Ansatz gewählt, um die besonderen Anforderungen der hydraulischen Modellierung bestmöglich zu berücksichtigen. Zunächst wurde das Modell an einer Station (Punktniederschläge) bzgl. der zeitlichen Disaggregation von Tageswerten auf 5 Minuten entwickelt (Kap. 3.1.3). Darauf basierend wurde das Modell um die räumliche Komponente (das Downscaling) auf räumlich und zeitlich korrelierte Zeitreihen erweitert (Kap. 3.2.5).

Vorabversion (April 2014)

In der Vorabversion für Punktniederschläge wurde für die Bias-Korrektur der RCM-Niederschläge auf Tagesbasis das *Dry-Day-Correction-Quantile-Mapping-Verfahren* gewählt, bei dem die Anzahl an Regentagen korrigiert wird und die Quantile der RCM-Niederschläge über die Verteilungsfunktionen von Beobachtungsstationen auf den gemessenen Wertebereich transformiert werden.

Die Disaggregation mit zwei hintereinandergeschalteten stochastischen Modellen wurde, wie auch die Bias-Korrektur, an Stationsstandorten wie folgt durchgeführt: Im ersten Schritt werden die Tagesgänge unterschiedlicher Tagesintensitäten aus den Messdaten berechnet. In Abhängigkeit der Intensität des korrigierten Tageswerts, werden die Tagesgänge simuliert, wobei das Modell die zu erwartenden Niederschlagssummen unterschiedlicher Dauerstufen berücksichtigt (Knoesen und Smithers 2009). Hierbei wurde das ursprüngliche Modell erweitert, damit die Ereignisse innerhalb des Tages einen besseren räumlichen Zusammenhang aufweisen. Im zweiten Schritt werden unabhängige 5-Minuten-Simulationen mit Markov-Ketten für die einzelnen Standorte durchgeführt. Hierbei wird der Quantilbereich in zehn Klassen eingeteilt, um das An- und Abschwellen von Niederschlagsereignissen besser zu modellieren als es mit einer Markov-Kette (die nur trockene und nasse Zustände unterscheidet) möglich ist. Aus diesen simulierten Zeitreihen wird für jeden disaggregierten Stundenwert derjenige Ausschnitt ausgewählt, dessen Summe möglichst nahe am Stundenwert liegt. Zudem werden Ausschnitte aus den freien Simulationen, welche bislang selten zur Disaggregation eines Stundenwerts verwendet worden sind, bevorzugt, um die statistische Variabilität der disaggregierten Zeitreihe zu verbessern. Die Auswahl erfolgt hierbei über Fuzzy-Regeln.

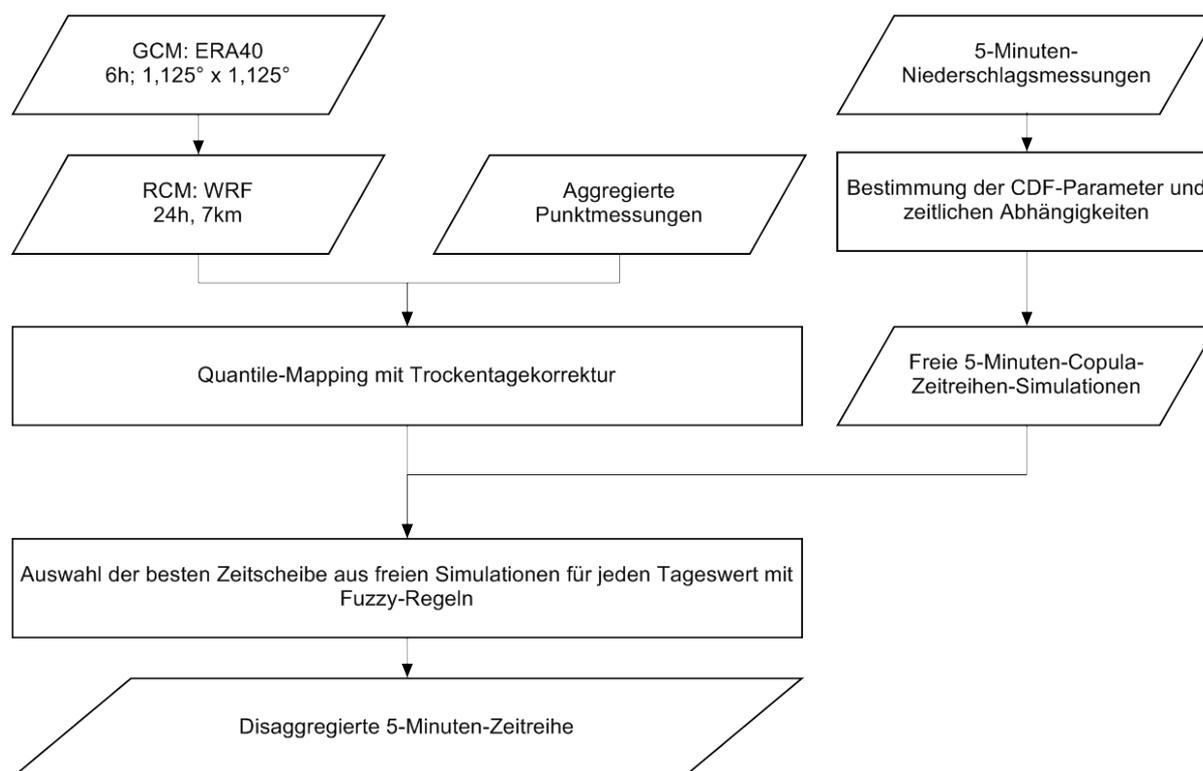
#### Endversion (2015/2016)

Im Jahr 2015 wurde das stochastische Modell neu aufgesetzt. Für die Bias-Korrektur wird weiterhin das *Dry-Day-Correction-Quantile-Mapping-Verfahren* verwendet. Da nicht an allen Standorten Niederschlag gemessen worden ist, wurde ein Kriging der Verteilungsparameter der Beobachtungsstationen zu diesen Standorten durchgeführt. Somit ist es möglich, die erwartete Verteilung zu schätzen und ein Quantile-Mapping für beliebige Punkte in der betrachteten Region durchzuführen. Die bisherigen Routinen für die Disaggregation (siehe oben) wurden komplett durch Copula-Ansätze (angelehnt an Serinaldi 2009) ersetzt. Dies ermöglicht nun, die zeitlichen Abhängigkeiten über mehr Zeitschritte als bei dem Modell der Vorabversion zu berücksichtigen.

Zunächst wurde in einer Zwischenversion eine mehrstufige Disaggregation über die Stufen 24 Stunden, 6 Stunden, 60 Minuten und schließlich 5 Minuten durchgeführt. Dadurch werden ein besserer Erhalt der Statistiken sowie eine Beschleunigung der Rechnungen gewährleistet. Um beispielsweise einen 24-Stunden-Wert auf vier 6-Stunden-Werte zu disaggregieren, werden für einen dieser vier Zeitschritte mehrere Realisationen generiert. Die Verteilung dieser Werte wird über eine Copula von dem 24-Stundenwert und dem 6-Stundenwert geschätzt. Auf diesen ersten 6-Stundenwert und die vorherigen 6-Stunden-Werte konditioniert, werden die verbleibenden drei 6-Stunden-Werte simuliert. Dies wird für alle Tageswerte und Disaggregierungsstufen bis 5 Minuten durchgeführt. Die so erzeugten zusammenhängenden synthetischen Zeitreihen basieren demnach auf einer Skalenabhängigkeit zwischen feiner und grober zeitlicher Auflösung sowie einer zeitlichen Abhängigkeit zu den vorher simulierten Werten mit feiner zeitlicher Auflösung.

Die Endversion des Modells für Punktdaten ist eine Weiterentwicklung der Zwischenversion. Die Bias-Korrektur bleibt dabei unverändert, lediglich die Disaggregation wurde modifiziert. Basierend auf gemessenen Stationsdaten mit 5 Minuten-Auflösung wird eine statistische Verteilung angepasst und anschließend freie Simulationen durchgeführt: ca. 500000 pro Monat und Standort. Aus dieser Stichprobe werden unter Berücksichtigung definierter Fuzzy-Regeln (z. B. Niederschlagssumme von Stunden- oder Tageswerten) Zeitabschnitte gewählt, die für die Erzeugung der synthetischen Zeitreihen verwendet werden.

Eine Übersicht über das dynamisch-stochastische Modell für Punktdaten ist dem untenstehenden Flussdiagramm zu entnehmen.



**Abbildung 3.6:** Flussdiagramm des dynamisch-stochastischen Niederschlagsmodells der Universität Augsburg für Punktdaten.

### 3.1.4 Spezielle Aspekte: Merging von Stations- und Radardaten

Der im Teilprojekt 2 betrachtete spezielle Aspekt des Mergings ist als Ergänzung zum eigentlichen Ziel des Projektes, der Generierung hochaufgelöster Niederschlagszeitreihen für die Stadtentwässerung, zu sehen. Es wird untersucht, ob eine gute Nachbildung von Niederschlagsereignissen für Orte ohne hochauflösende Station durch eine Kombination (Merging) von entfernten Stationsdaten und großflächigen Radardaten möglich ist.

Das in Niedersachsen vorhandene Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hat im Allgemeinen keine ausreichende Dichte, um alle Niederschlagsereignisse mit hoher zeitlicher Auflösung räumlich zu erfassen. Die Punktmessungen weisen bei vielen Ereignissen einen zu großen Abstand auf, sodass bei einer räumlichen Interpolation ein unrealistisches Niederschlagsbild entsteht oder sogar ganze Ereignisse von keiner Station erfasst werden. Radarmessungen des Niederschlags können ein räumlich hochaufgelöstes

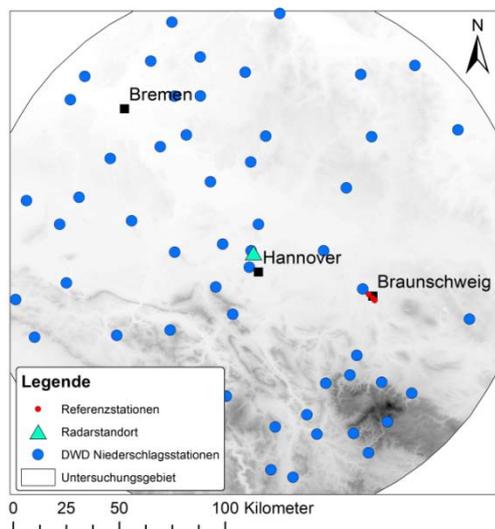
Niederschlagsbild bereitstellen, weisen in der Niederschlagshöhe allerdings deutliche Ungenauigkeiten im Vergleich mit Stationsdaten auf. Generell kann ein Merging von Radar- und Stationsdaten die Niederschlagsschätzung gegenüber einer univariaten Niederschlagsinterpolation verbessern (Berndt et al., 2014).

Für diese Untersuchungen wurden unterschiedliche räumliche Interpolationsmethoden für die 5-minütigen Niederschlagszeitreihen verwendet und mit einem urbanhydrologischen Modell der Kanalisation von Braunschweig auf ihre Eignung hinsichtlich stadthydrologischer Fragestellungen untersucht:

- Univariate Interpolation: Nächster Nachbar (NN), Ordinary Kriging (OK)
- Merging-Methoden: Biaskorrektur (BIASC), Conditional Merging (CM)
- Sonstige Methoden: Nichtkorrigierte Radardaten (Radar), Referenzniederschlagsstationen (REF)

In einem ersten Schritt werden die interpolierten Zeitreihen nur hinsichtlich ihrer Eignung für die Bemessung von Kanalnetzen (Anwendungszweck A) und für die Analyse einzelner Ereignisse verwendet (Anwendungszweck B).

Die Biaskorrektur basiert auf einem Quantile-Mapping Ansatz, d. h. es werden für jeden Zeitschritt jeweils eine Verteilungsfunktion an Stationsbeobachtungen und Radarbeobachtung angepasst, mit der dann die Radarmessungen korrigiert werden (Rabiei und Haberlandt, 2015). Beim Conditional Merging wird zuerst eine Interpolation aller Radarpixel, in denen sich Standorte der Niederschlagsmessstationen befinden, mit OK durchgeführt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Subtraktion des Rasters der OK Interpolation der Radarpixel vom Original Radarraster. Anschließend kann dann eine Interpolation der Stationswerte durchgeführt werden, sodass im letzten Schritt das vorherig berechnete Differenzraster auf die Interpolation der Stationswerte addiert werden kann (Sinclair und Pegram, 2005). Die Methoden NN, OK und Radar werden als Vergleichsmaßstab für die beiden Merging-Produkte verwendet. Zusätzlich sind in dem städtischen Einzugsgebiet Braunschweig mehrere Niederschlagsstationen vorhanden, wovon drei zur Validierung der interpolierten Niederschlagszeitreihen verwendet werden (REF). Diese Stationen wurden nicht bei den räumlichen Interpolationen bzw. beim Merging verwendet. Die folgende Abbildung 3.6 zeigt die räumliche Lage aller DWD-Stationen und der drei verwendeten Referenzstationen.

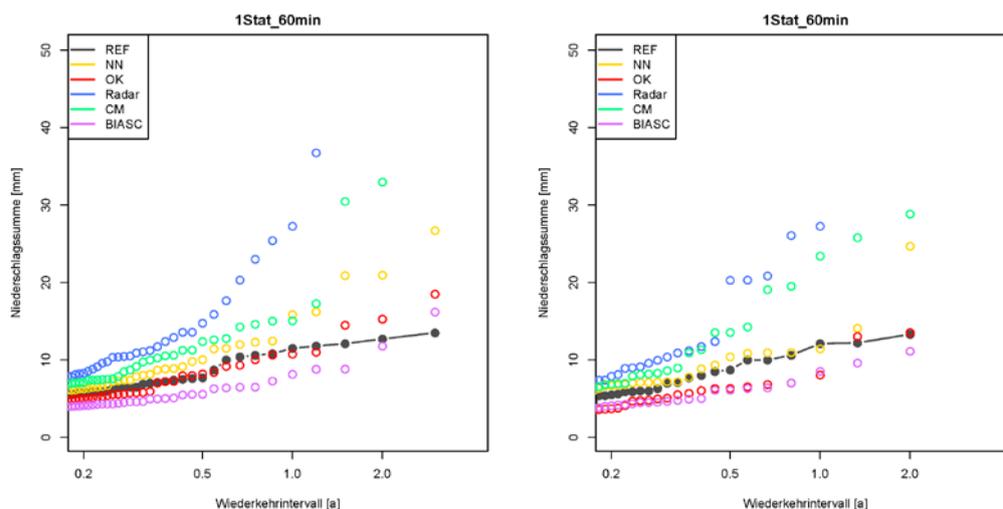


**Abbildung 3.6: Lage der DWD-Niederschlagsstationen und der Referenzniederschlagsstationen**

Bei allen Untersuchungen wurden jeweils zwei Stationsdichteszenarien definiert. Für Szenario A (hohe Stationsdichte) wurde mit allen in Abbildung 3.6 dargestellten Stationen interpoliert. Bei den Interpolationen für Szenario B (geringe Stationsdichte) wurden die DWD Station „Braunschweig“, welche sich in der Nähe des Einzugsgebiets befindet, nicht bei den Interpolationen bzw. beim Merging berücksichtigt. Des Weiteren erfolgte eine Definition von zwei unterschiedlichen Niederschlagsinputvarianten für das urbanhydrologische Modell. Bei Variante 1 (1Stat) wird eine Einzelzeitreihe (Station Prinzenweg bzw. entsprechende Rasterzelle) und bei Variante 2 das vollständige Niederschlagsfeld bzw. drei Zeitreihen bei der Referenz als Modellinput verwendet.

Die stadthydrologischen Untersuchungen wurden unter Verwendung eines EPA-SWMM Modells (Rossman, 2010) der Kanalisation von Braunschweig durchgeführt (3855 Teileinzugsgebiete, 6310 Knoten, 6643 Haltungen).

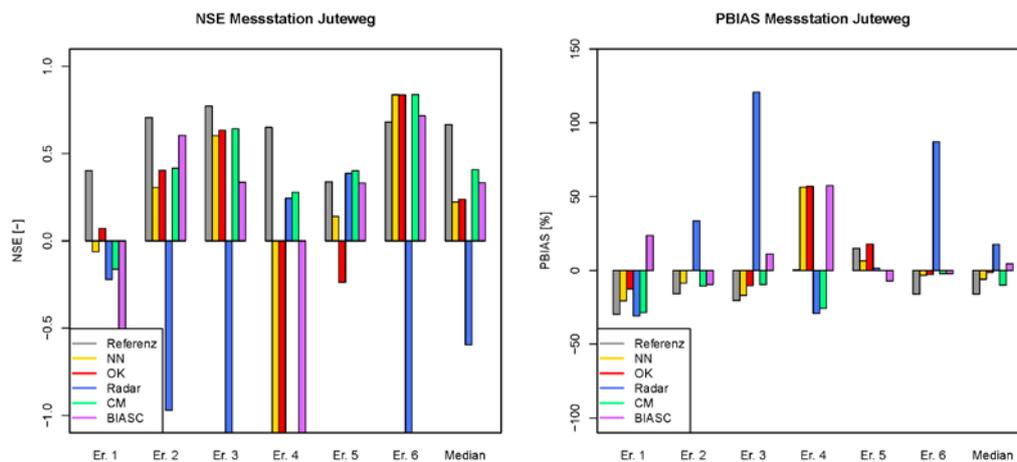
Für die Untersuchungen zu Anwendungszweck A erfolgte eine Ermittlung partieller Serien für die Dauerstufen 10 min, 30 min, 60 min, 120 min und 240 min. Die Ergebnisse ähneln sich stark, sodass an dieser Stelle nur die Resultate für 60 min dargestellt sind. Des Weiteren werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse des Einzelzeitreiheninputs dargestellt. Die Extremwertstatistik mit dem Gebietsmittel des vollständigen Niederschlagsfeldes liefert keine wesentlichen Änderungen.



**Abbildung 3.7: Partielle Serie der Dauerstufe 60 min für Einzelzeitreihen von Szenario A (links) und Szenario B (rechts)**

Die Ergebnisse (Abbildung 3.7) zeigen, dass nichtkorrigierte Radardaten eine deutliche Überschätzung der Extremwerte hervorrufen, welche durch CM nicht vollständig korrigiert werden kann. BIASC zeigt eine leichte Unterschätzung, welche aus der Transformation durch das Quantile-Mapping resultiert. Bei Szenario A liefert NN eine Überschätzung, während OK die Extremwerte der Referenz am besten wiedergibt. Im Fall von Szenario B wird das beste Ergebnis mit NN erreicht. Die beiden Mergingprodukte und nichtkorrigierte Radardaten scheinen nicht sinnvoll für die Ermittlung von Extremniederschlägen zu sein. Gründe hierfür können Fehler in den Radardaten, wie z. B. falsche Kalibrierung des Radargeräts oder die Transformation unter Verwendung einer konstanten Beziehung zwischen Radarreflektivität und Niederschlagsintensität sein. Die Simulationsergebnisse mit dem Kanalnetzmodell bestätigen die deutlichen Unterschiede zwischen den Methoden, d. h. bei einer Verwendung von Radar und CM als Input kommt es zu einer deutlich höheren Anzahl an überstauten Knoten und einem deutlich höheren Überstauvolumen.

Für die Untersuchungen für Anwendungszweck B wurden sechs ausgewählte Niederschlagsereignisse simuliert. Der an der Messstation Juteweg beobachtete Durchfluss wurde mit den Durchflüssen, welche für jeden Niederschlagsinput simuliert wurden, verglichen und anhand von prozentualen Volumenfehler (PBIAS) und Nash-Sutcliffe-Effizienzkriterium (NSE) bewertet. Die folgende Abbildung 3.8 zeigt die Ergebnisse für den Einzelzeitreiheninput und Szenario A.



**Abbildung 3.8: NSE (links) und PBIAS (rechts) von Szenario A für sechs mit Einzelzeitreiheninput simulierte Ereignissen**

Generell kann mit den Referenzdaten für alle ausgewählten Ereignisse eine ordentliche Güte der Simulationen erreicht werden. Nichtkorrigierte Radardaten erzeugen bei vielen Ereignissen eine äußerst schlechte Modellgüte und sollten nicht direkt als Input für die hydrodynamischen Simulationen verwendet werden. CM resultiert für die meisten Ereignisse (Ausnahme: Ereignis 1) in einem positiven NSE, während BIASC bei Ereignis 1 und Ereignis 4 deutlich schlechter ist. OK und NN erzeugen bei Szenario A (hohe Stationsdichte) für viele Ereignisse eine ähnliche Simulationsgüte. Im Fall geringer Stationsdichte (Szenario B) verringert sich die Simulationsgüte von CM und BIASC nur geringfügig, während bei NN und OK eine deutliche Verschlechterung hervorgerufen wird. Die Ergebnisse für Szenario B und den Input des kompletten Niederschlagsfelds werden an dieser Stelle aus Platzgründen nicht dargestellt.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass sowohl die Radardaten als auch die beiden Mergingprodukte ohne eine verbesserte Fehlerkorrektur nicht für den Zweck der Kanalnetzdimensionierung geeignet scheinen. Für den Fall der Analyse von Einzelereignissen besitzt CM jedoch deutliche Vorteile gegenüber den weiteren Methoden. Die Anwendung von nichtkorrigierten Radardaten ist für beide untersuchte Zwecke nicht zu empfehlen.

## 3.2 Räumliche Niederschlagsmodelle

### 3.2.1 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI)

#### 3.2.1.1 Multisite synthesis based on Simulated Annealing

This method consists of two steps. First the synthesis of rainfall is performed for single sites using an alternating renewal model (ARM) as described in section 3.1.1. Second the time series corresponding to each of the case study regions are resampled in order to reproduce the spatial dependence structure of the rainfall process. The resampling process is event based, i.e. the resampled time series consist of the original one with the ordering of events swapped randomly (i.e. resampling without replacement).

The resampling algorithm used for this purpose is called Simulated Annealing (SA), introduced for point rainfall generation by Bárdossy (1998) and applied for multisite rainfall generation by Haberlandt et al. (2008). The algorithm consists of a non-linear discrete optimization method and the aim is to minimize an objective function which takes into account the difference of spatial dependency structure between observed and simulated time series. Three bivariate measures, i.e. comparing time series corresponding to two stations, are taken into account: the probability of bivariate rainfall occurrence at two stations, the Pearson's coefficient of correlation and the rainfall continuity measure proposed by Wilks (1998), which estimates the expectation of the rainfall intensity of one station conditioned on the rainfall status dry or wet of the neighbouring station.

The optimization consists of comparing the objective function computation before and after reshuffling two events. If an improvement is achieved, the reshuffling is accepted. Otherwise, it is conditionally accepted with a probability that is a function of the value of the objective function and a global time varying parameter known as the annealing temperature. This procedure is repeated several times until convergence of the objective function is achieved. For more details the readers may refer to Bárdossy (1998).

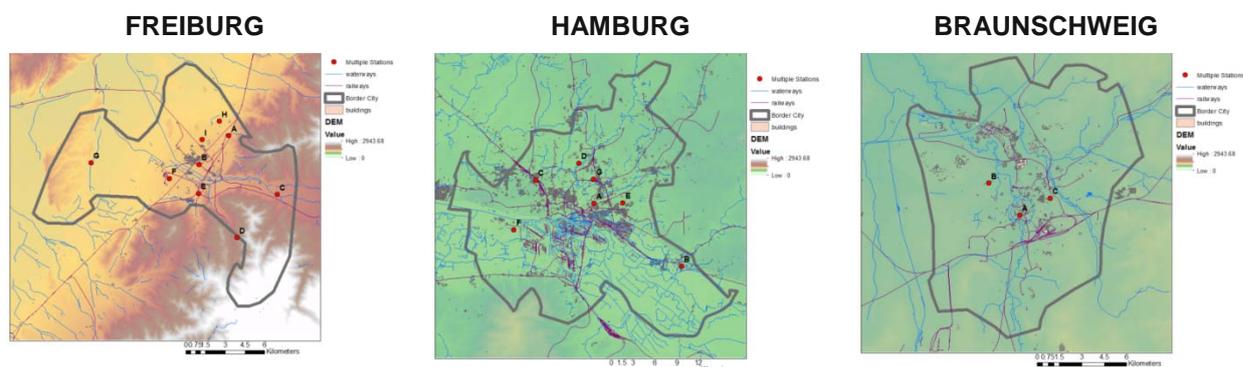
After the resampling of events, the events time series are transformed into continuous 5 minutes time series by implementing the internal model, independently for each of the stations. Marginal events are randomly assigned within dry spells for each station independently from the other stations.

### 3.2.1.2 Model set up for case studies

The location of the target stations within each city and length of observed and simulated time series are described in the following table (Tabelle 3.2) and maps (see Abbildung 3.9). First, the single-site alternating renewal model with the regionalized parameters is used to generate long time series for each of stations independent from the rest of the stations. In the second step the multisite resampling procedure using SA is applied on the synthetic point rainfall event series to get a spatially consistent set of stations.

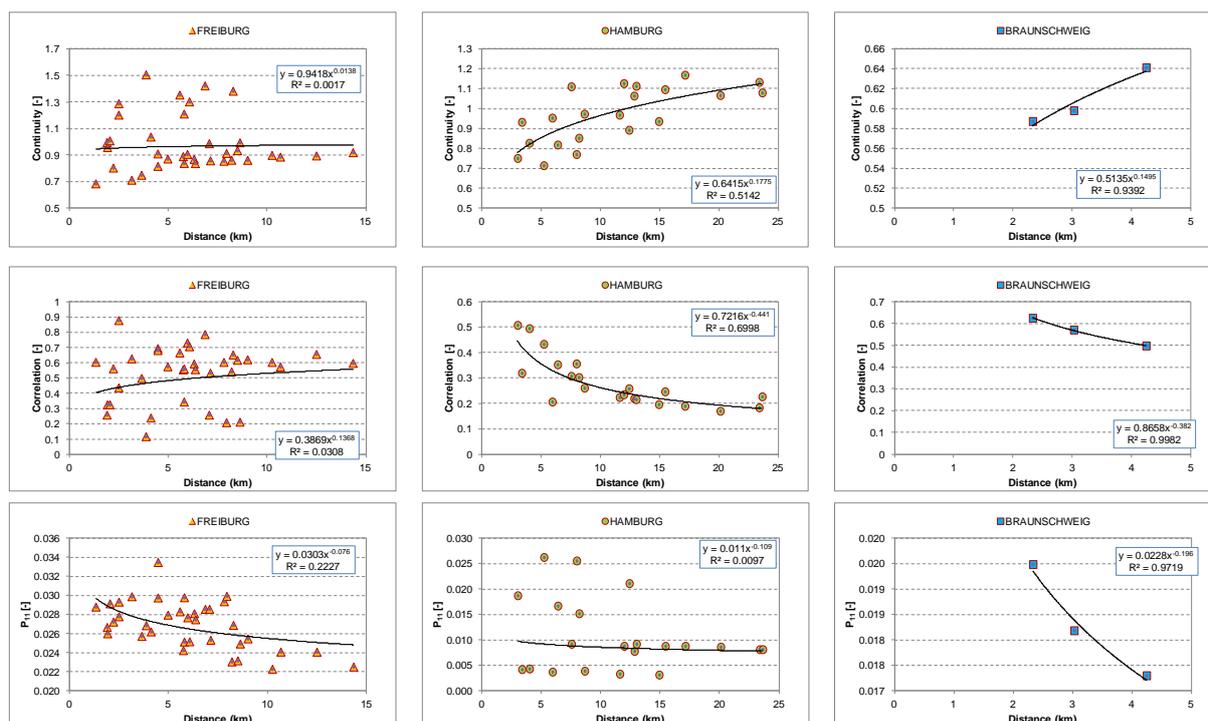
**Tabelle 3.2** Description of the available and resulting data for the multisite synthesis

Case Study	Number of target stations	Length of record [years]	Length of synthetic TS [years]
Freiburg	9	2	60
Hamburg	7	6.5	75
Braunschweig	3	5	50



**Abbildung 3.9** Location of the target stations for the multisite synthesis.

Three different spatial consistency measures are taken into account, namely probability of bivariate rainfall occurrence, correlation between rainfall intensities and continuity measure, as well as weights of each measure within the objective function. These measures are estimated from observed time series which have registers of rainfall in all target stations simultaneously for each city. The estimated values for different distances between stations are shown in the following figures (see Abbildung 3.10), along with the functions fitted to the values.



**Abbildung 3.10** Spatial consistency measures used for the SA-multisite synthesis.

The weights corresponding to each criterion within the objective function are set up after a sensitivity analysis. The most difficult measure to fulfill is the probability of bivariate rainfall occurrence ( $P_{11}$ ), so the maximum weight was assigned to this criterion. For the Freiburg case the stations do not show a clear behavior of the spatial consistence measures with the distance, one reason could be that the length of the observed time series is too short. Nevertheless for this station only the  $P_{11}$  criterion was included in the objective function. Regarding the resampling algorithm the following parameters were set for all cases: Number of temperature changes 1000, number of iterations for each temperature change 1000, temperature increase rate 0.1, and temperature decrease rate 0.9.

### 3.2.2 Parametrisches stochastisches N-Modell (WAWI-II)

#### 3.2.2.1 Multisite synthesis based on Vine copulas

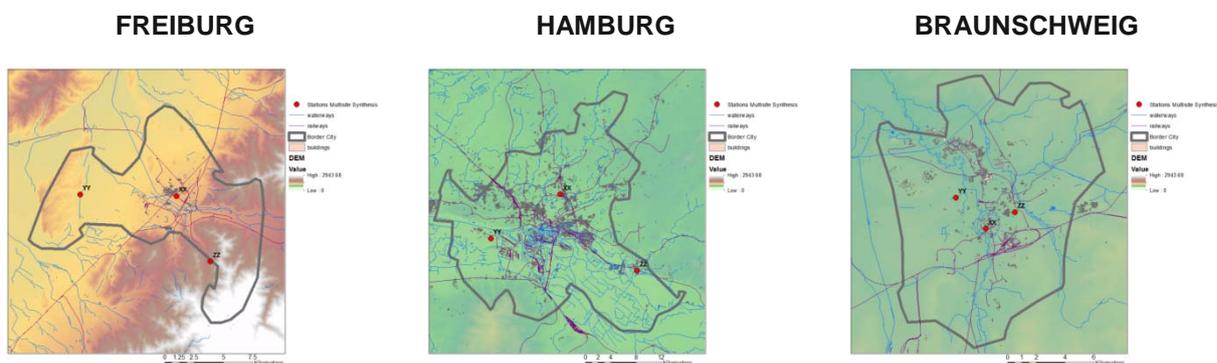
This model involves the simultaneous generation of rainfall event characteristics for several stations and is described by the following steps of calculation:

1. Identification of events from each of the observed time series. (Summer and winter events are treated separately for the whole process);

2. Comparison of time series of events for different stations and definition of events occurring simultaneously;
3. Selection of events occurring in only 1 station, 2 stations or 3 stations at the same time;
4. Calculation of percentage of events occurring at each station and percentage of events occurring at 1, 2 or 3 stations. This information is used for generating long time series of cases of events occurring at 1, 2 or 3 stations and for defining in which of the stations the events occur;
5. Fitting a Vine copula model (see Czado, 2010) to the pseudo-pairs of values (WSA, WSD) occurring at 1, 2 or 3 stations. These models are used for generating long time series of events (pseudo values) occurring at 1, 2 or 3 stations;
6. Bias correction of pseudo values for each sub-group (1, 2 or 3 stations) with respect to the probability distribution describing the total time series of events. This step is necessary since the events values (WSA and WSD) are estimated from regionalized probability distributions, which include all events;
7. Simulation of DSD for one of the 3 stations and fitting of the DSD for the other 2 stations (the station used first is not always the same);
8. Implementation of the internal model, independently for each of the stations;
9. Incorporation of marginal events which are uniformly assigned to all stations.

### 3.2.2.2 Model set up for case studies

Three stations are chosen for each of the cities to generate simultaneous events using the Vine copula method. The location of the stations is shown in the following maps (see Abbildung 3.11). Synthesis for the rest of the stations (4 Hamburg and 6 Freiburg) is done by NN (values of DSD and WSD and pseudo-values of WSA).



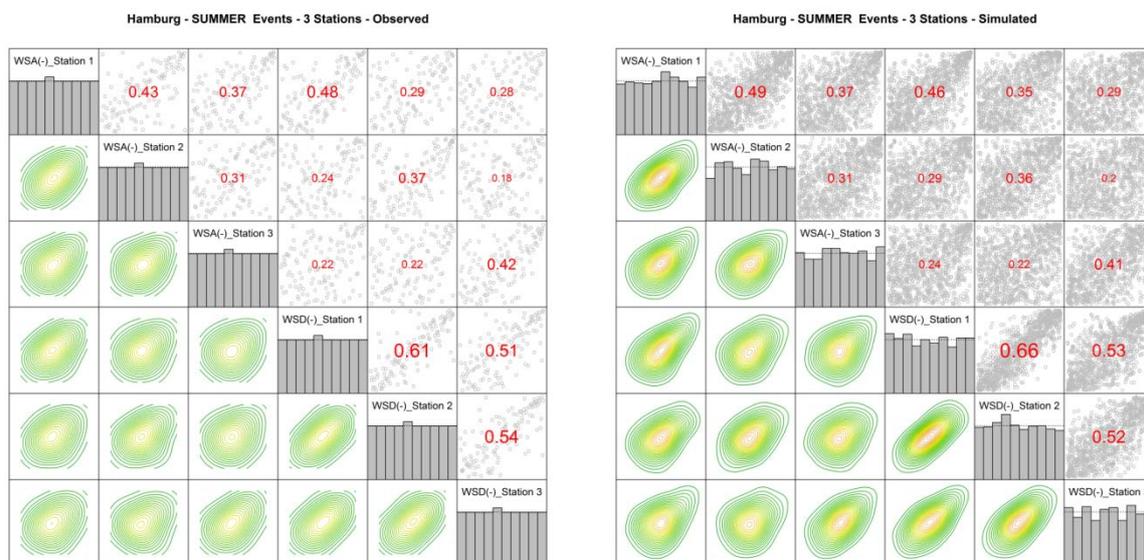
**Abbildung 3.11** Location of the target stations for the multisite synthesis with Vine copulas.

Observed percentages of events occurring at 1, 2 or 3 stations, along with percentage for each of the stations are shown in Tabelle 3.3. Braunschweig shows to have most events occurring at the 3 stations, whereas Hamburg and Freiburg this is the case for events occurring at 1 station i.e. isolated events. Events occurring at 2 stations show to have same proportion for the 3 cities. Percentages of events occurring at each of the stations are quite balanced for all stations and seasons. Only Freiburg shows to have more events occurring at station ZZ, both for summer and winter. This station is located in the mountains whereas the other two stations in the flatland. These values are used for generating long time series of events occurring at 1, 2 or 3 stations and to assign the station(s).

**Tabelle 3.3 Observed percentages of events occurring in several stations and at each station for different seasons and case studies**

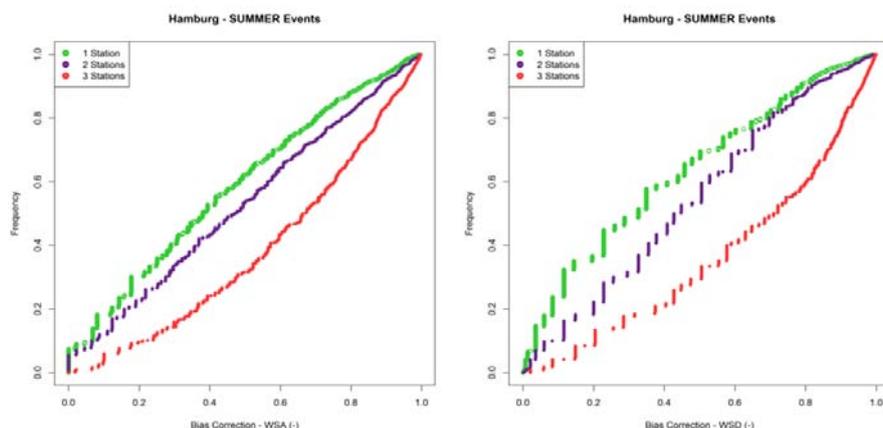
Number or ID Stations	Freiburg		Hamburg		Braunschweig	
	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer	Winter
1	55.64	62.62	62.68	63.53	32.51	34.69
2	22.83	17.25	22.99	20.16	22.41	18.44
3	21.52	20.13	14.34	16.31	45.07	46.88
XX	55.64	50.16	65.76	67.64	76.11	79.06
YY	55.12	47.92	58.89	54.38	77.09	75.31
ZZ	76.90	84.66	46.68	46.15	75.62	81.25

The Vine copula is used for simulating characteristics of events occurring at 1, 2 or 3 stations simultaneously. The different analyses are performed with the aid of the VineCopula R-packages (see Schepsmeier *et al.* 2014). An example of observed and synthetic values is shown in the following figures (see Abbildung 3.12). The WSD pseudo-values show to have a stronger correlation compared to other pairs. The joint behavior and most of the correlations of different pairs are acceptably reproduced by the Vine copula model, as can be seen in the right figure. Vine copula is used to generate long time series of pseudo-values of WSA and WSD that need to be transformed into values of WSA and WSD with the distributions describing these variables, which were described in section 3.1.1.3.



**Abbildung 3.12** Pairs of pseudo-values of event characteristics observed in 3 stations (left) and simulated values with the aid of Vine copulas (left) for Hamburg summer events. Tau Kendall correlation coefficients are shown for each pair.

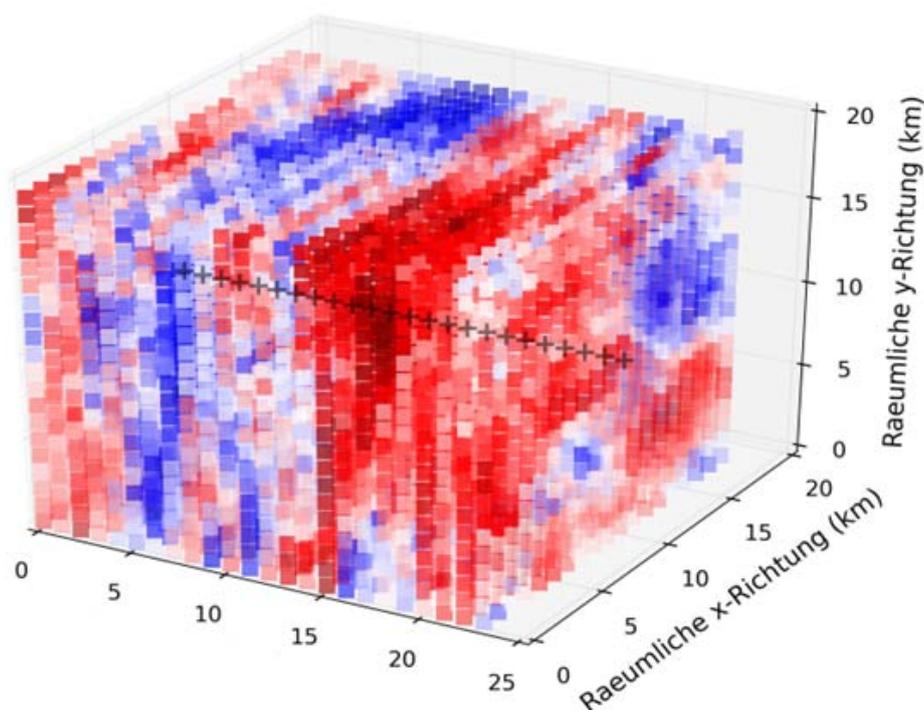
Events observed in one station, i.e. isolated events, show to be characterized by low values of WSA and WSD in comparison to the complete time series of events. On the other hand events observed in 3 stations simultaneously are usually big events with long durations and therefore big values of WSA. As regionalization is performed for the complete time series of events characteristics a Bias correction of the pseudo-values resulting from the Vine copulas is necessary. The following figures (see Abbildung 3.13) show an example of Bias correction for WSA and WSD. If the Vine copula presented before, i.e. for events occurring in 3 stations, results in a pseudo-value of WSA of 0.5, then the Bias correction indicates that a pseudo-value of 0.67 should be taken to get the value of WSA from the regionalized distribution.



**Abbildung 3.13** Bias correction of WSA (left) and WSD (left) for Hamburg summer events.

### 3.2.3 Nicht-parametrisches stochastisches N-Modell (LHG-I und LHG-II)

Die vom LHG entwickelte Copula basierte Methode (s. BÁRDOSSY UND HÖRNING, 2016) wird auch zur Simulation von stündlichen Niederschlagsfeldern für die ungleichmäßige Überregnung eingesetzt. Zunächst wird dabei mit dem Generierungsschema aus Abschnitt 3.1.2 eine punktweise 5min-Niederschlagszeitreihe generiert. Diese wird anschließend mit der Copula basierten Methode in den Raum übertragen. Dazu werden dreidimensionale Zufallsfelder (s. Abbildung 3.14) gewichtet aufsummiert bis an der Stelle der punktweise generierten Reihe (Konditionierungs-Zeitreihe) deren Niederschlagswerte getroffen werden. Die Zeitreihen an den einzelnen Gitterpunkten weisen dabei eine **räumliche und zeitliche Korrelation** auf.



**Abbildung 3.14:** Dreidimensionales zeit-räumliches Zufallsfeld mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min. Die schwarzen Kreuze stellen exemplarisch zeitliche Positionen einer Konditionierungszeitreihe dar.

Für die Betrachtung von Auswirkungen durch Ungleichberegnung sind Zugrichtungen von Niederschlagsfeldern (Advektion) von großer Bedeutung. Zur Berücksichtigung von Advektion und von unterschiedlichen Niederschlagstypen wurde ein Monte-Carlo-Ansatz gewählt, bei dem den verschiedenen Ereignissen der Konditionierungs-Zeitreihe (5min) zufällig unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen werden:

- Verschiedene räumliche Ausdehnungen der Niederschlagsfelder (5 km bis 30 km)
- Unterschiedliche Zugrichtungen der Niederschlagsfelder (N, O, S, W)
- Unterschiedliche Zugeschwindigkeiten der Niederschlagsfelder (1 km/5 min bis 4 km/5 min)

Mit diesem Monte-Carlo-Ansatz wird versucht, ein möglichst großes Spektrum an Niederschlagsfeldern zu erzeugen, um mögliche Auswirkungen der unterschiedlichen Ausprägungen abschätzen zu können.

Als Grundlage für die unterschiedlichen Zugrichtungen der Niederschlagsfelder und deren Zugeschwindigkeiten wurden zwei verschiedene Wind-Datensätze verwendet, die im weiteren Bericht als Version LHG-I und LHG-II bezeichnet werden:

LHG-I: Bodenmessdaten der dem Projektgebiet nächstgelegenen DWD Wetterstation.

LHG-II: Höhenwinde bei 850 hPa (ca. 1500 m) des dem Projektgebiet nächstgelegenen Gitterpunktes aus dem ERA-Interim (Reanalyse) Datensatz.

Im Vergleich zur LHG-I Version weisen die Winde in der LHG-II Version tendenziell größere Geschwindigkeiten auf und der Westen ist bei den Höhenwinden in allen Projektgebieten klar als Hauptwindrichtung zu erkennen.

### **3.2.4 Dynamisch-stochastisches N-Modell (IGUA)**

Hochaufgelöste Simulationen mit WRF (1 x 1 km<sup>2</sup>) können nur für kürzere Zeiträume von einem bis wenigen Jahren und für ausgewählte Gebiete (Braunschweig, Hamburg und Freiburg) in der angestrebten Auflösung durchgeführt werden. Eine angestrebte Auflösung von 1 x 1 km<sup>2</sup> und 5 Minuten über einen längeren Zeitraum von vielen Jahren kann aber mit einer Kombination von WRF-Simulationsergebnissen und stochastischen Methoden erreicht werden. Hierfür werden zusätzlich zu Niederschlags-Stationsmessungen weitere Simulationen mit WRF (1 x 1 km<sup>2</sup>) sowie Langzeitsimulationen mit WRF mit einer gröbereren räumlichen Auflösung (5 km) einbezogen.

Im Projekt wurden neue Langzeitsimulationen mit WRF über je 30 Jahre (Reanalyselauf auf Basis von ERA-Interim: 1980-2009 und zwei Klimäläufe auf Basis von RCP 4.5: 1975-2004 und 2021-2050) mit einer räumlichen Auflösung von 5 km (2 „Nesting“-Schritte: 15 km und 5 km) erstellt. Für die neuen Modellsimulationen wurde ein großes Ensemble an mindestens einjährigen WRF-Simulationen mit verschiedenen, geeigneten WRF-Physik-Schemata-Kombinationen und verschiedenen Domain-Größen generiert, um ein geeignetes WRF-Setup für die Zielregion zu finden (insbesondere in Hinblick auf den simulierten Niederschlag). Diese neuen Simulationen sollen zum einen eine „Übertragbarkeit“ der Ergebnisse der 1 km Simulationen auf lange Zeitreihen mit 5 km Auflösung ermöglichen. Zum anderen geben die Stundendaten bereits einen groben zeitlichen Niederschlagsverlauf vor, was die Disaggregation auf 5 Minuten erleichtert und liefern gleichzeitig eine advektive Komponente für den räumlich-zeitlichen Niederschlagsverlauf. Die Simulationen werden auf dem Hochleistungsrechner ForHLR I des Steinbuch Computing Centers (SCC) am KIT durchgeführt (Wagner et al, 2016).

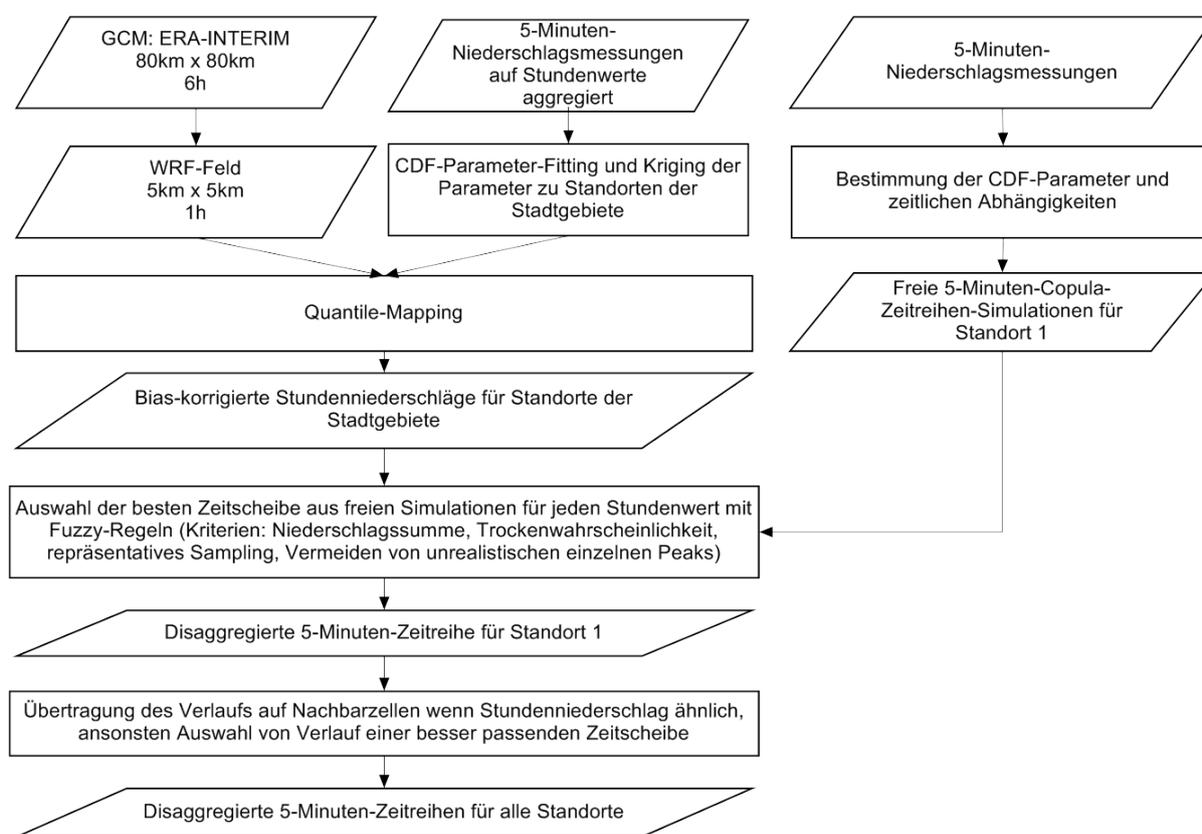
Die 1km WRF-Simulationen wurden innerhalb des SYNOPSE-Projekts am Leibniz-Rechenzentrum in München auf einem Großrechner (Linux-Cluster) gerechnet. Als Input wird der ERA-Interim-Datensatz (Nachfolger von ERA-40) verwendet. Um eine möglichst gute Vergleichsdatenbasis hinsichtlich Stationsdaten mit hoher zeitlicher Auflösung und gegebenenfalls Radardaten zu gewährleisten, wurde als Startzeitpunkt das Jahr 2005 gewählt. Der ERA-Interim-Datensatz liegt alle 6 Stunden mit einer Gitterweite von etwa 80 x 80 km vor. Über drei „Nesting“-Schritte (15 km – 5 km – 1 km) wird die gewünschte Auflösung erzielt. In der feinen Auflösung (1 km) werden dann ausschließlich die ausgewählten Großräume (Braunschweig, Hamburg und Freiburg) modelliert. Die Modellgebiete haben eine Größe zwischen 22500 km<sup>2</sup> und 35200 km<sup>2</sup>. Die Modellparametrisierung orientiert sich an den Langzeitsimulationen mit WRF mit 5 km Maschenweite. Zusätzlich wird jedoch ein Stadtmodell verwendet, um das urbane Wettergeschehen besser simulieren zu können. Dazu wurde die Landnutzung für „urbane Pixel“ mit Hilfe von CORINE-Landnutzungsdaten weiter verfeinert. Kriterien für eine gute Parametrisierung ist die mittlere Niederschlagsverteilung (inklusive Niederschlagsjahressumme) und die Jahresmitteltemperatur über ganz Deutschland auf Basis der 5 km-Auflösung mit

einem Vergleichsdatensatz. Zudem wird die Niederschlagsverteilung und punktuell der zeitliche Niederschlagsverlauf (im Vergleich mit Stationsdaten) auf Basis der 1 km-Auflösung als Bewertungskriterium verwendet.

Um die 5x5 km und stündlichen WRF-Niederschlagsdaten auf einem Gitter von 1x1 km in 5-minütiger Auflösung bereitzustellen, muss der stochastische Modellteil sowohl eine realistische zeitliche wie auch räumliche Korrelation der erstellten synthetischen Niederschlagsdaten gewährleisten. Dazu wurde ein stochastisches Downscaling-Konzept auf Grundlage von van den Berg et al. (2011) entwickelt. Dieses Modell nutzt die bivariaten Abhängigkeitsstrukturen zwischen dem grobskaligen Niederschlagswert einer Zelle und den feinskaligen Werten der Zellen, die sich innerhalb der grobskaligen Zelle befinden. Diese bivariate Modellierung ist allerdings nicht in der Lage, die räumlichen Abhängigkeiten zwischen den feinskaligen Werten zu erhalten, da diese räumlich unabhängig voneinander simuliert werden. Deswegen wurde das Modell dahingehend verändert, dass die feinskaligen Werte in Abhängigkeit mehrerer grobskaliger Nachbarwerte und bereits simulierter feinskaliger Werte generiert werden. Das Verfahren nutzt die Gauss-Copula und simuliert für jeden Standort ein Ensemble möglicher Niederschlagswerte (Bárdossy und Li 2008). Die Auswahl des besten Ensembles erfolgt anhand des Mittelwerts aller feinskaligen Werte, die in einer grobskaligen Zelle liegen.

Dieser stochastische Disaggregierungs- und Downscalingansatz ist jedoch sehr rechenintensiv. Für die ungleichmäßige Überregnung waren für die hydraulischen Berechnungen lediglich Zeitreihen von drei (Braunschweig), sieben (Hamburg) bzw. neun Stationen (Freiburg) gefordert. Deshalb wurde ein einfacheres Modell für die Erstellung der Niederschlagsinputdaten für die ungleichmäßige Überregnung erstellt. Die Station für die gleichmäßige Überregnung wird zunächst als Masterstation gewählt. An diesem Standort werden nun mit Hilfe des stochastischen Modells der Endversion von Punktdaten synthetische Zeitreihen in 5-minütiger Auflösung generiert. Im Unterschied zu den vorherigen Versionen wurden bias-korrigierte Stundenwerte der neuen 5 km WRF-Läufe disaggregiert. Die Auswahl des am besten passenden Ausschnitts erfolgt erneut über Fuzzy-Regeln. Aus den freien 5-Minuten-Simulationen wird die Abfolge von zwölf 5-Minuten-Werten verwendet, welche in der Summe am besten zu dem Stundenwert passt, noch nicht zu oft verwendet worden ist und eine plausible Niederschlagswahrscheinlichkeit aufweist. Sofern der

Stundenwert eines anderen Standorts vom Stundenwert der Master-Station um weniger als 5 mm abweicht, wird der relative Verlauf auf diesen Stundenwert aufgeprägt (Segond 2006). Sollten größere Unterschiede zwischen den Stundenwerten zweier Standorte bestehen, erfolgt die Disaggregation für die weiteren Standorte unabhängig von der Masterstation, um unrealistische Niederschlagszeitreihen zu verhindern. Die advective Komponente wird, wie oben beschrieben, über die räumlich- und zeitlich-korrelierten WRF-Stundenwerte geliefert. Eine Übersicht über das dynamisch-stochastische Niederschlagsmodell der Universität Augsburg für Flächendaten gibt das Flussdiagramm in Abbildung 3.15.



**Abbildung 3.15 Flussdiagramm des dynamisch-stochastischen Niederschlagsmodells der Universität Augsburg für Flächendaten.**

### 3.3 Ergebnisse

Die verschiedenen Niederschlagsmodelle erzeugen alle langjährige Zeitreihen in 5-min-Auflösung, jedoch jeweils mit unterschiedlicher Gesamtlänge. Während das Downscaling-Modell (IGUA) aufgrund der verwendeten großräumigen Klimadaten sowohl für gegenwärtiges als auch für zukünftiges Klima auf 30 Jahre festgelegt ist, können die beiden anderen Modelle (WAWI und LHG) aufgrund ihrer stochastischen Natur Zeitreihen mit beliebiger Länge erzeugen. Daher erfolgt der Vergleich der synthetischen Niederschläge auf Basis unterschiedlicher Zeitreihenlängen.

Vor ihrer Verwendung in der Kanalnetzmodellierung werden zunächst die Niederschläge als solches untereinander und mit beobachteten Zeitreihen verglichen. Der Vergleich erfolgt für drei Arten von Niederschlagscharakteristiken, die jede für sich unterschiedliche Aussagen über die synthetischen Niederschläge erlauben. Zusammengenommen ergeben sie ein umfassendes Bild über die Fähigkeit der verschiedenen Modelle, Niederschlagszeitreihen mit vergleichbaren Strukturen wie in den Beobachtungsdaten zu erzeugen. Die drei Arten der Niederschlagscharakteristiken sind der Vergleich auf Basis definierter Niederschlagsereignisse, die Analyse des Zeitreihenkontinuums und die Extremwertanalyse. Letztere ist für die Anwendung der Niederschläge in der Stadthydrologie von besonderer Bedeutung. Im Folgenden werden die ereignisbasierten und kontinuierlichen Ergebnisse sowie die Extreme beispielhaft gezeigt. Abschließend wird in Abschnitt 3.3.4 eine Bewertungsmatrix gezeigt, welche alle Ergebnisse beinhaltet und diskutiert wird.

#### 3.3.1 Ereignisbasierter Vergleich

Niederschlagszeitreihen bestehen aus Niederschlagsereignissen, die durch dazwischenliegende Trockenintervalle voneinander abgegrenzt werden können. Die Höhe, Dauer und der zeitliche Verlauf eines Ereignisses bestimmen, welche Auswirkungen der Niederschlag in einem städtischen Kanalnetz hervorruft. Für die Niederschlagsmodelle ist es somit wichtig, in den synthetischen Zeitreihen Ereignisse zu erzeugen, die von ihrer Struktur und von ihren Charakteristiken denen in einer beobachteten Zeitreihe gleichen. Für die Ereignisermittlung werden zwei

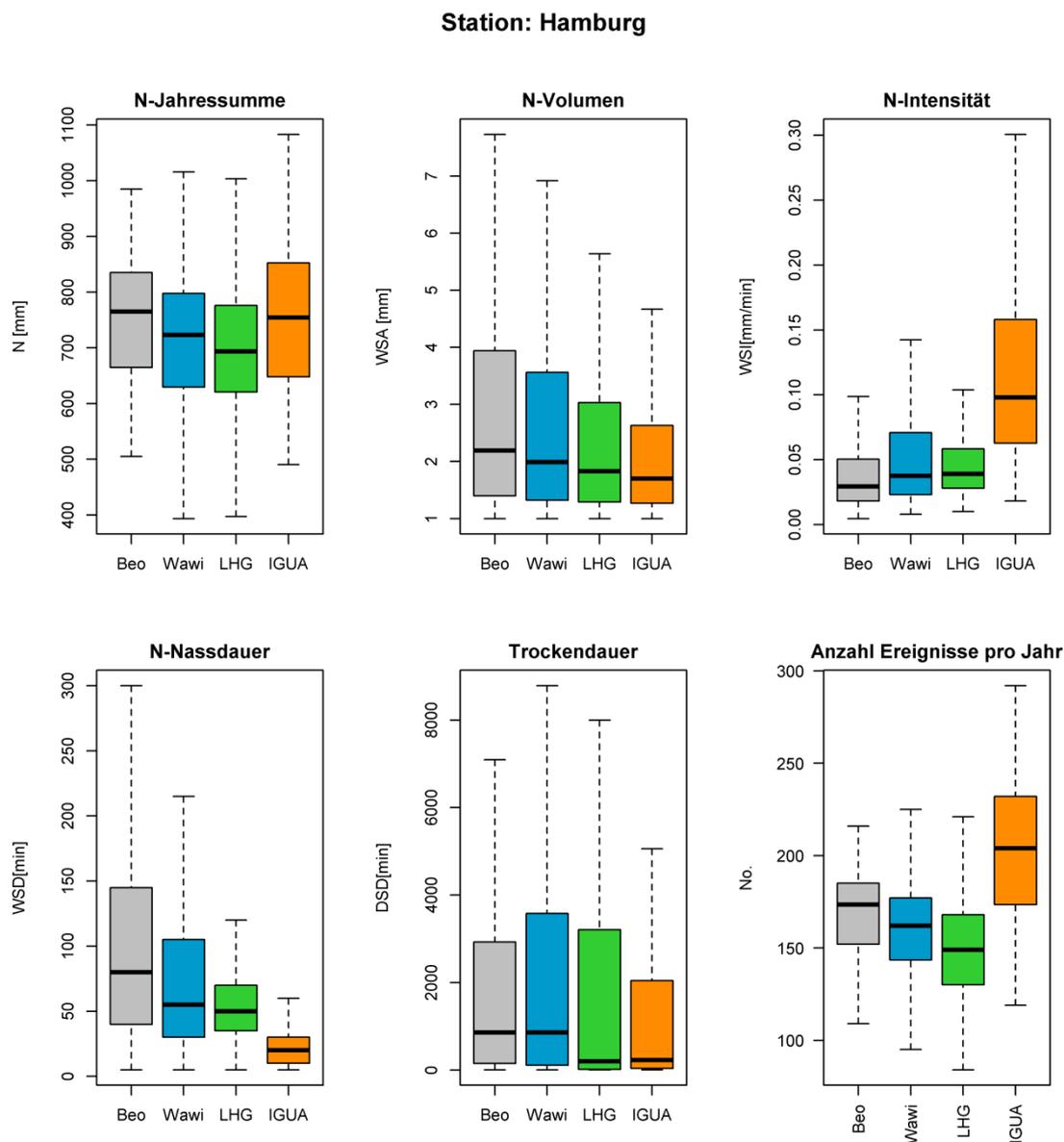
verschiedene Typdefinitionen verwendet. Bei Typ 1 werden alle Ereignisse berücksichtigt, welche eine Mindestniederschlagshöhe von 1.0 mm aufweisen. Als Ereignistrennzeit werden 5 min gewählt, das Trockenäquivalent ist 0.01 mm/5 min. Bei Typ 2 werden nur die Ereignisse berücksichtigt, von denen eine höhere Belastung des Entwässerungssystems erwartet wird. Die Mindestniederschlagshöhe beträgt 1.5 mm bei einem Trockenäquivalent von 0.1 mm/5 min. Um die Unabhängigkeit der Regenereignisse zu garantieren, wird die Ereignistrennzeit netzspezifisch ausgewählt, sodass das vorherige Ereignis bereits das Entwässerungssystem verlassen hat und keinen Einfluss auf den Abfluss des aktuellen Ereignisses hat. Die Ereignistrennzeit beträgt für Braunschweig und Hamburg-Innenstadt 8 h, für Freiburg und Hamburg-Harburg 4 h.

Abbildung 3.16 zeigt die Spannweite einiger Ereignischarakteristika aller Niederschlagsereignisse (Typ 1) anhand von Boxplots für die beobachtete Zeitreihe und die vier N-Modelle am Standort Hamburg. Dabei stellt der schwarze Balken den Median dar, die Box die mittleren 50% aller Werte (begrenzt durch das obere und untere Quartil, also 75% bzw. 25% aller Werte) und die Antennen besitzen eine Länge von maximal der 1,5-fachen Boxhöhe (Interquartilsabstand). Ausreißer über oder unter der maximalen Antennenlänge sind nicht dargestellt. In Abbildung 3.17 sind die Ergebnisse bei ausschließlicher Berücksichtigung der größeren Ereignisse (Typ 2) dargestellt.

Abbildung 3.18 zeigt für die in Freiburg betrachteten synthetischen Niederschläge und die gemessenen Niederschläge die berechneten Mittelwerte, Standardabweichungen und Schiefen der vier Kenngrößen Volumen, Intensität und Dauer der Ereignisse sowie die zwischen zwei Ereignissen liegende Trockendauer. In Abbildung 3.19 sind für den Untersuchungsraum Braunschweig die monatlichen Unterschiede im Jahresverlauf einiger Kennwerte für alle Niederschlagsreihen vergleichend dargestellt.

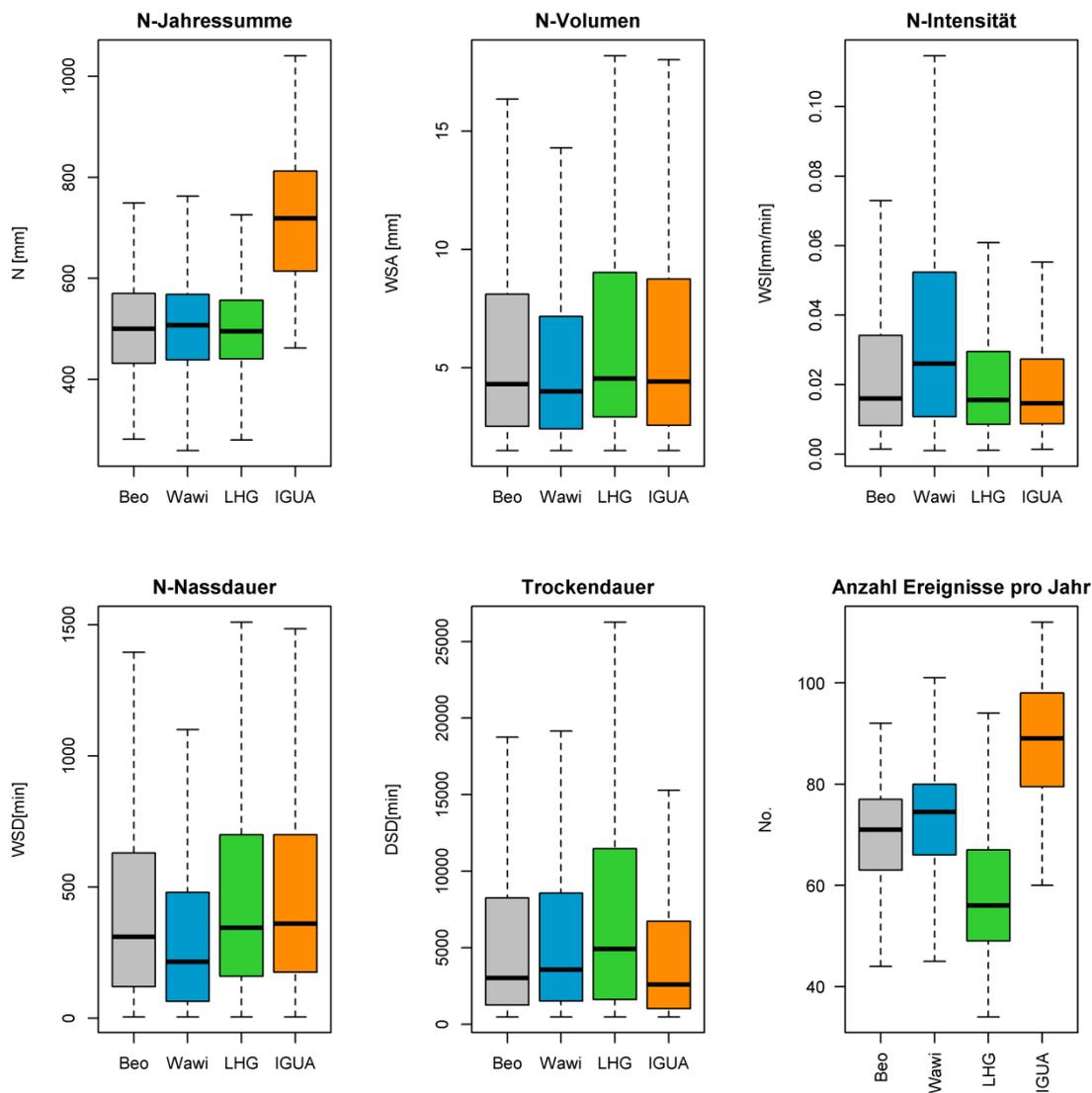
Aus den vier Grafiken sind mehrere Dinge ersichtlich. Einerseits weisen die Differenzen zwischen den verschiedenen synthetischen Reihen und der Beobachtung für verschiedene Charakteristiken unterschiedliche relative Spannweiten auf. Dies bedeutet, dass einige Charakteristiken generell einfacher nachzubilden sind (alle Modelle treffen relativ gut) als andere (mehrere Modelle

weichen stärker ab, Abweichungen in unterschiedliche Richtungen). Andererseits zeigt sich, dass von jedem Modell einige Charakteristiken sehr gut wiedergegeben werden, während anderswo Schwächen vorhanden sind. Dies sind bei jedem Modell unterschiedliche Charakteristiken.

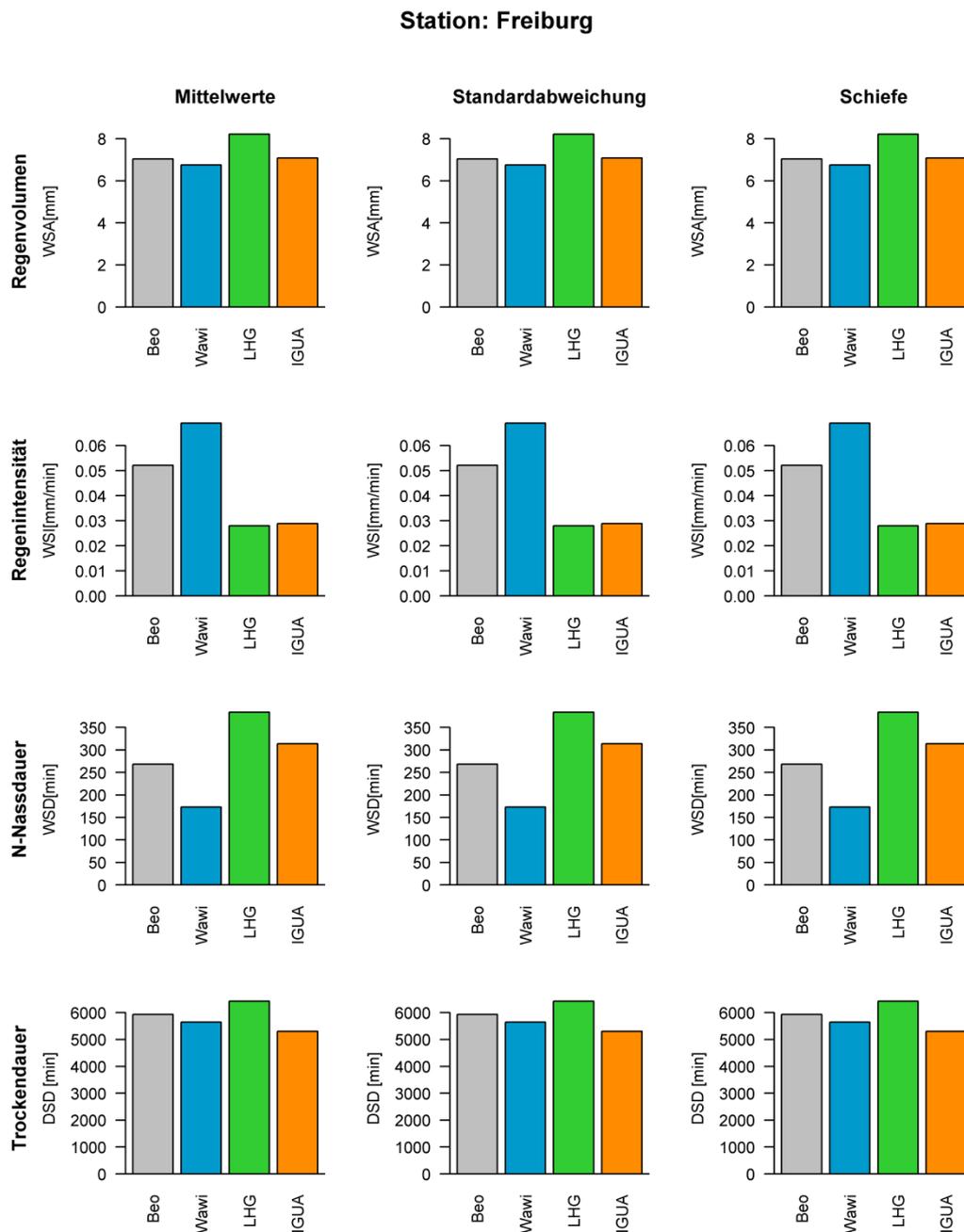


**Abbildung 3.16 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand verschiedener Ereignischarakteristika (Typ 1)**

**Station: Hamburg**

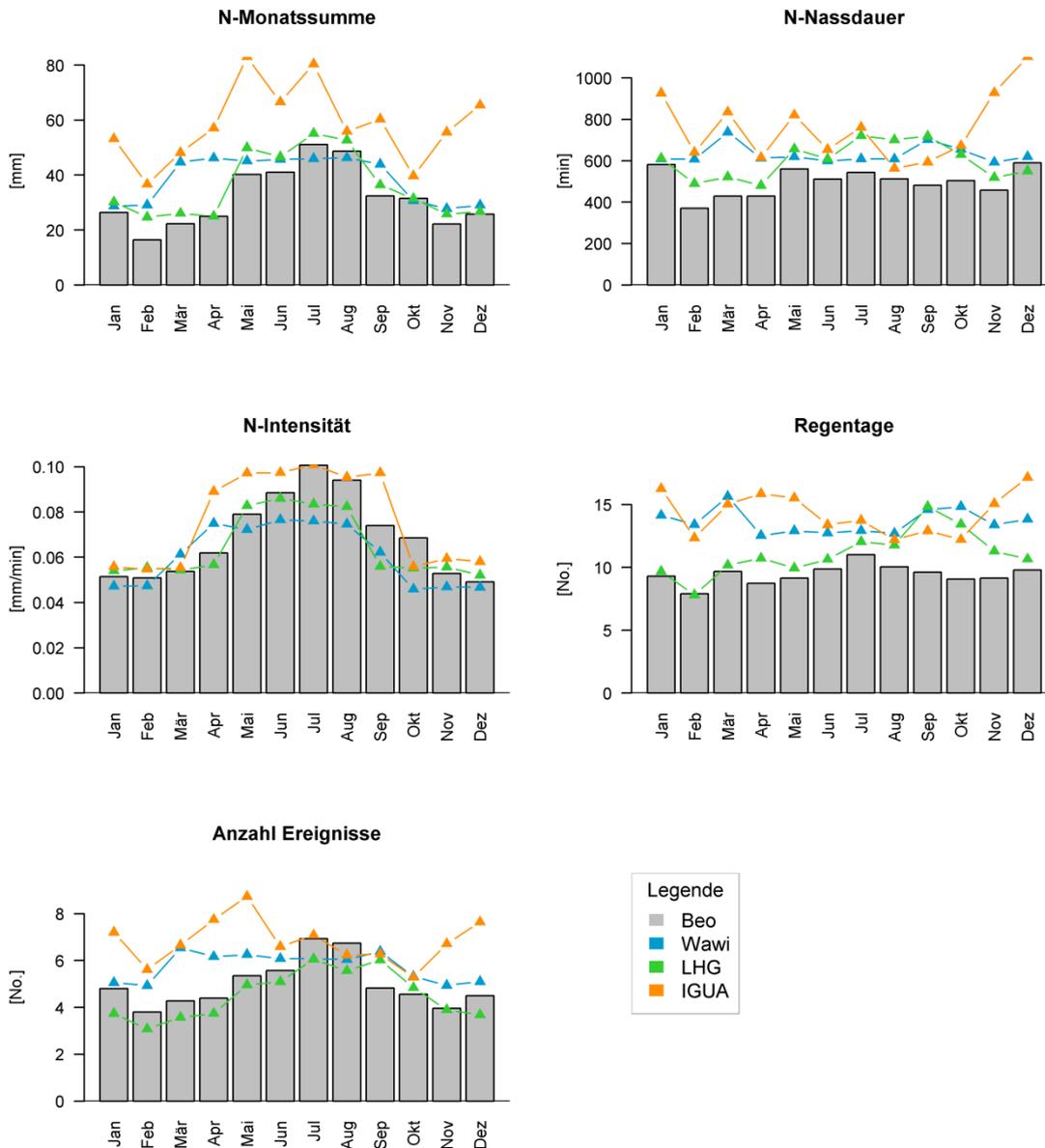


**Abbildung 3.17 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand verschiedener Ereignischarakteristika (Typ 2)**



**Abbildung 3.18** Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand von Mittelwert (links), Standardabweichung (Mitte) und Schiefe (rechts) der vier Kenngrößen Ereignisvolumen, -intensität, -dauer und Trockendauer(Typ 1)

**Station: Braunschweig**



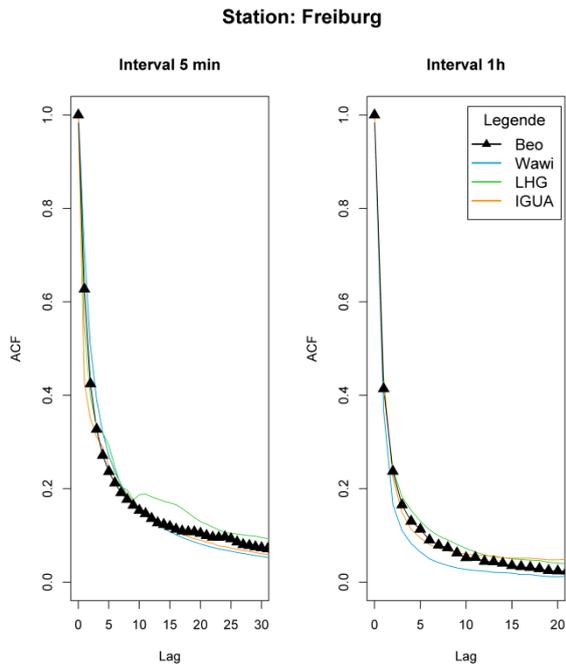
**Abbildung 3.19 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand monatlicher Kenngrößen (Typ 2)**

**3.3.2 Analyse des Niederschlagskontinuums**

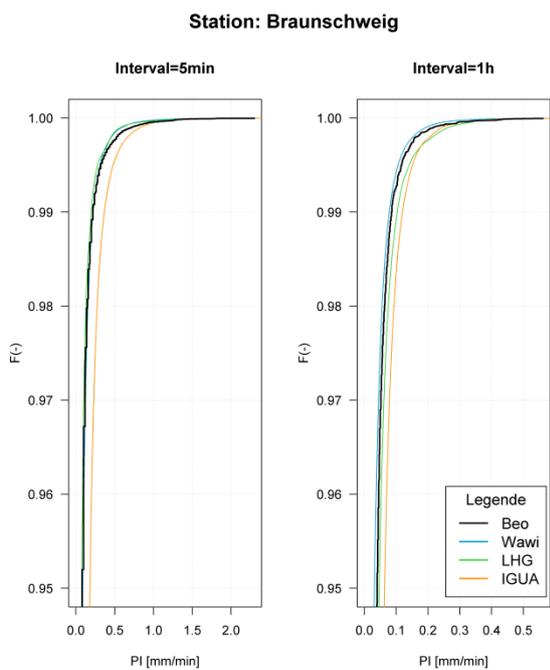
Im Gegensatz zum ereignisbasierten Vergleich, bei dem die Auswertung an definierte Ereignisse geknüpft ist, werden bei der Analyse des Niederschlagskontinuums Kennwerte ermittelt, die die gesamte Niederschlagszeitreihe inklusive der trockenen Zeitschritte charakterisieren. In Abbildung 3.20 ist die Autokorrelation in Abhängigkeit

des Lag für zwei Aggregationsstufen dargestellt. Lag bedeutet hier die Entfernung der beiden in der Autokorrelation miteinander verglichenen Zeitschritte (bei Lag 1 werden benachbarte Zeitschritte verglichen, bei Lag 10 liegen neun Zeitschritte dazwischen). Man sieht, dass auf der relevanten 5-min-Basis die Autokorrelation von einigen Modellen überschätzt und von anderen unterschätzt wird. Eine Überschätzung bedeutet eine zu gleichmäßige Zeitreihe, also einen zu geringen Wechsel zwischen Nass und Trocken und eine zu geringe Variabilität in der Niederschlagshöhe im Verlauf eines Ereignisses. Eine Unterschätzung bedeutet entsprechend eine Zeitreihe mit zu großer Variabilität.

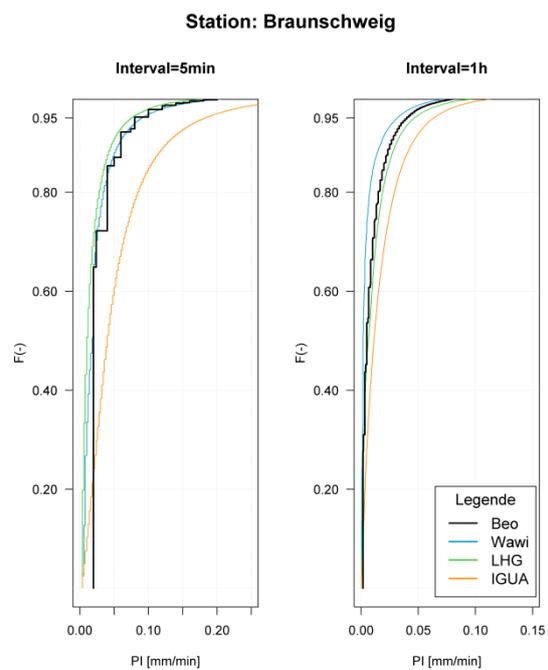
Die folgenden Abbildungen zeigen kumulative Verteilungsfunktion der Intensitäten der Niederschlagszeitreihen, wieder für die Aggregationsstufen 5 min und 1 h. Zur besseren Darstellung wurden die Verteilungsfunktionen in einen oberen Abschnitt ( $F \geq 0,95$ , Abbildung 3.21) und einen unteren Abschnitt ( $F \leq 0,95$ , Abbildung 3.22) geteilt. Eine Lage links/oberhalb der Beobachtung bedeutet für eine Zeitreihe zu niedrige Intensitäten in diesem Bereich, ein Verlauf rechts/unterhalb der Beobachtung entsprechend eine Überschätzung der Intensitäten. Im Unterschied zu den Grafiken in Kapitel 3.3.1, in denen die Intensität ebenfalls enthalten ist, erlaubt die Darstellung der Verteilungsfunktionen die Analyse, ob die Intensität im gesamten Wertebereich gleichmäßig über- oder unterschätzt wird, oder ob es Unterschiede in der Anpassung in verschiedenen Intensitätsbereichen gibt. Beispielsweise zeigt die Verteilungsfunktion des Wawi-Niederschlags bei 5 min eine Unterschätzung der Beobachtungswerte bis zu einer Intensität von 0,05 mm/min, danach aber sehr gute Anpassung an die höheren Intensitäten.



**Abbildung 3.20 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand der Autokorrelation**



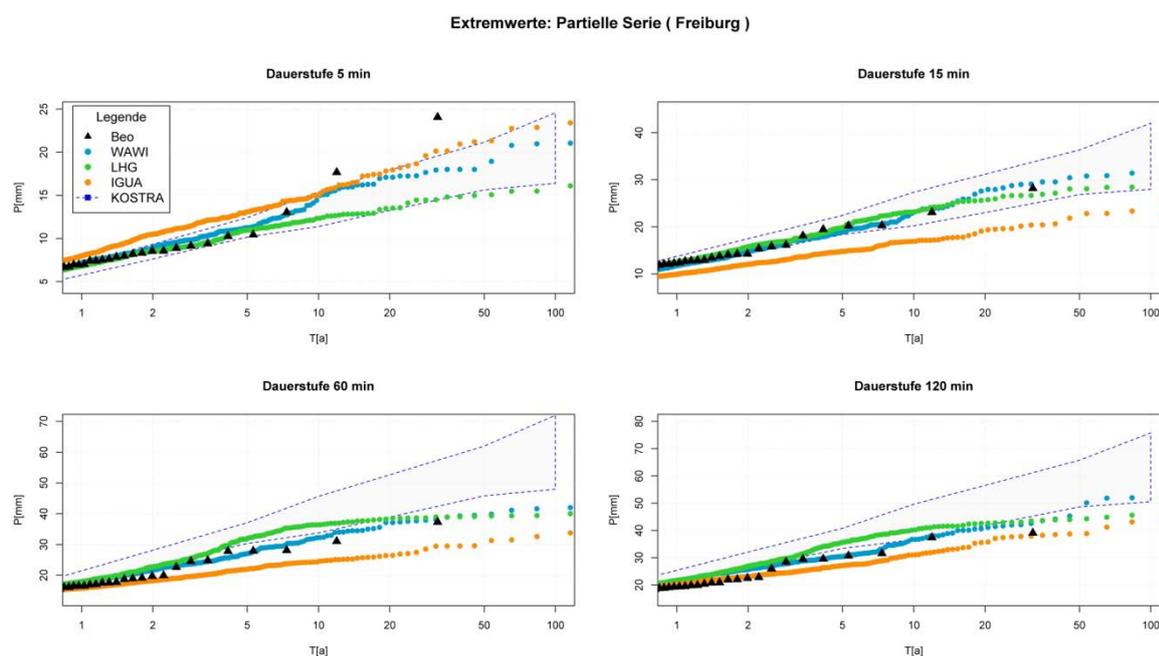
**Abbildung 3.21 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand der kumulativen Verteilungsfunktionen der Intensitäten, oberer Abschnitt**



**Abbildung 3.22 Vergleich der synthetischen Niederschläge mit Beobachtungsdaten anhand der kumulativen Verteilungsfunktionen der Intensitäten unterer Abschnitt**

### 3.3.3 Extremwertanalyse

Der Extremwertanalyse kommt für den Anwendungszweck der im Rahmen des Projektes generierten Niederschläge besondere Bedeutung zu. Es sind die Extremereignisse, die für die Bemessung von Kanalnetzen herangezogen werden und die Auskunft darüber geben, mit welcher Häufigkeit mit einer Überlastung des Systems zu rechnen ist. Somit lässt sich sagen, dass die künstlichen Niederschläge nur dann ihren Zweck im Rahmen des Projektes erfüllen, wenn sie in der Lage sind, die Höhe und Verteilung der Extremwerte gut nachzubilden.



**Abbildung 3.23** Partielle Serien der Extremwerte der synthetischen Niederschläge und der Beobachtungsdaten im Vergleich zu KOSTRA

Abbildung 3.23 zeigt die partiellen Serien der Extremwerte für vier verschiedene Dauerstufen, berechnet nach DWA-Arbeitsblatt 531. Im Vergleich dazu sind die entsprechenden Werte des KOSTRA-Atlas inklusive Unsicherheitsbandbreite dargestellt, die aktuell in der Praxis oft für die Bemessung herangezogen werden. Während sich bei einer Dauerstufe von 5 min kein einheitliches Bild erkennen lässt, ist für 15 min eine gute Übereinstimmung der synthetischen (wawi, LHG) und beobachteten Extremwerte zu erkennen. Bei 60 und 120 min wird deutlich, dass KOSTRA die Beobachtungsdaten überschätzt. Die synthetischen Niederschläge zeigen im Vergleich zu KOSTRA geringere Extremwerte für die hohen

Wiederkehrintervalle und liegen dichter an den Beobachtungswerten, ohne sie zu unterschätzen (siehe 120 min, Abbildung 3.23).

### **3.3.4 Zusammenfassende Auswertung der Niederschlagscharakteristiken**

Die Auswertung der in Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.4 erwähnten Kriterien wurde für alle Untersuchungsgebiete sowohl für die punktuelle als auch für die räumliche Niederschlagsgenerierung durchgeführt. Da für die Niederschlagsgenerierung im Raum die Modelle verändert bzw. weitere Modelle verwendet wurden, wurden die räumlich generierten Niederschlagsdatensätze erneut mittels der Referenzstation validiert. Es ergeben sich für die räumlichen Niederschlagsdatensätze jeweils zwei Versionen für WAWI und LHG und eine Version für IGUA.

In Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse zusammenfassend für die Niederschlagsgenerierung am Punkt dargestellt. Zunächst ist wieder ersichtlich, dass sich die Stärken und Schwächen der Niederschlagsmodelle in unterschiedlichen Niederschlagscharakteristiken widerspiegeln. So führen die LHG-Niederschläge zu einer guten Abbildung der Autokorrelation, da diese im Generierungsprozess involviert ist. Extremwerte der Dauerstufen 15, 60, 120, 240, 360 und 480 min können durch die WAWI-Niederschläge sehr gut für alle betrachteten Wiederkehrintervalle abgebildet werden. Die Ergebnisse zeigen eine starke regionale Abhängigkeit. So können die Beobachtungsdaten durch die LHG-Niederschläge am besten in Braunschweig abgebildet werden. Bei IGUA wird Freiburg hingegen am besten abgebildet.

Tabelle 3.5 enthält die Validierungsergebnisse der räumlichen Niederschläge. Es werden nur die Ergebnisse dargestellt, welche nicht bereits in Tabelle 3.4 enthalten sind, da sich die Ergebnisse einer Version im Vergleich zu den Punktniederschlägen nicht ändern. Es erfolgte ebenfalls eine Validierung über bivariate Kriterien, welche im Anhang zu finden ist (Tabelle 7.1).

**Tabelle 3.4 Validierungsergebnisse der Punktniederschläge**

N-seitige Zielgrößen		WAWI – V1				LHG – V2				IGUA – V1			
		HH Innenstadt	HH- Harburg	Braun- schweig	Frei- burg	HH- Innenstadt	HH- Harburg	Braun- schweig	Frei- burg	HH- Innenstadt	HH- Harburg	Braun- schweig	Frei- burg
IDF-Curves (T = 2 a)	Bias	0%	4%	-2%	4%	0%	10%	4%	11%	6%	17%	8%	-4%
	RMSE	3%	6%	7%	8%	3%	11%	4%	12%	12%	22%	20%	8%
IDF-Curves (T = 5 a)	Bias	9%	7%	0%	-2%	-2%	14%	-5%	10%	1%	12%	7%	-7%
	RMSE	12%	8%	8%	3%	10%	17%	9%	12%	7%	16%	23%	15%
IDF-Curves (T = 10 a)	Bias	14%	1%	-5%	-2%	-6%	0%	-16%	5%	2%	1%	-3%	-10%
	RMSE	19%	3%	9%	7%	8%	7%	20%	8%	14%	11%	14%	17%
IDF-Curves (T = 20 a)	Bias	17%	8%	6%	11%	-11%	0%	-16%	11%	6%	7%	2%	0%
	RMSE	20%	9%	9%	14%	12%	9%	19%	13%	19%	15%	11%	14%
Ereignisse Typ I	<u>Jahres-P</u> Bias	-6%	5%	8%	2%	-8%	7%	1%	2%	-1%	7%	25%	2%
	<u>WSA</u> Bias	-8%	-10%	6%	4%	-23%	-24%	-6%	-17%	-32%	-33%	-20%	-8%
	<u>WSD</u> Bias	-28%	-32%	21%	22%	-51%	-54%	5%	-14%	-80%	-81%	-54%	-17%
	<u>DSD</u> Bias	8%	-6%	-14%	-4%	17%	-2%	-3%	-4%	-13%	-22%	-39%	-3%
Ereignisse Typ II	<u>Jahres-P</u> Bias	0%	14%	24%	7%	-1%	18%	15%	7%	42%	57%	88%	14%
	<u>WSA</u> Bias	-10%	-6%	-7%	-4%	19%	18%	14%	17%	15%	17%	28%	1%
	<u>WSD</u> Bias	-30%	-38%	-31%	-36%	21%	36%	9%	43%	12%	28%	29%	17%
	<u>DSD</u> Bias	-1%	-9%	-17%	-5%	20%	-3%	2%	8%	-21%	-29%	-34%	-11%
Autokorrelation (5min)	Bias (lag1)	7%	4%	14%	14%	-23%	-24%	-16%	-12%	-39%	-42%	-31%	-32%
	Bias (lag1-lag25)	-15%	-20%	-19%	-4%	-3%	-3%	4%	21%	-35%	-38%	-21%	-5%
Autokorrelation (1h)	Bias (lag1)	-16%	-19%	-23%	-12%	-11%	-13%	-9%	0%	-25%	-26%	-23%	6%
	Bias (lag1-lag5)	-31%	-32%	-38%	-26%	-3%	-4%	-10%	8%	1%	1%	21%	-7%

**Tabelle 3.5 Validierungsergebnisse der räumlichen Niederschläge**

N-seitige Zielgrößen		WAWI - V2			LHG - V1			IGUA - V2			
		Hamburg	Braunschweig	Freiburg	Hamburg	Braunschweig	Freiburg	Hamburg	Braunschweig	Freiburg	
IDF-Curves (T = 2 a)	Bias	-19%	-9%	-1%	7%	-8%	14%	15%	18%	32%	
	RMSE	19%	11%	13%	8%	9%	16%	18%	29%	35%	
IDF-Curves (T = 5 a)	Bias	-22%	-18%	-15%	-1%	-13%	13%	20%	17%	23%	
	RMSE	22%	18%	16%	12%	16%	14%	26%	23%	29%	
IDF-Curves (T = 10 a)	Bias	-25%	-28%	-19%	-8%	-22%	6%	25%	7%	23%	
	RMSE	26%	29%	20%	10%	26%	10%	35%	11%	26%	
IDF-Curves (T = 20 a)	Bias	-27%	-23%	-7%	-14%	-18%	11%	15%	9%	27%	
	RMSE	27%	24%	15%	15%	21%	14%	26%	13%	29%	
Ereignisse Typ I	Jahres-P	Bias	8%	23%	9%	-11%	-3%	-5%	-4%	20%	-2%
	WSA	Bias	-13%	2%	1%	-24%	-10%	-17%	-28%	-16%	3%
	WSD	Bias	-34%	15%	15%	-48%	12%	-9%	-66%	-30%	20%
	DSD	Bias	-16%	-30%	-15%	-4%	-25%	-17%	10%	-20%	4%
Ereignisse Typ II	Jahres-P	Bias	19%	45%	16%	11%	31%	17%	11%	43%	-3%
	WSA	Bias	-13%	-11%	-13%	-3%	-12%	-1%	12%	25%	24%
	WSD	Bias	-30%	-30%	-45%	-7%	-25%	13%	1%	19%	4%
	DSD	Bias	-22%	-34%	-20%	-15%	-33%	-18%	0%	-16%	28%
Autokorrelation (5min)	Bias (lag1)	4%	13%	11%	-19%	-12%	-10%	-18%	-7%	-13%	
	Bias (lag1-lag25)	-22%	-26%	-29%	-4%	2%	21%	23%	51%	32%	
Autokorrelation (1h)	Bias (lag1)	-19%	-27%	-27%	-16%	-13%	-2%	14%	15%	6%	
	Bias (lag1-lag5)	-33%	-46%	-47%	-12%	-18%	0%	5%	11%	3%	

### **3.3.5 Fazit**

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass es sich bei den natürlichen Niederschlagsprozessen um hoch nichtlineare und hoch komplexe Vorgänge handelt. Eine exakte Nachbildung dieser Prozesse durch die Niederschlagsmodelle ist eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe und es ist unumgänglich, viele Kriterien zur Beurteilung der Güte der synthetischen Niederschläge heranzuziehen. Es zeigt sich, dass eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten in einem Kriterium nicht automatisch bedeutet, dass auch ein anderes Kriterium gut getroffen ist. Dies gilt für alle betrachteten Niederschlagsmodelle. Noch weniger ist es möglich, aus der Güte in den Niederschlagsvergleichskriterien auf die Eignung und Güte für die Kanalnetzmodellierung zu schließen, wie vorherige Untersuchungen in einem künstlichen Testgebiet gezeigt haben. Eine generell gute Nachbildung der Niederschlagscharakteristiken muss nicht auch eine gute Nachbildung des Überstaugeschehens im Kanalnetz bedeuten und umgekehrt. Dies bedeutet, dass die Validierung der synthetischen Niederschläge anhand von Kanalnetzsimulationen, wie im Projekt SYNOPSE von den Praxispartnern durchgeführt, unabdingbar für die Beurteilung der Niederschläge ist.

Von allen Niederschlagsmodellen können gute Ergebnisse hinsichtlich der Niederschlagscharakteristiken erzielt werden. Dabei zeigen die Modelle unterschiedliche Stärken und Schwächen, so dass die Wahl eines besten Modells weder sinnvoll noch möglich erscheint. Ebenso kann keines der Modelle als untauglich ausgeschlossen werden. Eine abschließende Beurteilung hinsichtlich der Güte der Niederschlagsmodelle ist nur mittels urbanhydrologischer Modellierung in den Untersuchungsgebieten möglich.

## 4 Kanalnetzrechnungen

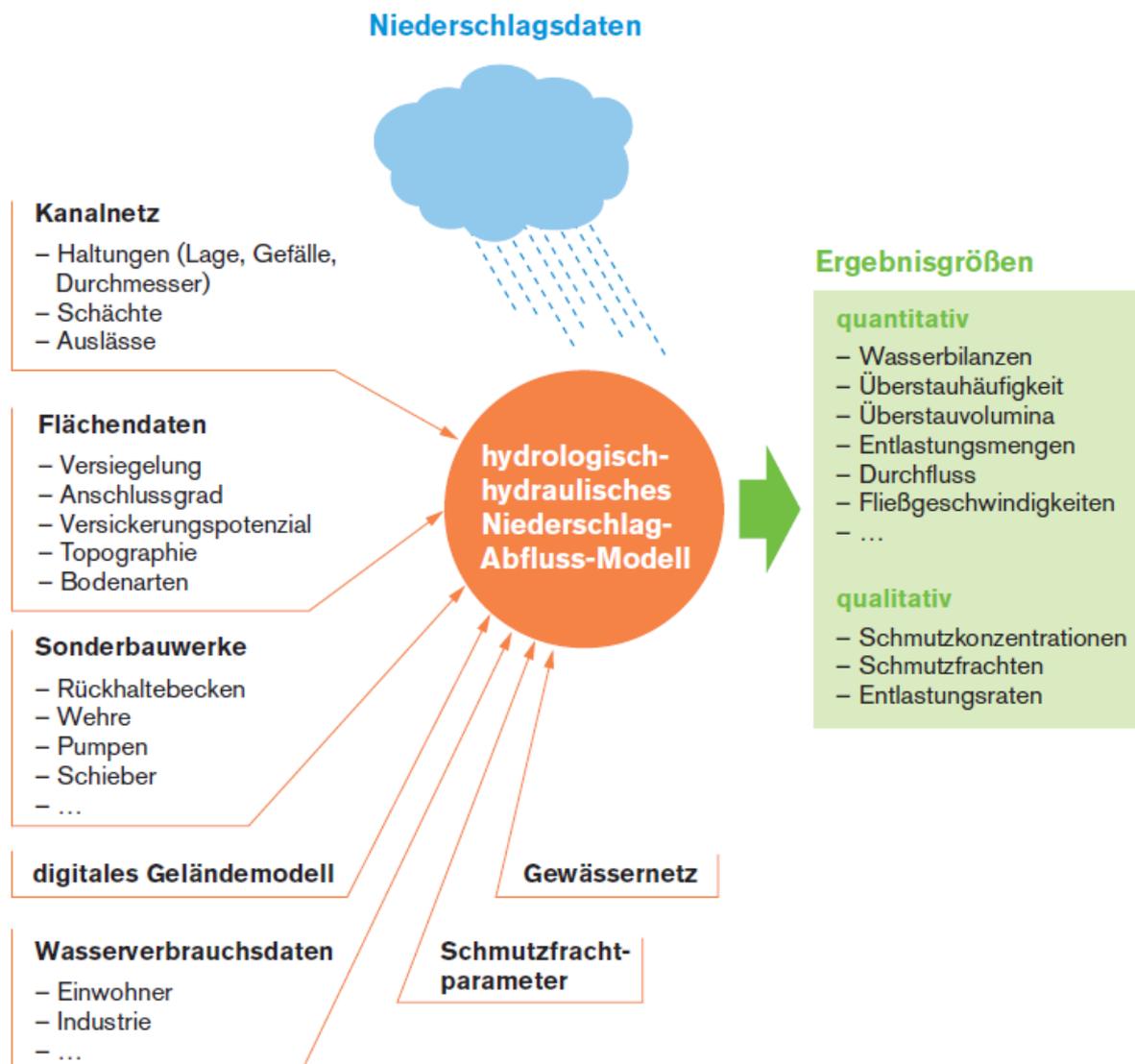
Um die von den Universitäten erzeugten synthetischen Zeitreihen auf ihre Anwendbarkeit für die Praxis zu testen, werden die Zeitreihen für Kanalnetzrechnungen der Untersuchungsgebiete Freiburg, Braunschweig und Hamburg verwendet.

### 4.1 Methodik

Die Kanalnetzsimulation umfasst die Berechnung der Abflussvorgänge auf der Oberfläche und des Abflusstransports in der Kanalisation (Abbildung 4.1). Die Oberflächenabflussberechnung ist unterteilt in die Abflussbildung, die den abflusswirksamen Anteil des Regens bestimmt und die Abflusskonzentration, die den zeitlichen Verlauf der Abflüsse von der Oberfläche bis zur Übergabe in das Kanalnetz beschreibt. Für die hydrologische Abbildung der Abflusskonzentration werden mathematische Übertragungsfunktionen verwendet, denen das Einheitsganglinienverfahren oder der Ansatz der linearen Speicherkaskaden zugrunde liegen. Die Geometrie und Topologie des Entwässerungssystems sowie die Sonderbauwerke sind Randbedingungen für die Simulation des Abflusstransports. Kanalnetzmodelle berechnen aus den Schmutzwasserabflüssen der angeschlossenen Verbraucher und den Regenbelastungen der Oberfläche Durchflüsse und Wasserstände. Bei der Abflusstransportberechnung wird nach hydrologischen und hydrodynamischen Modellen differenziert: Hydrologische Modelle verwenden Übertragungsfunktionen z.B. auf Grundlage linearer Speicheransätze unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung für die Abflussganglinienberechnung im Kanalnetz. Hierbei wird die Wellenverschiebung infolge von Translation und Retention berücksichtigt. Eine Betrachtung von Überlastungszuständen ist nicht möglich.

Hydrodynamische Modelle hingegen basieren auf einem 1871 von de Saint-Venant abgeleiteten Differentialgleichungssystem, welches aus der Impulserhaltungs- und Massenerhaltungsgleichung hervorgeht. Das Differentialgleichungssystem beschreibt den instationären und ungleichförmigen Abfluss in offenen Gerinnen. Im Gegensatz zu den hydrologischen Berechnungsansätzen können mit hydrodynamischen

Modellen Ein- und Rückstaueffekte sowie Druckabfluss im Kanalnetz realistisch berechnet werden.



**Abbildung 4.1 Schematische Darstellung hydrologisch-hydraulischer Niederschlag-Abfluss-Modelle**

Innerhalb von SYNOPSIS kommen für die ereignisbasierte hydraulische Berechnung der Entwässerungssysteme die hydrologisch-hydrodynamischen Modellsysteme HYSTEM-EXTRAN und ++SYSTEMS zur Anwendung. Für die Schmutzfrachtberechnung über kontinuierliche Simulationszeiträume, d.h. zur vollständigen Berücksichtigung von Trocken- und Nass-Zeiträumen wird das hydrologische Modellsystem KOSIM verwendet. Aufgrund geringer Anforderungen an den Detaillierungsgrad des Kanalnetzmodells können mit Hilfe des hydrologischen Berechnungsansatzes kontinuierliche, lange

Niederschlagsreihen innerhalb kurzer Simulationsdauern berechnet werden (DWA 2006 & VERWORN 1999).

Daneben erfolgen auch ereignisbasierte Schmutzfrachtberechnungen mit den hydrodynamischen Modellen ++SYSTEMS und HYSTEM-EXTRAN. Die detaillierten Beschreibungen der Modelle und der implementierten Berechnungsansätze sind den zugehörigen Modellbeschreibungen zu entnehmen (vgl. ITWH 2016 & TANDLER.COM 2016).

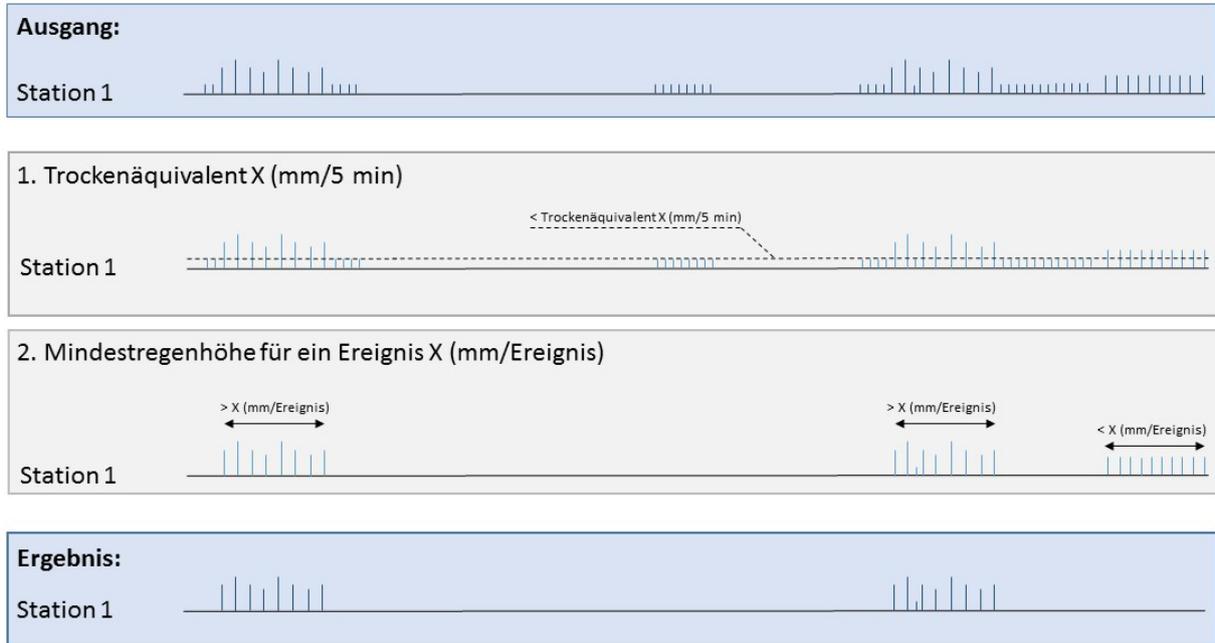
Die verwendeten Regenzeitreihen haben eine zeitliche Auflösung von 5 Min. Mit Ausnahme der kontinuierlichen Schmutzfrachtsimulation mit dem Modellsystem KOSIM verarbeiten die verwendeten Niederschlag-Abfluss-Modellsysteme HYSTEM-EXTRAN und ++SYSTEM den Regen ereignisbasiert. Aus den Zeitreihen werden deshalb vorab nur die für das Kanalnetz relevanten Regenereignisse ausgewählt und dann simuliert. Ein Regenereignis wird dabei definiert durch eine Mindestniederschlagshöhe von 1,5 mm (als Benetzungs- und Muldenverluste) und einem Trockenäquivalent von 0,1 mm/5min. Die Ereignistrennzeit ist netzabhängig und richtet sich in der Regel nach der längsten Fließ- bzw. Entleerungszeit des Systems (Tabelle 4.1). Abhängig von der Leistungsfähigkeit und den Gegebenheiten des Kanalnetzes sind Regenereignisse erst ab verschiedenen Wiederkehrzeiten relevant (geschätzte Überstauhäufigkeit). Nur diese werden dann mit dem N-A-Modell simuliert.

**Tabelle 4.1 Ereignistrennzeiten und geschätzte Überstauhäufigkeiten für die Auswahl von Regenereignissen**

	Braunschweig	Freiburg	Hamburg	
			Innenstadt	Harburg
Ereignistrennzeit	8 h	4 h	8 h	4 h
geschätzte Überstauhäufigkeit	1,0 [1/a]	0,5 [1/a]	0,5 [1/a]	0,5 [1/a]

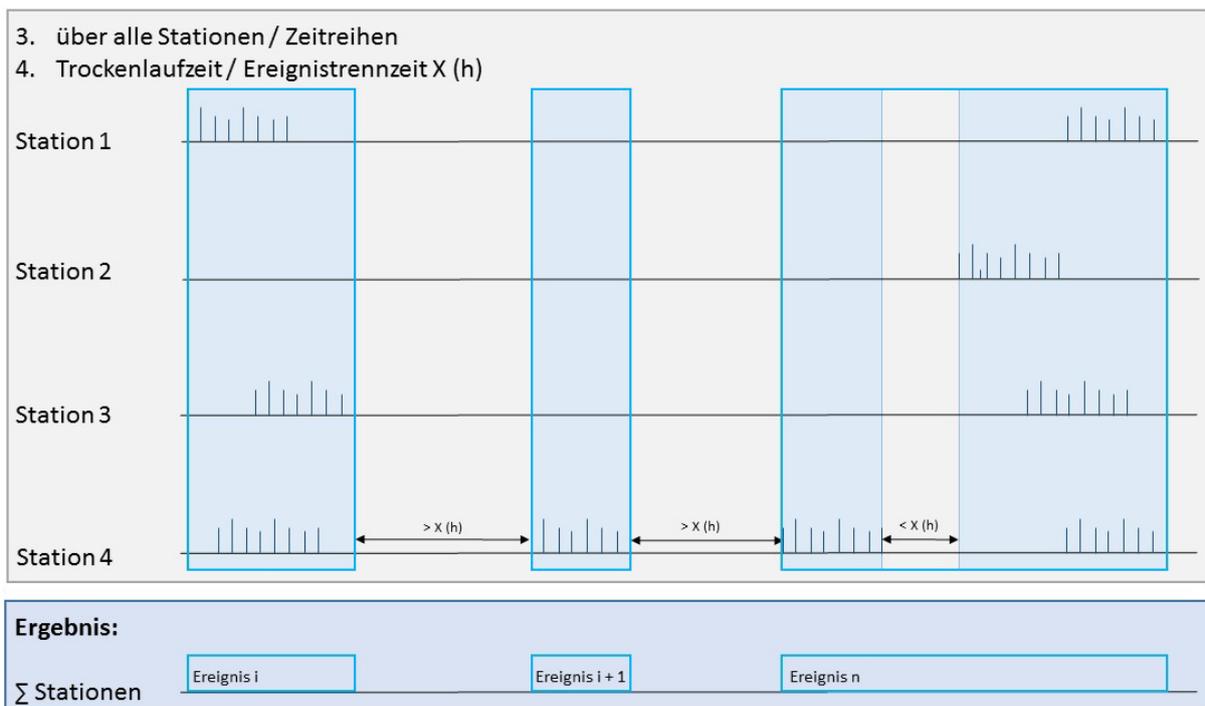
Zur Definition von Regenereignissen für die ungleichmäßige Überregnung wird im Rahmen des Projektes im Modellsystem HYSTEM EXTRAN eine Methode entwickelt, die Niederschlagszeitreihen mehrerer Regenschreiber berücksichtigt.

So werden vorab, analog zur gleichmäßigen Überregnung, **Regenereignisse jeder einzelnen Station (A)** unter Berücksichtigung der auch bei der gleichmäßigen Auswahl verwendeten Grenzwerte (Trockenäquivalent und Mindestniederschlagshöhe) ausgewählt (vgl. Abbildung 4.2).



**Abbildung 4.2 Ermittlung von Ereignissen für jede einzelne Station (A)**

Anschließend werden **gesamte Ereigniszeiträume (B)** unter Berücksichtigung aller Stationen und der Ereignistrenzzeit ermittelt (vgl. Abbildung 4.3).



**Abbildung 4.3 Ermittlung gesamter Ereigniszeiträume (B)**

Darüber hinaus werden **relevante Ereignisse jeder einzelnen Station (C)** ermittelt. Dies geschieht unter der Betrachtung des Trockenäquivalents, der Ereignistrennzeit und der geschätzten Überstauhäufigkeit (vgl. Tabelle 4.1). Im letzten Schritt werden die **relevanten** (zu simulierenden) **Ereigniszeiträume (D)** durch das Streichen von nicht-relevanten Ereigniszeiträumen mittels Verschneidung von **(B – alle Ereigniszeiträume)** mit **(C – relevanten Ereignissen)** ermittelt.

#### 4.1.1 Grundlagen und technisches Regelwerk

Die Bemessung und der Nachweis von Entwässerungssystemen werden in der Europäischen Norm DIN EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden“ (DIN 2008) und im Arbeitsblatt DWA-A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“ (DWA 2006) geregelt. DIN EN 752 gibt die Überflutungshäufigkeit als maßgebendes Kriterium für den zu erreichenden Überflutungsschutz vor. Dabei bezeichnet Überflutung den Überlastungszustand, bei dem "Schmutzwasser und/oder Regenwasser aus einem Entwässerungssystem entweichen oder nicht in dieses eintreten können und entweder auf der Oberfläche verbleiben oder in Gebäude eindringen". DIN EN 752 beinhaltet Anforderungen an den Entwurf neuer Entwässerungssysteme mit der Vorgabe von Regenhäufigkeiten zur Bemessung und Überflutungshäufigkeiten für die Nachweisführung, jeweils mit einer Differenzierung nach Siedlungsstruktur und Nutzung im Einzugsgebiet. Im Arbeitsblatt DWA-A 118 werden die Bemessungsregen- und Überflutungshäufigkeiten durch die Überstauhäufigkeit als Nachweisgröße ergänzt. Da die Abbildung von Überstau mit hydrodynamischen Abflussmodellen bereits seit den 1980er Jahren möglich war, hat sich der rechnerische Nachweis unter Anwendung hydrodynamischer Berechnungsansätze etabliert. Inzwischen sind der Entwicklungsstand der Kanalnetzmodellierung sowie der Stand der Datenverfügbarkeit fortgeschritten. Seit kurzem stehen Methoden und Modelle zur Verfügung, mit deren Hilfe auch das Überflutungsgeschehen auf der Geländeoberfläche in Folge von Extremregenereignissen abgebildet werden kann (ANGERMAIER ET AL. 2012, DWA 2016, DWA-BWK 2013, FUCHS 2013). Die Grundlage der Gefährdungsanalyse erfolgt i.d.R. auch hier durch Auswertung von Überstauberechnungen (DWA 2016).

Im Rahmen des Verbundprojektes SYNOPSE werden die Berechnungsergebnisse bzgl. der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Entwässerungssysteme vorrangig auf Grundlage des Überstaugeschehens bewertet.

Die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in der Mischwasserkanalisation wird im Arbeitsblatt ATV-A 128 (ATV 1992) geregelt.

Zielsetzung ist die bestmögliche Begrenzung der Gesamtemissionen aus Mischwasserüberläufen und Kläranlagen. Dem Arbeitsblatt liegt die Überlegung zugrunde, dass die niederschlagsbedingte Verschmutzung aus Kläranlagenablauf und Mischwasserentlastungen nicht größer sein darf, als die Verschmutzung aus einem vergleichbaren trennentwässerten Gebiet ohne Behandlung (zum Zeitpunkt des Inkrafttretens des Arbeitsblatts bestand für Regenabflüsse außer in Fällen besonders starker Verschmutzung keine Behandlungserfordernis). Als Beurteilungskriterium ist die durch Regenabflüsse ausgetragene CSB-Jahresfracht festgelegt und als Rechenwert mit  $600 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$  als langjährigem Mittelwert für befestigte Flächen in Siedlungsgebieten beziffert.

Im Rahmen des Verbundprojektes SYNOPSE erfolgt die Bewertung der Berechnungsergebnisse bzgl. Mischwasserbehandlung auf Grundlage der Emissionskenngrößen, die bei der Nachweisführung gemäß ATV-A 128 gebräuchlich sind. Immissionsbezogene Betrachtungen werden nicht angestellt.

#### **4.1.2 Ziel- und Vergleichsgrößen**

Die Ergebnisse der durchgeführten Kanalnetzberechnungen werden hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen analysiert. Diese Fragestellungen beziehen sich auf

- die Leistungsfähigkeit der untersuchten Kanalnetze im Istzustand (Kapitel 4.2),
- die Eignung der erzeugten synthetischen Regenzeitreihen als Belastungsgrößen für die Bemessung und den Nachweis von urbanen Entwässerungssystemen (Kapitel 4.3.1)
- die Eignung synthetischer Regenzeitreihen für die Abbildung ungleichmäßiger Überregnung (Kapitel 4.3.3),
- die Einschätzung der Steuerungswürdigkeit der Entwässerungssysteme und die Möglichkeiten der Kanalnetzbewirtschaftung (vgl. Kapitel 7.5.4) und

- den Einfluss von zukünftigem Klima auf die Leistungsfähigkeit der Kanalnetze (Kapitel 4.3.4).

Die Analyse und Bewertung der Berechnungsergebnisse erfolgt anhand von Kenngrößen für

- a) die Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen und
- b) die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen (vgl. Kapitel 4.1.1).

Dabei müssen die Kanalnetzrechnungen auf Basis der synthetischen Regenzeitreihen im Vergleich zu den Berechnungen auf Basis beobachteter Zeitreihen für alle relevanten abflussbezogenen Zielgrößen zu statistisch gleichwertigen Ergebnissen führen, um in der Praxis anwendbar zu sein. Für den Vergleich der synthetischen mit den Referenz-Regenzeitreihen werden die in Tabelle 4.2 genannten Zielgrößen verwendet.

**Tabelle 4.2 Zielgrößen der Kanalnetzrechnung für den Vergleich von synthetischen mit Referenz-Regenzeitreihen**

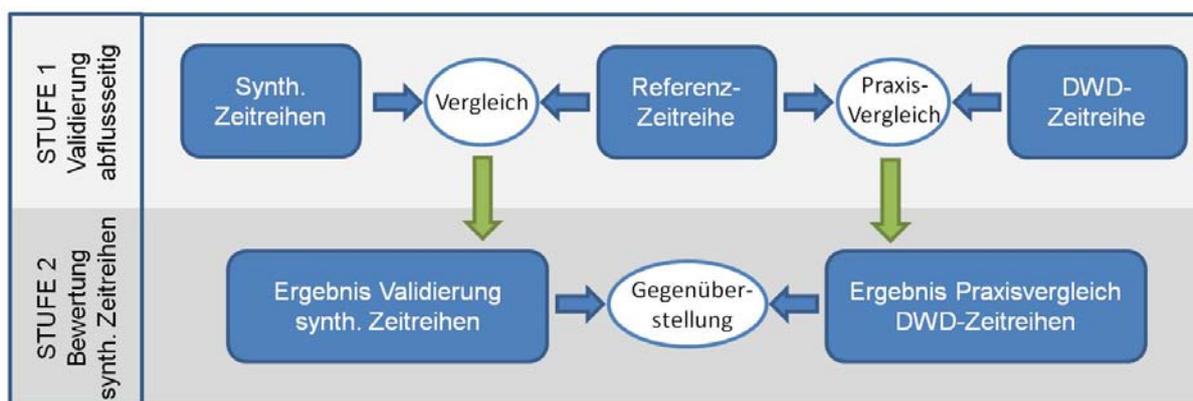
Zielgröße	Formelzeichen	Einheit
<i>Hydraulische Bemessung und Nachweis</i>		
Mittlere jährliche Anzahl zu Überstau führender Regenereignisse <sup>1</sup>	Anz	1/a
Überstau-Wiederkehrzeit	$T_{\ddot{u}}$	a
Mittleres jährliches Überstauvolumen	$V_{\ddot{u}}$	m <sup>3</sup> /a
<i>Bemessung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen</i>		
Entlastungs-Wiederkehrzeit	$T_e$	a
Mittleres jährliches Entlastungsvolumen	$V_e$	m <sup>3</sup> /a
Mittlere jährliche Entlastungsfracht (CSB)	$B_{e,CSB}$	kg/a

<sup>1</sup> Ein zu Überstau führendes Regenereignis ist definiert als ein Ereignis bei dem mindestens ein (1) Schacht im betrachteten Kanalnetz überstaut.

### 4.1.3 Validierung und Bewertung

Die abflusssseitige Bewertung der synthetischen Niederschlagszeitreihen erfolgt in einem zweistufigen Verfahren. Zunächst werden die Ergebnisse der N-A-Simulation, welche unter Ansatz der synthetischen Zeitreihen erzeugt werden, mit den Simulationsergebnissen unter Ansatz der beobachteten Referenzzeitreihen der Städte verglichen. In diesem ersten Schritt wird die Güte der synthetischen Zeitreihen validiert. In einem zweiten Schritt erfolgt eine N-A-Simulation auf der Grundlage von DWD-Niederschlagszeitreihen, die in einer für Deutschland typischen Entfernung zum Untersuchungsort liegen (30-50 km, vgl. Kapitel 2.2.2) und anschließend der Vergleich der Ergebnisse mit den Referenzergebnissen (Praxisvergleich). Die Ergebnisse des Praxisvergleiches werden dann als Grundlage für die Bewertung der synthetischen Niederschlagszeitreihen verwendet.

Zeigen die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen eine höhere Übereinstimmung mit den Referenzergebnissen als die der DWD-Zeitreihen, führt dies zu einer positiven Bewertung. Bei vergleichbarer Übereinstimmung erfolgt eine neutrale Bewertung und eine geringere Übereinstimmung hat eine negative Bewertung zur Folge.



**Abbildung 4.4** Schematische Darstellung von Validierung und Bewertung der synthetischen Niederschlagszeitreihen

Nachfolgend wird die im ersten Schritt durchgeführte Validierung im Detail erläutert: Der Vergleich der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen bzw. der DWD-Zeitreihen mit denen der vor Ort beobachteten Referenzzeitreihen wird für die in Tabelle 4.2 aufgeführten Zielgrößen durchgeführt. Die Überstau-Wiederkehrzeit ( $T_{\bar{u}}$ ) und das mittlere jährliche Überstauvolumen ( $V_{\bar{u}}$ ) werden für jeden einzelnen Schacht bestimmt und verglichen, Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ), mittleres jährliches

Entlastungsvolumen ( $V_e$ ) und mittlere jährliche CSB-Entlastungsfracht ( $B_{e,CSB}$ ) für jedes Entlastungsbauwerk.

Neben dem schachtweisen Vergleich erfolgt für die Überstau-Wiederkehrzeit ( $T_{\bar{u}}$ ) auch ein klassenweiser Vergleich. Dabei erfolgt eine Zuordnung der überstauten Schächte zu Klassen von Wiederkehrzeiten entsprechend Arbeitsblatt DWA-A 118 (siehe Tabelle 4.3). Verglichen werden schließlich die Anzahl der Schächte je Klasse.

**Tabelle 4.3**      **Empfohlene Regenhäufigkeiten für den Entwurf (DIN EN 752), Überstauhäufigkeiten für den rechnerischen Nachweis bei Neuplanungen bzw. nach Sanierung (DWA-A 118) und Überstauhäufigkeiten bei vorhandenen Netzen (ATV-DVWK AG ES-2.1 [ATV-DvWK 2004])**

	Häufigkeit des Bemessungsregens (1-Mal in „n“ Jahren)	Überstauhäufigkeit bei Neuplanungen bzw. nach Sanierung (1-Mal in „n“ Jahren)	Überstauhäufigkeit bei vorhandenen Netzen (1-Mal in „n“ Jahren)
	DIN EN 752	DWA-A 118	ATV-DVWK ES-2.1
Ländliche Gebiete	1 in 1	1 in 2	-
Wohngebiete	1 in 2	1 in 3	1 in 2
Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete	1 in 5 (ohne Überflutungsprüfung)	seltener als 1 in 5	1 in 3
Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	1 in 10	seltener als 1 in 10	1 in 5

Um die Unsicherheiten der örtlichen Referenzzeitreihen bzgl. der statistischen Variabilität in der zeitlichen Abfolge und Häufigkeit von Niederschlagsereignissen zu berücksichtigen, wird um die Ergebnisse der Referenzzeitreihen ein Vertrauensbereich gelegt, der mittels Bootstrapping (EFRON & TIBSHIRANI 1993) bestimmt wird (siehe Anhang 7.2). Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen innerhalb dieses Vertrauensbereichs werden als Übereinstimmung mit der Referenz gewertet. Beim schachtweisen (Überstau) bzw. bauwerksweisen (MW-Entlastung) Vergleich wird als Kenngröße für die Güte der Übereinstimmung der prozentuale Anteil der Ergebnisse innerhalb des Vertrauensbereichs (perc.) verwendet. Berücksichtigt werden dabei nur die Schächte bzw. Bauwerke, deren Referenz-Wiederkehrzeit

kleiner oder gleich einem Drittel der Länge der zugrunde liegenden Referenz-Niederschlagszeitreihe ist<sup>2</sup>. Es werden „Noten“ auf einer Skala von 1 (Verwendung der synthetischen Zeitreihe klar zu empfehlen) bis 3 (Verwendung der synthetischen Zeitreihe dringend abzuraten) vergeben (siehe Abbildung 4.5).

Als weitere Validierungskenngrößen werden Root Mean Square Error (RMSE) und Bias verwendet, die Auskunft über Stärke und Richtung der Abweichungen geben und wie folgt beschrieben sind.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (x_{SYN,k,i} - x_{REF,k})^2}{m \times n}} \quad [a^{-1}] \quad (1)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{k=1}^m (x_{SYN,k,i} - x_{REF,k})}{\sum_{k=1}^m x_{REF,k}} \quad \left[ \frac{a^{-1}}{a^{-1}} \right] \quad (2)$$

mit

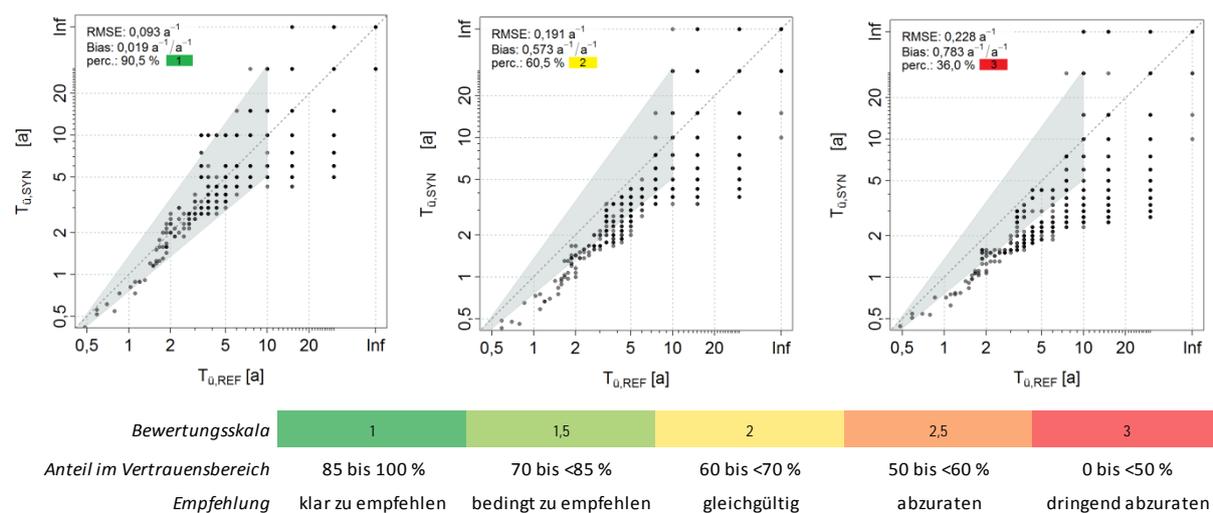
$x$  = betrachtetes Kriterium:  $n_{\ddot{u}}$ ,  $n_e$ <sup>3</sup>,  $V_{\ddot{u}}$ ,  $V_e$ ,  $B_{e,CSB}$

$n$  = Anzahl der Realisationen

$m$  = Anzahl der Schächte bzw. Überlaufbauwerke

<sup>2</sup> Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit, dass die zeitlich begrenzten Referenzzeitreihen Starkregenereignisse seltener Häufigkeit beinhalten, können sichere Aussagen zu Schachtüberstauungen und Entlastungsereignissen erfahrungsgemäß nur bis zu Wiederkehrzeiten von einem Drittel der Länge der Zeitreihenlänge getroffen werden (VERWORN, 1999).

<sup>3</sup> Im Gegensatz zur Darstellung in den Diagrammen wird bei der Berechnung der Kenngrößen RMSE und Bias nicht die Wiederkehrzeit sondern die Häufigkeit der Ereignisse betrachtet. Das ist erforderlich, da bei den Wiederkehrzeiten der Wert unendlich (Inf) auftreten kann, für den die verwendeten Formeln nicht definiert sind.



**Abbildung 4.5** Beispielhafte Darstellung des schichtweisen Vergleichs des Überstaugeschehens zwischen synthetischen Zeitreihen und Referenzzeitreihe mittels der Kenngrößen RMSE, Bias und perc.

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, werden von jedem Niederschlagsmodell viele Realisationen einer Niederschlagszeitreihe erzeugt und für die N-A-Simulationen verwendet. Die Validierung und Bewertung erfolgt für die Gesamtheit der Ergebnisse aller Realisationen.

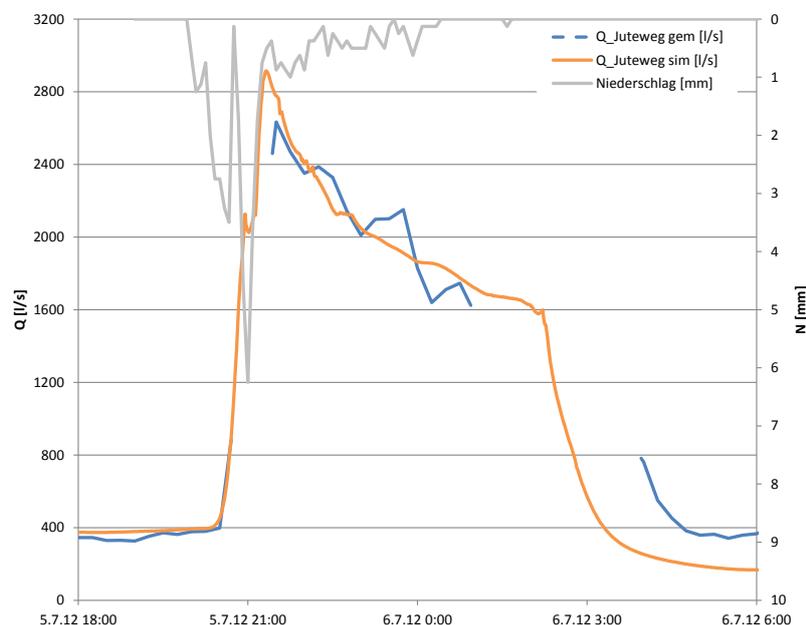
## 4.2 IST-Zustand

Der Ist-Zustand des jeweiligen Kanalnetzes stellt die Ausgangslage für die Vergleichsrechnungen dar. Zur Bewertung des Ist-Zustandes werden Starkregenseriensimulationen auf Grundlage der gemessenen Niederschlagszeitreihe durchgeführt. Darüber hinaus wird, zur weiteren Beschreibung des hydraulischen Zustands, jedes Kanalnetz auch auf Grundlage von Modellregen berechnet.

### 4.2.1 Braunschweig

Das Kanalnetzmodell für das Untersuchungsgebiet in Braunschweig wird in der Modellierungssoftware ++SYSTEMS abgebildet, mit der hydrologisch-hydrodynamische Kanalnetz- und Schmutzfrachtberechnungen durchgeführt werden. Auf Grundlage von im Kanalnetz an sechs Punkten vorliegenden Durchfluss- und Wasserstandsmessungen erfolgt die Modellkalibrierung und -validierung. Hierfür werden jeweils sechs, räumlich möglichst homogen vorliegende Regenereignisse

aus dem Zeitraum von April 2012 bis Mai 2013 verwendet. Die Modellvalidierung zeigt brauchbare bis gute Übereinstimmungen zwischen simulierten und gemessenen Abfluss- und Wasserstandsganglinien (Abbildung 4.6).



**Abbildung 4.6** Berechnete vs. gemessener Abflussganglinie nach Modellkalibrierung

Die Analyse des Überstaugeschehens im Ist-Zustand des Kanalnetzes erfolgt mittels Starkregenseriensimulation unter Verwendung der Regendaten der Station Prinzenweg. Aus dem Niederschlagskontinuum der Jahre 1985 bis 2014 (30 Jahre) werden gemäß Arbeitsblatt DWA-A 118 maßgebende Starkregen ausgewählt und als Belastungsgröße für die Kanalnetzberechnung angesetzt. Als Vorfluterwasserstände werden die Normalwasserstände an den Oker-Wehren angesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass 1.231 der insgesamt 6.303 Schächte im Kanalnetz mindestens einmal überstauen, das entspricht einem Anteil von 20 %. Lediglich 49 Schächte (0,8 %) überstauen häufiger als einmal in drei Jahren und erfüllen damit nicht die für Neuplanung bzw. Sanierung geltenden Anforderungen in Wohngebieten gemäß DWA-A 118. Der hydraulische Sanierungsbedarf wird als gering beurteilt.

Neben der Starkregenserienberechnung erfolgen, wie in der Ingenieurpraxis heute oft noch üblich, auch Berechnungen mit Einzelmodellregen als Belastungsgröße. Die verwendeten Modellregen sind für die Region Braunschweig KOSTRA-DWD-2000 (DWD 2005) entnommen. Berechnet werden Modellregen der Dauer 240 min und der Wiederkehrzeiten  $T=1a$ ,  $2a$ ,  $3a$ ,  $5a$  und  $10a$ .

Die Gegenüberstellung der Modellregenhäufigkeiten und der rechnerischen Überstauhäufigkeiten nach Starkregenseriensimulation zeigt eine Überschätzung des

Überstaugeschehens unter Ansatz der KOSTRA Modellregen (Tabelle 4.4). Beispielsweise überstauen beim Modellregen der Wiederkehrzeit  $T=3a$  213 Schächte, wohingegen nach Starkregenseriensimulation lediglich 59 Schächte eine Überstauwiederkehrzeit von kleiner oder gleich  $T=3a$  aufweisen. Der Überstauachweis unter Verwendung von Modellregen bietet im untersuchten Kanalnetz folglich deutliche Sicherheiten.

**Tabelle 4.4 Vergleich des rechnerischen Überstaus unter Ansatz von Modellregen und Starkregenserie (Braunschweig)**

<b>Belastungsansatz</b>	<b>T = 1a</b>	<b>T = 2a</b>	<b>T = 3a</b>	<b>T = 5a</b>	<b>T = 10a</b>
Modellregen D=240 min: Anzahl überstauter Schächte	14	94	213	427	976
Langzeitberechnung: Anzahl Schächte mit Überstauwiederkehrzeit $\leq T$	6	38	59	216	420

#### 4.2.2 Freiburg

Das Kanalnetzmodell für das Untersuchungsgebiet Freiburg wird mit dem GIS-basierten grafischen Kanalplanungssystem FOG aufgebaut und mit dem hydrodynamischen Niederschlag-, Abfluss- und Schmutzfrachtmodell HYSTEM-EXTRAN simuliert.

Die Modellkalibrierung und -validierung erfolgt anhand von Durchflussmessungen, die für sechs Standorte innerhalb des Kanalnetzes vorliegen. Die Messungen werden im Freiburger Kanalnetz entweder an Schmutzwasserhaltungen durchgeführt, oder sie liegen im Mischwassersystem kurz hinter Regenüberläufen. Dadurch sind die Durchflussmessungen bautechnisch bedingt auf den Trockenwetterdurchfluss limitiert, weshalb es in nur geringem Umfang Möglichkeiten gibt, den Regenwetterabfluss an den Durchflussmessungen zu kalibrieren. Das Kanalnetz wird daher schwerpunktmäßig an den Trockenwetterverläufen kalibriert. Um diesen Verlauf möglichst realitätsnah anpassen zu können, werden den Schmutzwasserzuläufen von den jeweiligen Teilnetzen ein individuelles Zeitmuster aufgeprägt.

Um den Regenwetterverlauf dennoch gut abbilden zu können, werden Regenereignisse zur Kalibrierung verwendet, welche die maximale Auflösung der Durchflussmesser (bis Einstau der Haltung) nicht überschreiten (vgl. Abbildung 4.7).

Die simulierten Durchflüsse werden gegenüber den Durchflussmessungen anhand von Gütekriterien bewertet.

Eine Besonderheit des Freiburger Kanalnetzes stellen die sogenannten „Freiburger Bächle“ dar. Da hierzu keine Sonderprofilinformationen vorliegen und der Aufwand des Aufbaus nicht im Verhältnis zum Mehrwert (Ergebnisgenauigkeit) steht, werden die Freiburger Bächle im Modell als Kreisprofil abgebildet.

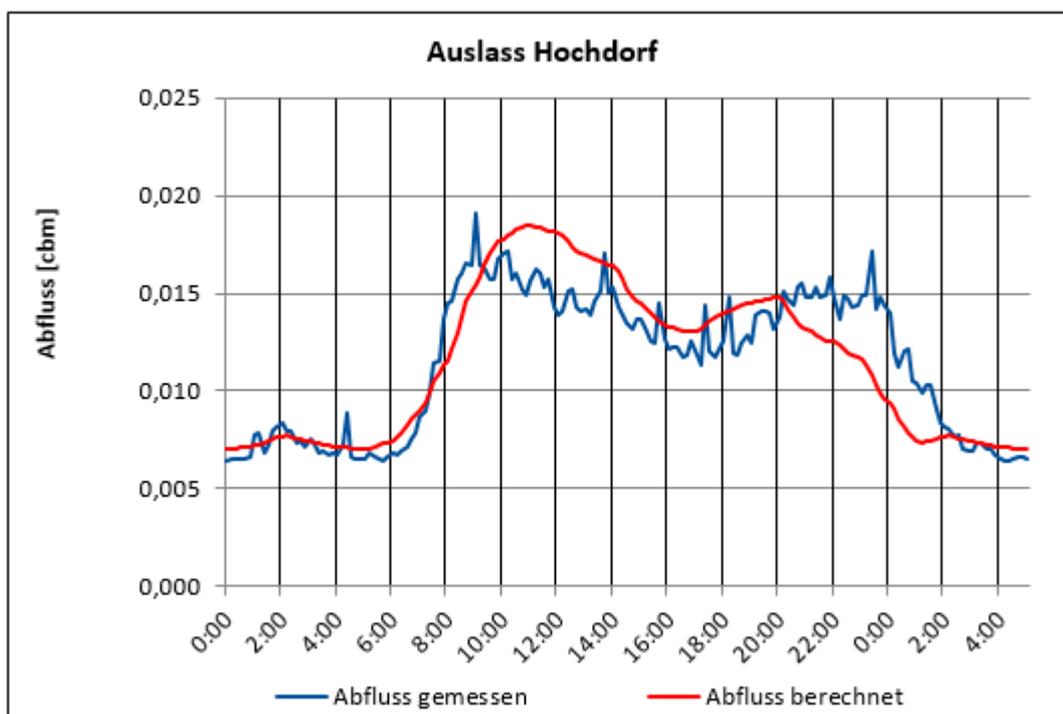


Abbildung 4.7 Abflussganglinienvergleich Kanalnetz Freiburg: Messung vs. Simulation

### 4.2.3 Hamburg

Die beiden für das Untersuchungsgebiet Hamburg verwendeten Kanalnetzmodelle „Innenstadt“ und „Harburg“ werden im hydraulischen N-A-Modellsystem HYSTEM EXTRAN abgebildet. Im Innenstadtmodell kommt zusätzlich das Modul CONTROL zum Einsatz um die steuerbaren Elemente im Netz zu simulieren. Die Modellvalidierung geschieht mit Messwerten von 40 Pegeln im Mischwassernetz.

Zur Analyse des Ist-Zustandes der beiden Netze werden Starkregenseriensimulationen mit jeweils einer 50-jährigen Regenzeitreihe durchgeführt und ausgewertet. Für das Innenstadtnetz wird dazu die zusammengesetzte Regenzeitreihe HH00, welche zum Großteil auf den Messungen

des Regenschreibers R032 beruht und für das Harburger Netz die Zeitreihe des Regenschreibers R005 verwendet (Abbildung 2.4). Aus diesen kontinuierlichen Zeitreihen werden 183 (HH00) und 186 (R005) relevante Starkregenereignisse ausgewählt und als Eingangsgrößen der Simulationen verwendet. Die Auswertung der resultierenden Überstauhäufigkeiten aller Schächte - sowie für das Innenstadtnetz der Entlastungshäufigkeiten an den Mischwasserüberläufen - spiegelt ein Bild des hydraulischen Zustands der Netze wider. Von den 24.446 Schächten im Innenstadtnetz überstauen 3.247 (13,3 %) mindestens einmal im 50-jährigen Betrachtungszeitraum. 673 Schächte (2,8 %) überstauen alle 5 Jahre oder häufiger und entsprechen damit nicht den Empfehlungen des DWA-Arbeitsblattes A 118 für Neuplanungen bzw. Sanierungen in Stadtzentren. Die Simulationen mit Bemessungsregen führen für Wiederkehrzeiten  $T \geq 2a$  zu einer etwas höheren Anzahl betroffener Schächte (Tabelle 4.5).

**Tabelle 4.5 Vergleich des rechnerischen Überstaus unter Ansatz von Modellregen und Starkregenserie (Innenstadtnetz Hamburg)**

<b>Belastungsansatz</b>	<b>T = 1a</b>	<b>T = 2a</b>	<b>T = 5a</b>	<b>T = 10a</b>
Modellregen D=240 min: Anzahl überstauter Schächte	133	360	924	1.671
Langzeitberechnung: Anzahl Schächte mit Überstauwiederkehrzeit $\leq T$	137	274	673	1.570

Das innerstädtische Mischkanalnetz verfügt über 153 Überläufe in die Gewässer. Da die Gewässer in der Regel über große Querschnitte und geringen Wasseraustausch charakterisiert sind, besteht die Zielvorgabe, im Mittel lediglich ein Entlastungsereignis im Jahr (Elbe, Alster, Bille) bzw. in zwei Jahren (alle Nebengewässer) zuzulassen. Bei Simulation mit Bemessungsregen springen die Überläufe seltener an, als in der Starkregenseriensimulation (Tabelle 4.7).

**Tabelle 4.6 Vergleich des rechnerischen Entlastungshäufigkeit unter Ansatz von Modellregen und Starkregenserie (Innenstadtnetz Hamburg)**

<b>Belastungsansatz</b>	<b>T = 1a</b>	<b>T = 2a</b>	<b>T = 5a</b>	<b>T = 10a</b>
Modellregen D=240 min: Anzahl aktiver Mischwasserüberläufe	38	56	93	109
Langzeitberechnung: Anzahl Überläufe mit Entlastungswiederkehrzeit $\leq T$	58	90	106	126

Das Harburger Regenwassernetz hat insgesamt 4.318 Schächte, von denen 135 mindestens einmal in den 50 betrachteten Jahren überstaut sind. Lediglich 9 Schächte überstauen einmal in 3 Jahren oder häufiger und liegen damit über den Empfehlungen des DWA-Arbeitsblattes A 118 für Neuplanungen bzw. Sanierungen in Wohngebieten. Die Simulationen auf Grundlage von Modellregen führen ab Wiederkehrzeiten  $T \geq 2$  zu einer höheren Anzahl überstauter Schächte (Tabelle 4.7).

**Tabelle 4.7 Vergleich des rechnerischen Überstaus unter Ansatz von Modellregen und Starkregenserie (Harburger Netz)**

<b>Belastungsansatz</b>	<b>T = 1a</b>	<b>T = 2a</b>	<b>T = 5a</b>	<b>T = 10a</b>
Modellregen D=240 min: Anzahl überstauter Schächte	0	12	25	63
Langzeitberechnung: Anzahl Schächte mit Überstauwiederkehrzeit $\leq T$	3	5	12	32

### 4.3 Validierung der synthetischen Zeitreihen

Zur Validierung der synthetischen Zeitreihen werden in den drei Untersuchungsgebieten N-A-Simulationen mit gleichmäßigem und ungleichmäßigem Niederschlag durchgeführt und ihre Ergebnisse mit dem jeweiligen Referenz-Zustand verglichen und analysiert.

Darüber hinaus werden die synthetischen Niederschlagsdaten in einem Klimaszenario und in drei praxisnahen Anwendungsbeispielen getestet.

#### 4.3.1 Ergebnisse der gleichmäßigen Überregnung

Die vergleichende Analyse der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen mit dem Referenz- und Praxisszenario geschieht über ihre Darstellung als Boxplots und Streudiagramme. Hauptsächlich werden in diesem Kapitel die Ergebnisse in Streudiagrammen dargestellt, in denen die Simulationsergebnisse jedes einzelnen Schachtes und Überlaufbauwerks bzw. Gewässerabschnitts gegenübergestellt werden und so ein Gesamtbild des Kanalnetzverhaltens gezeigt wird. Zusätzliche Boxplotdarstellungen befinden sich im Anhang.

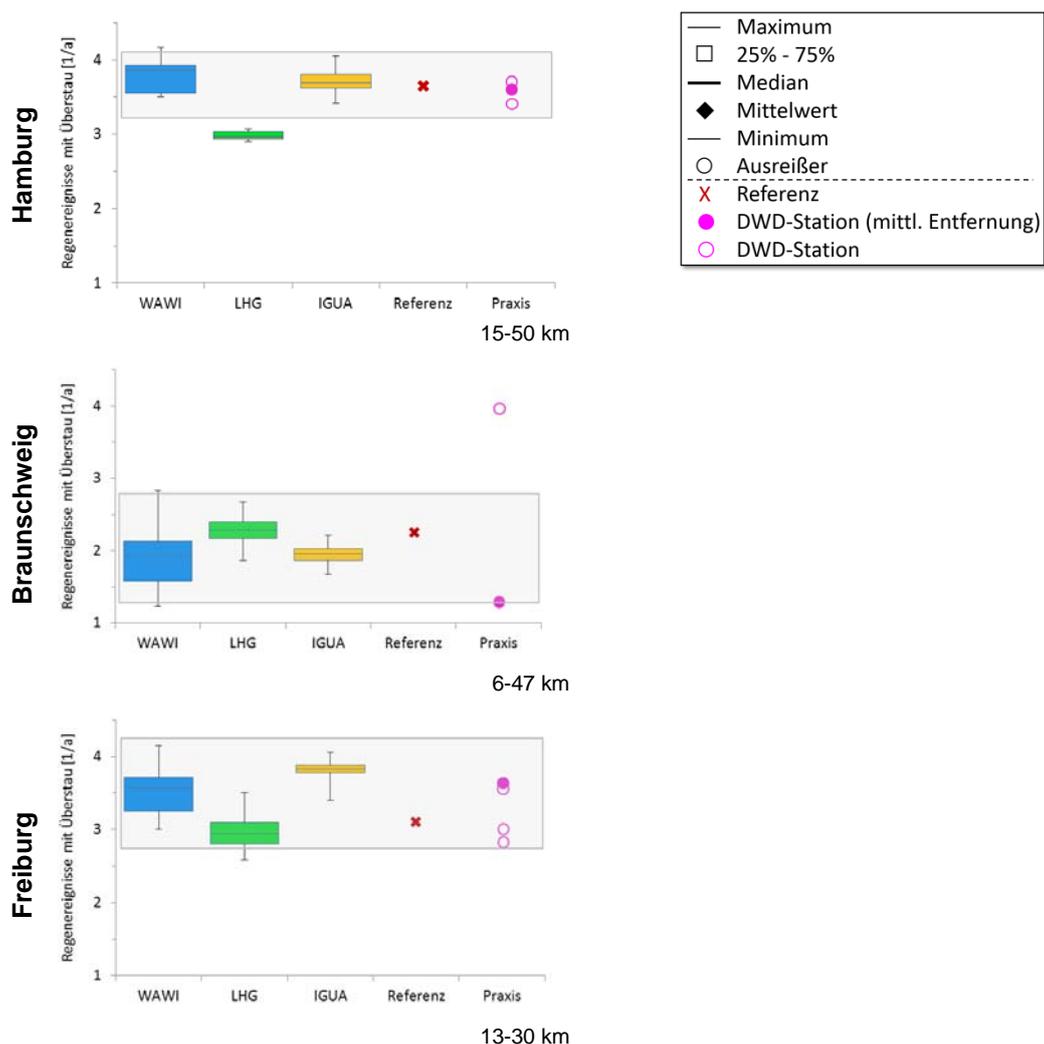
In Hamburg werden zwei Kanalnetzsysteme betrachtet (Hamburger Innenstadt und Hamburg-Harburg), von denen im Folgenden ausschließlich die Ergebnisse des

Innenstadtmodells dargestellt werden und die Ergebnisse des Harburger Modells im Anhang nachgeschlagen werden können.

#### **4.3.1.1 Anzahl der Überstauereignisse**

Die abflusseitige Validierung der synthetischen Zeitreihen erfolgt für die Zielgröße Überstauhäufigkeit. Abbildung 4.8 zeigt auf Grundlage der N-A-Simulationsergebnisse die mittlere jährliche Anzahl von Ereignissen, die zu Überstau im jeweiligen Stadtgebiet führen. Dargestellt sind die Ergebnisse für die synthetischen Zeitreihen und die Referenzzeitreihe sowie die Ergebnisse benachbarter DWD-Stationen, die außerhalb der Stadtgebiete liegen (Praxis, vgl. Entfernungsangaben in

Tabelle 2.2). 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 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).

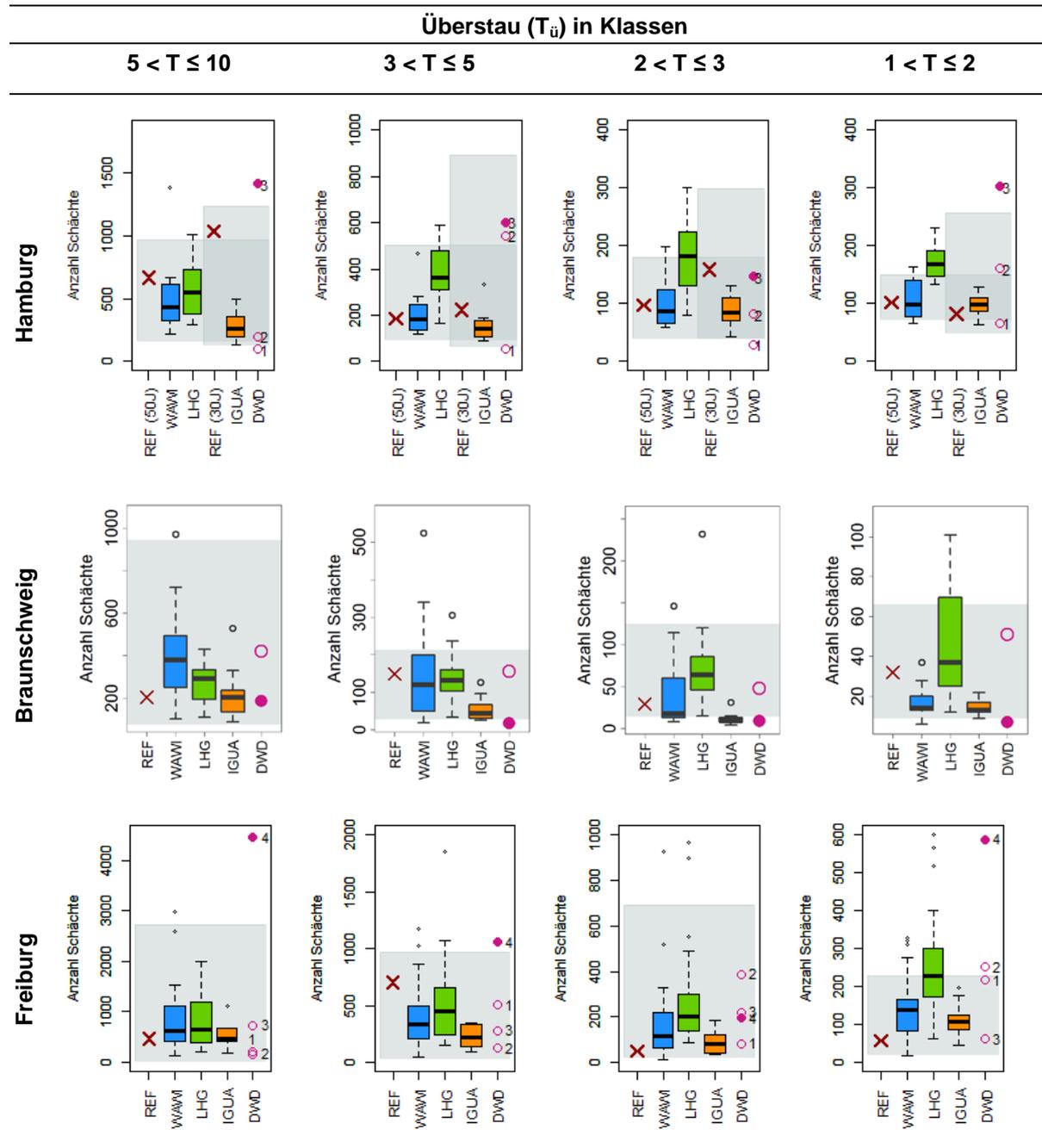


**Abbildung 4.8** Mittlere jährliche Anzahl von Niederschlagsereignissen die zu Überstau führen

#### 4.3.1.2 Klassenspezifische Überstauwiederkehrzeit

Für eine detaillierte Analyse werden die simulierten Überstauhäufigkeiten der Schächte für die verschiedenen Niederschlagsbelastungen ausgewertet und gemäß der Überstauhäufigkeitsklassen (Schutzziele) nach DWA-A 118 klassifiziert. Abbildung 4.9 zeigt die Ergebnisse für die drei Stadtgebiete analog zur Darstellung der mittleren jährlichen Ereigniszahl mit Überstau. 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 gut abbilden (grauer

Bereich). Dies gilt auch für die unterschiedlichen Stadtgebiete bzw. Klimaregionen und für die Klassen der Überstauhäufigkeit. Die Zeitreihen von IGUA zeigen systematisch die geringsten Anzahlen (jeweils geringster Medianwert), welche jedoch je nach Region und Wiederkehrzeit gut mit den Werten der Referenzzeitreihen übereinstimmen. Signifikant ist die ausgeprägte Streuung der Ergebnisse der DWD-Nachbarstationen im Vergleich zur Referenz, die größer ist als die Bandbreite der synthetischen Zeitreihen.



**Abbildung 4.9** Anzahl von Schächten klassifiziert nach Überstauhäufigkeit gem. DWA-A 118 für Referenz-, synthetische - und DWD-Niederschlagsdaten

#### **4.3.1.3 Schachtspezifische Überstauwiederkehrzeit**

Der Vergleich der Überstauwiederkehrzeiten je Schacht ist in Abbildung 4.10 als Streudiagramm dargestellt. Je Schacht wird die Überstauwiederkehrzeit der synthetischen Realisationen den Referenzergebnissen gegenübergestellt. Für jeden Schacht wird auf der Abszisse das Ergebnis der Referenz und auf der Ordinate das Ergebnis der synthetischen Reihen abgebildet. Die berechneten Kenngrößen RMSE und Bias geben Auskunft über Stärke und Richtung der Abweichungen. Für die Streudiagramm-Darstellung wird ebenfalls ein auf Bootstrapping basierender Vertrauensbereich gebildet, welcher der Validierung dient (perc.). Die Darstellung erfolgt differenziert nach den Niederschlagsmodellen.

Der schachtweise Vergleich der Überstauwiederkehrzeiten der synthetischen Reihen zeigt insgesamt für alle betrachteten Kanalnetze eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Referenz als der Vergleich „Praxisszenario“ mit der Referenz.

### Überstauwiederkehrzeit

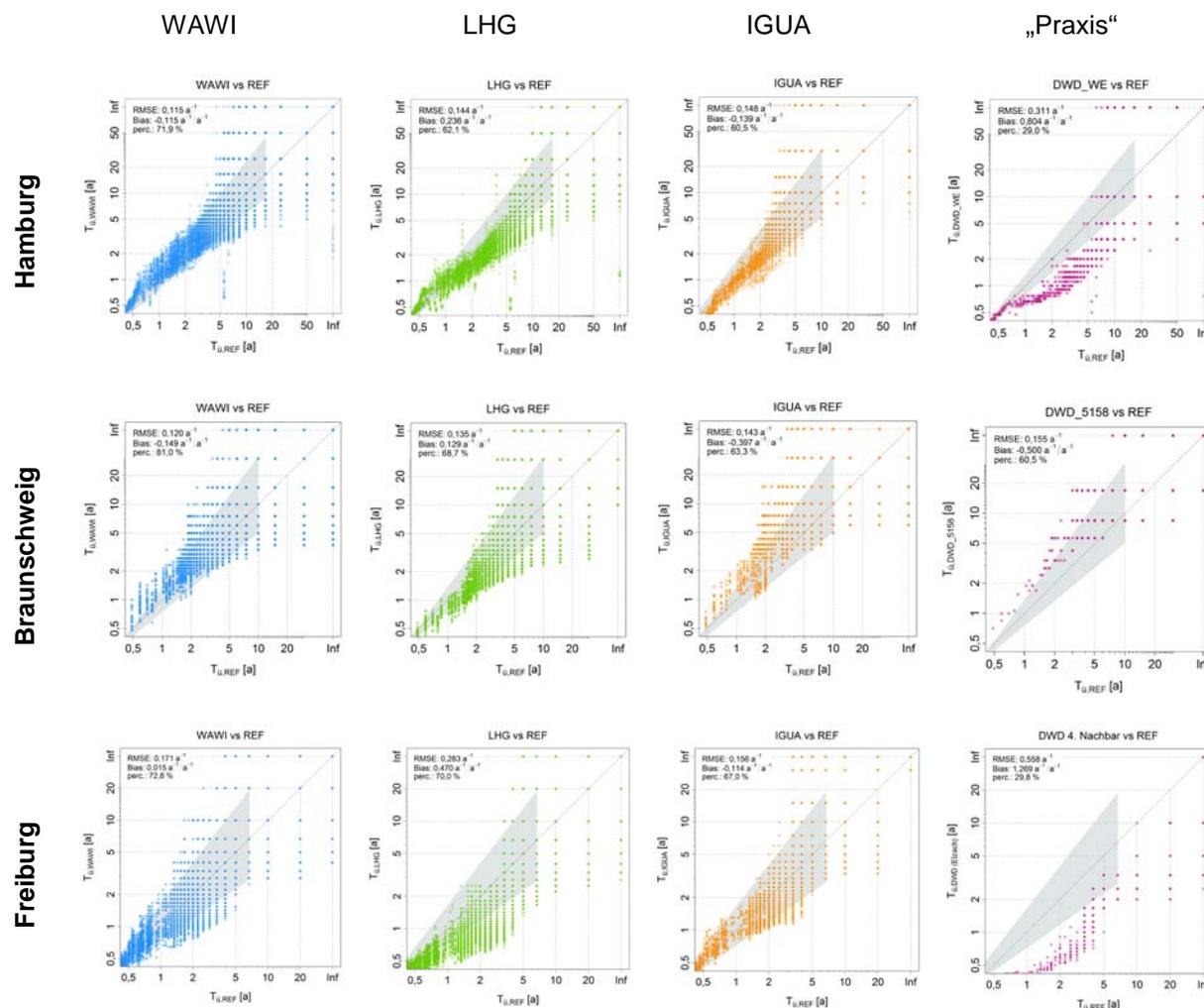


Abbildung 4.10 Vergleich der Überstauwiederkehrzeit je Schacht

#### 4.3.1.4 Schachtspezifisches Überstauvolumen

Die in der Abbildung 4.11 dargestellten Streudiagramme zeigen den Vergleich der Überstauvolumina. Entsprechend der vorherigen Abbildung werden hier die Überstauvolumina der synthetischen Realisationen mit denen der Referenzregenreihe schachtweise verglichen. Der Vergleich der synthetischen Reihen mit denen der Referenz zeigt für alle betrachteten Kanalnetze eine bessere Übereinstimmung als der Vergleich „Praxiszenario“ mit der Referenz. Dies zeigt sich insbesondere durch den Vergleich der statistischen Kenngrößen RMSE und Bias.

### Überstauvolumen

WAWI                      LHG                      IGUA                      „Praxis“

## Überstauvolumen

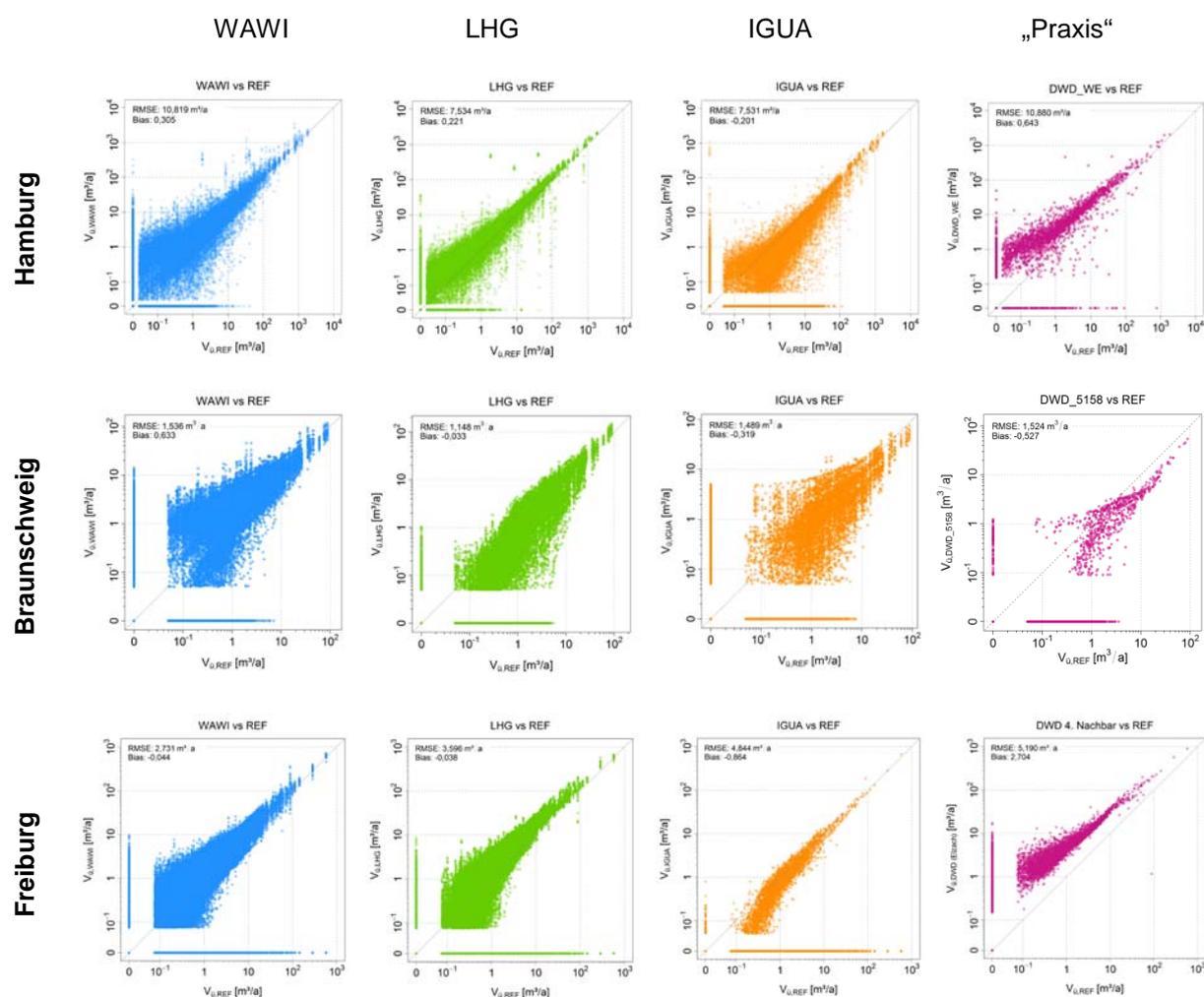


Abbildung 4.11 Vergleich des Überstauvolumens je Schacht

### 4.3.1.5 Entlastungs-Wiederkehrzeit je Bauwerk/ Gewässerabschnitt

Eine weitere maßgebende Vergleichsgröße für die Eignung der synthetischen Regenreihen ist die Entlastungs-Wiederkehrzeit, siehe Abbildung 4.12. In den Streudiagrammen werden gewässerabschnittsweise (Hamburg) bzw. bauwerksweise (Braunschweig und Freiburg) die Entlastungs-Wiederkehrzeiten der synthetischen Realisationen denen der Referenz gegenübergestellt. Für Freiburg wird das Entlastungsverhalten auf Grundlage einer Kontinuumssimulation abgebildet. Es wird daher kein Vertrauensbereich verwendet, der auf dem Bootstrapping einer vorausgewählten Ereignisserie basiert. In Kapitel 7.4 im Anhang wird die kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung für Freiburg gesondert behandelt.

Der schachtweise Vergleich der Entlastungs-Wiederkehrzeiten der synthetischen

Reihen mit denen der Referenz zeigt für die Kanalnetze Braunschweig und Freiburg eine deutlich bessere Übereinstimmung als der Vergleich „Praxisszenario“ mit der Referenz. Im Hamburger Kanalnetz liegen dagegen beim Vergleich Praxisszenario/Referenz 95 % der Schächte im Vertrauensbereich.

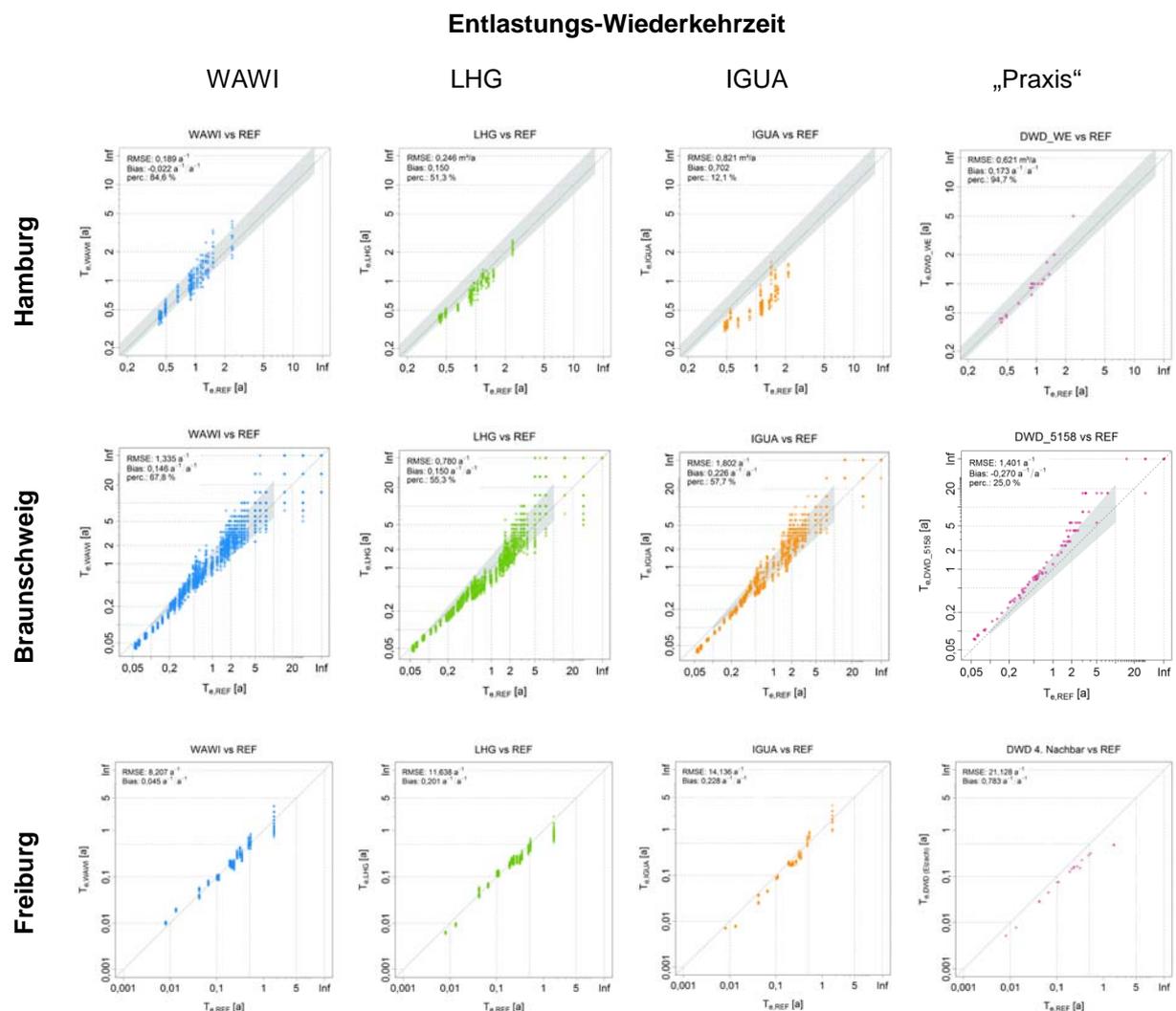


Abbildung 4.12 Vergleich der Entlastungs-Wiederkehrzeiten je Gewässerabschnitt bzw. Bauwerk

#### 4.3.1.6 Entlastungsvolumen je Bauwerk bzw. Gewässerabschnitt

Der Vergleich der Entlastungsvolumina je Gewässerabschnitt bzw. je Bauwerk ist in Abbildung 4.13 als Streudiagramm dargestellt. Der Vergleich der Entlastungsvolumina der synthetischen Reihen mit denen der Referenz zeigt für das Freiburger Kanalnetz eine deutlich bessere Übereinstimmung als der Vergleich „Praxisszenario“ mit der Referenz, in Braunschweig mit Ausnahme von IGUA

(schlechter) ein etwas bessere. In Hamburg führt die N-A-Simulation mit synthetischen Daten zu ähnlichen Abweichungen des Entlastungsvolumens wie die Simulation des Praxisszenarios.

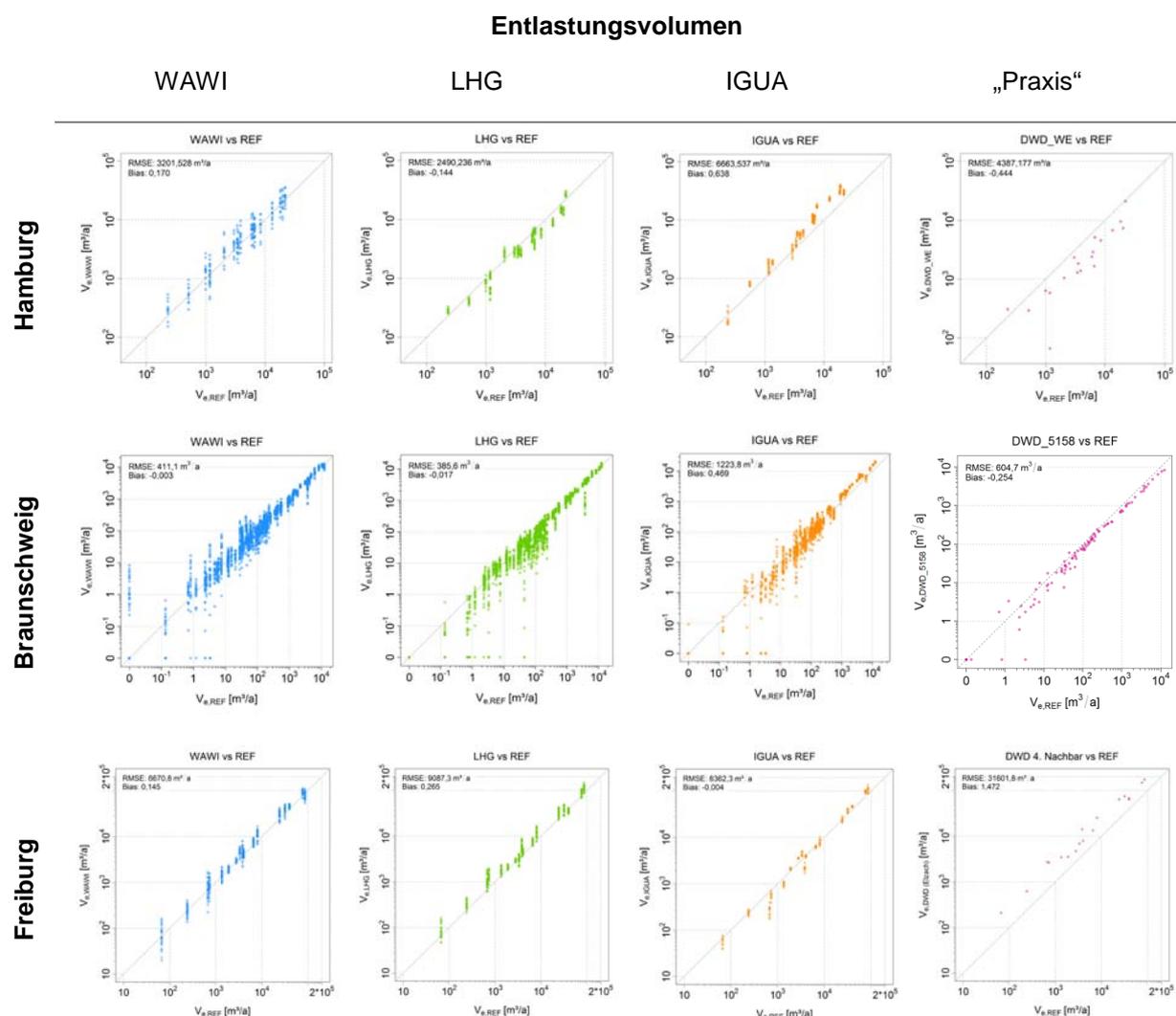


Abbildung 4.13 Vergleich des Entlastungsvolumens je Gewässerabschnitt bzw. Bauwerk

#### 4.3.1.7 CSB-Fracht je Bauwerk bzw. Gewässerabschnitt

Die in der Abbildung 4.14 dargestellten Streudiagramme zeigen den Vergleich der im jährlichen Mittel emittierten CSB-Frachten. Je Gewässerabschnitt / Bauwerk wird die CSB-Fracht der synthetischen Realisationen den Referenzergebnissen gegenübergestellt. Der Vergleich der CSB-Frachten der synthetischen Reihen mit denen der Referenz zeigt für das Freiburger Kanalnetz eine deutlich bessere Übereinstimmung als der Vergleich „Praxisszenario“ mit der Referenz, für Braunschweig mit Ausnahme von IGUA (schlechter) eine etwas bessere. Für

Hamburg ist die Übereinstimmung vergleichbar (WAWI) bis schlechter (LHG und IGUA).

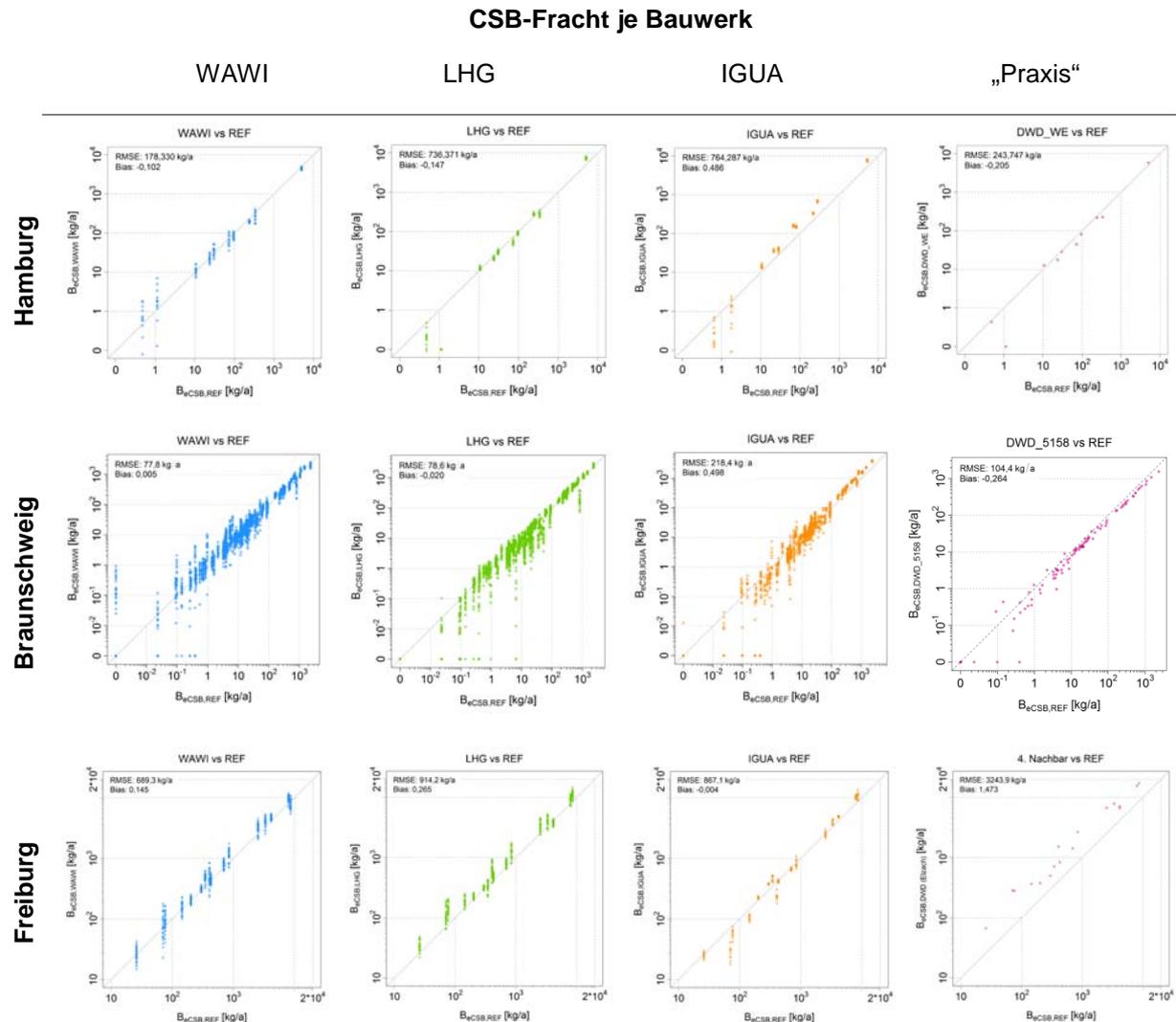
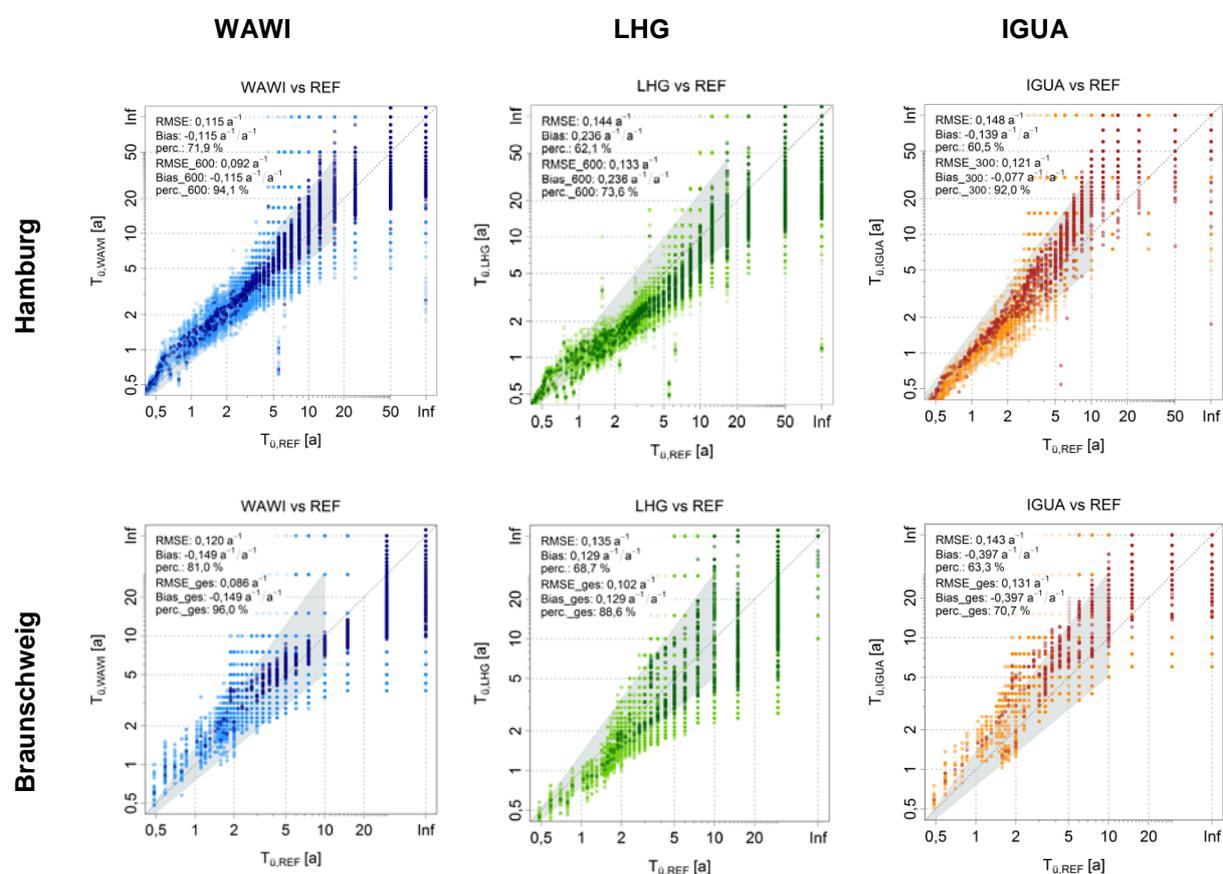


Abbildung 4.14 Vergleich der CSB-Frachten je Gewässerabschnitt bzw. Bauwerk

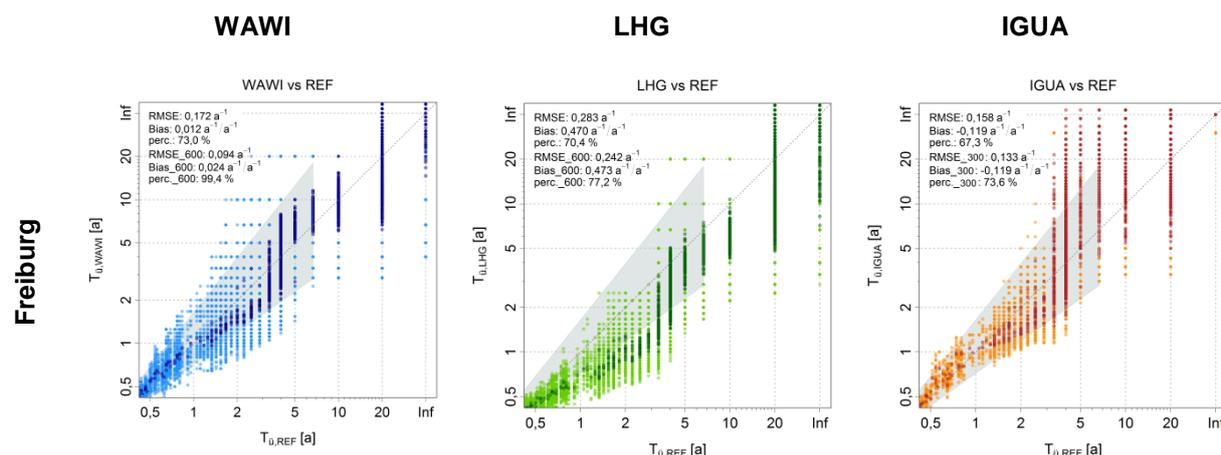
### 4.3.2 Einfluss der Zeitreihenlänge

Die in Kapitel 4.3.1 dargestellten Vergleiche zeigen eine Streuung der Berechnungsergebnisse unter Ansatz der synthetischen Daten um die Referenz. Im Folgenden wird anhand der Zielgröße Überstauwiederkehrzeit ( $T_{\ddot{u}}$ ) der Einfluss der Zeitreihenlänge und somit der Variabilität der synthetischen Daten auf die Berechnungsergebnisse gezeigt. Analog zu Kapitel 4.3.1 erfolgt der Vergleich mit den Berechnungsergebnissen der Referenzzeitreihe und dem hierfür ermittelten Vertrauensbereich.

Die verfügbaren Realisationen jedes Niederschlagsmodells werden zu einer langen Zeitreihe zusammengesetzt (Bsp. WAWI-Daten für Hamburg: 12 x 50 Jahre = 600 Jahre). Es ergeben sich Zeitreihenlängen von 600 Jahren (WAWI und LHG) bzw. 300 Jahren (IGUA). Diese langen Niederschlagszeitreihen werden als Eingangsgröße für die Kanalnetzberechnungen verwendet, die Überstauwiederkehrzeiten je Schacht ermittelt und der Referenz gegenübergestellt<sup>4</sup>. Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse der Gegenüberstellung. Die unter Ansatz der langen Zeitreihen ermittelten Überstauwiederkehrzeiten sind dunkel geplottet. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der einzelnen Realisationen hell hinterlegt.



<sup>4</sup> Um Rechenzeit zu sparen wurden hier lediglich die bereits simulierten abflussseitigen Ergebnisse der einzelnen Realisationen zusammengefügt und gemeinsam ausgewertet.



**Abbildung 4.15 Vergleich der Überstauhäufigkeiten zwischen synthetischen und Referenz-Niederschlagsdaten bei Verwendung langer synthetischer Zeitreihe (IGUA: 300 Jahre, WAWI, LHG: 600 Jahre)**

Es zeigt sich durchgängig für alle Niederschlagsmodelle und Städte eine verbesserte Übereinstimmung mit der Referenz. Die Ergebnisse der langen Simulation konzentrieren sich in der Mitte aller Einzelrealisationen. Vorausgesetzt das zugrundeliegende Niederschlagsmodell weist keinen signifikanten Bias (systematische Fehler) auf, führt das Vorgehen zu einer deutlichen Verbesserung des Ergebnisses, da die einzelnen extremen Realisationen ausgeglichen werden<sup>5</sup>. Vergleichbare Ergebnisse zeigt auch die Betrachtung der Zielgröße Entlastungs-Wiederkehrzeit, die für das Untersuchungsgebiet Hamburg analysiert wurde (hier nicht dargestellt).

Es lässt sich festhalten, dass ausreichend lange Zeitreihen oder eine ausreichende Anzahl von Realisationen herkömmlicher Länge als Eingangsgröße für die Kanalnetzberechnung erforderlich sind, um die Bandbreite des möglichen Niederschlaggeschehens, das durch die Niederschlagsmodelle abgebildet wird, zu erfassen. Im hier gezeigten Beispiel wurde für Hamburg die 12-fache, für Braunschweig die 20-fache und für Freiburg die 30-fache Länge verwendet (Ausnahme IGUA, hier 10-fache Länge). Anhand der Ergebnisse für das IGUA-Modell lässt sich erkennen, dass bereits die 10-fache Länge der bei den Einzelrealisationen verwendeten Zeitreihen zu einer guten Abbildung des

<sup>5</sup> Falls das Modell einen deutlichen Bias hat, kann es allerdings bei dem hier betrachteten Kriterium perc. auch zu einer Verschlechterung kommen, wenn die extremen Punkte der einzelnen Realisationen die einzigen sind, die vorher (entweder nur unten oder nur oben) im grauen Konfidenzband lagen und nun daraus „verschwinden“.

Niederschlaggeschehens führt. Für die Praxis lässt sich ableiten, dass zehn Realisationen herkömmlicher Länge (dreifache Wiederkehrzeit des Bemessungsziels) bei der Kanalnetzberechnung verwendet werden sollten. Möglicherweise ist in Abhängigkeit der Bemessungsaufgabe, des Bemessungsziels, der Kanalnetzeigenschaften und des verwendeten Niederschlagsmodells auch der Ansatz einer geringeren Anzahl von Realisationen ausreichend; ggf. aber auch eine größere Anzahl notwendig. Eine Präzisierung und Differenzierung in diesem Sinne sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

### **4.3.3 Ergebnisse der ungleichmäßige Überregnung**

Mit zunehmender Größe bzw. räumlicher Ausdehnung des Entwässerungssystems ist die Erfassung des Niederschlaggeschehens durch eine einzelne Niederschlagsstation nicht ausreichend. Besonders bei räumlich gegliederten, konvektiven Regenereignissen können bei der Verwendung einer einzelnen Punktmessung erhebliche Fehler in der räumlichen Schätzung des Regengeschehens resultieren (Über- oder Unterschätzung). Die Ungleichmäßigkeit der natürlichen Überregnung kann unter Verwendung mehrerer über das Einzugsgebiet verteilter Regenschreiber oder auf Grundlage von Radardaten differenziert und realitätsnah abgebildet werden.

Im Projekt SYNOPSE wird das Potenzial synthetischer Niederschlagsmodelle für die Abbildung ungleichmäßiger Überregnung untersucht. Vorab wird analysiert, welchen Einfluss die Ungleichmäßigkeit der Überregnung im Vergleich zur gleichmäßigen, räumlich homogenen Annahme des Regengeschehens auf das Überstau- und Entlastungsverhalten der drei Modellnetze hat.

#### **4.3.3.1 Einfluss ungleichmäßiger Überregnung**

Um den Einfluss der ungleichmäßigen Überregnung auf das Kanalnetzverhalten darzustellen, werden Vergleichssimulationen mit verschiedenen örtlichen Referenzdaten durchgeführt.

Für eine N-A-Simulation unter Ansatz der ungleichmäßigen Überregnung bedarf es einer möglichst langen Aufzeichnung von Messungen mehrerer über das

Einzugsgebiet verteilter Niederschlagsstationen. In den Untersuchungsgebieten stehen dafür die in Tabelle 4.8 aufgelisteten Daten zur Verfügung.

**Tabelle 4.8 Referenzdaten für die ungleichmäßige Überregnung**

Braunschweig	Hamburger Innenstadt	Freiburg
- 3 Stationen	- 7 Stationen	- 8 Stationen
- 25 Jahre lang	- 10 Jahre lang	- 2 Jahre lang
- 2 - 3 km entfernt	- 3 - 20 km entfernt	- 1 – 8 km entfernt

Die verfügbaren Zeitreihen werden einmal für die ungleichmäßige Überregnung parallel angesetzt und zum Vergleich jeweils einzeln als Gebietsniederschläge für die Gesamteinzugsgebietsfläche. Es ergeben sich im Fall Hamburg insgesamt acht Rechenläufe (1x ungleichmäßig, 7x Punkt); in Braunschweig sind es entsprechend vier. Die Untersuchung für das Freiburger Kanalnetz wird aufgrund der Kürze der verfügbaren Zeitreihen und der damit statistisch ungenügenden Aussagekraft, hier nicht dargestellt.

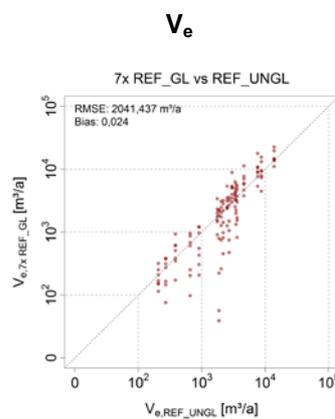
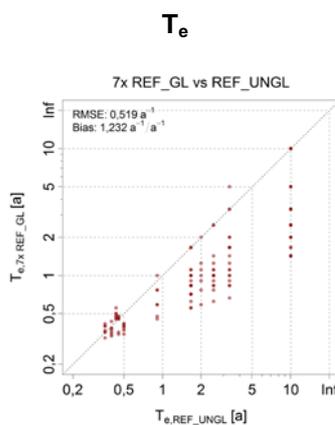
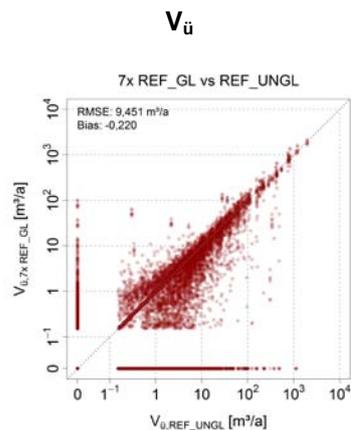
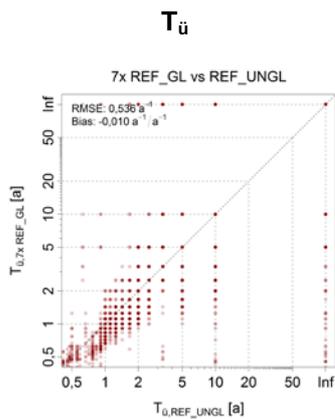
Die Verteilung der Stationen auf die zu berechnenden Flächen bei der ungleichmäßigen Überregnung geschieht über Thiessen-Polygone (vgl. z.B. Abbildung 2.4 für das Hamburger Netz). Während die drei Niederschlagsstationen in Braunschweig in etwa den gleichen Anteil der entwässernden Fläche abdecken, ist die Verteilung in Hamburg deutlich unregelmäßiger. So bedeckt die Niederschlagsstation R008 mit Abstand die größte Fläche.

Die Auswertung der Kanalnetzsimulationen erfolgt in beiden Modellgebieten anhand der abflusseitigen Zielgrößen Überstauwiederkehrzeit ( $T_{\bar{u}}$ ), Überstauvolumen ( $V_{\bar{u}}$ ), Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ) und Entlastungsvolumen ( $V_e$ ). Im Modellgebiet Braunschweig wird außerdem noch die MW-Entlastungsfracht bezogen auf den Parameter CSB ( $B_{e, CSB}$ ) verglichen.

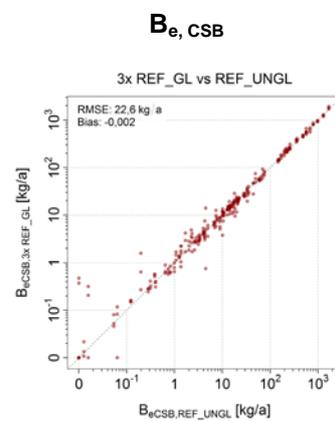
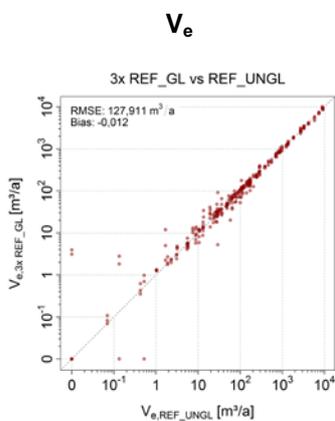
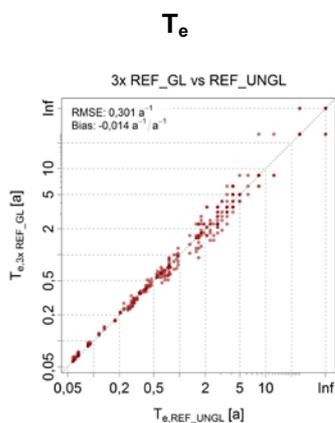
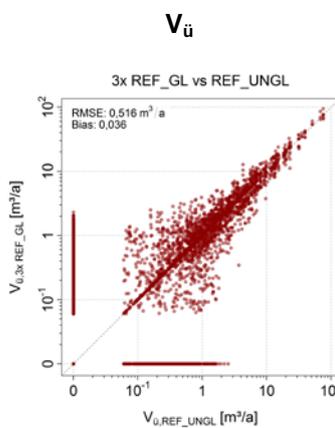
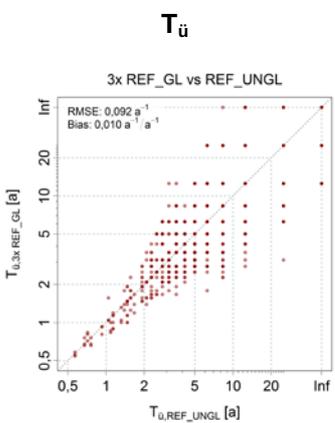
Die Analyse der abflusseitigen Simulationsergebnisse findet mit Hilfe von Streudiagrammen statt. Für jeden Schacht wird auf der Abszisse das Ergebnis der ungleichmäßigen Überregnung und auf der Ordinate das Ergebnis der gleichmäßigen Überregnung abgebildet. Auf der Ordinate sind die Ergebnisse aller durchgeführten Simulationen der gleichmäßigen Überregnung, die zu diesem Zweck übereinander geplottet wurden. Die berechneten Kenngrößen RMSE und Bias geben Auskunft über Stärke und Richtung der Abweichungen.

Insgesamt zeigt sich in den Ergebnissen des Hamburger Netzes eine sehr große Streuung, in der die Abweichungen zwischen gleichmäßiger und ungleichmäßiger Überregnung meist keine klare Richtung vorgeben. Teils werden die Zielgrößen überschätzt, teils unterschätzt und oft verteilen sich die Differenzen über die Bauwerke, so dass sich eine Streuung in beide Richtungen zeigt. Nur für die Zielgröße Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ) ist eine klare Überschätzung unter Ansatz der gleichmäßigen Überregnung zu erkennen. Hier kommt es in sechs von sieben Einzelsimulationen zu mehr Entlastungsereignissen als bei ungleichmäßiger Überregnung. Allerdings ist die 7. Station, welche nur minimale Abweichungen erzeugt, der Regenschreiber R008 mit der größten Flächenabdeckung. Diese Zeitreihe hat offensichtlich überproportional großen Einfluss auf das Ergebnis der ungleichmäßigen Überregnung, was sich auch für die weiteren Zielgrößen bestätigen lässt. So hängt dieses Ergebnis vermutlich eher mit den unterdurchschnittlichen Entlastungsergebnissen der Zeitreihe R008 im Vergleich zu den mit den anderen Regenschreibern durchgeführten Punktsimulationen zusammen, als mit der Methode der ungleichmäßigen Überregnung an sich.

Hamburg Innenstadt



Braunschweig



**Abbildung 4.16 Ergebnisse zum Vergleich der Methoden gleichmäßige vs. ungleichmäßige Überregnung**

Für das Braunschweiger Netz zeigt sich im Gegensatz zu Hamburg kein deutlicher Unterschied im Systemverhalten beim Vergleich von gleichmäßiger und ungleichmäßiger Überregnung. Insbesondere für die Zielgrößen der MW-Überläufe ( $T_e$ ,  $V_e$  und  $B_{e, CSB}$ ) ist quasi kein Unterschied erkennbar. Bei den auftretenden Abweichungen handelt es sich innerhalb der einzelnen Berechnungen teilweise um Überschätzungen und teilweise um Unterschätzungen, so dass eine Streuung der Ergebnisse um die Winkelhalbierende vorliegt, d.h. die Bauwerke reagieren unterschiedlich auf die Differenzen im Niederschlagsinput. Nur für die Zielgröße Überstau-Wiederkehrzeit unter Ansatz der Punkt-Regendaten der Station Grunewaldstraße (GRU) sowie die Zielgröße Überstauvolumen unter Ansatz der Punkt-Regendaten der Station Prinzenweg (PRI) zeigt sich eine erkennbare Überschätzung gegenüber der Berechnung mit ungleichmäßigem Regen. Hier stellt sich die Frage, ob sich diese Unterschiede allein auf den Ansatz ungleichmäßiger Überregnung zurückführen lassen oder ob vielmehr die verschiedenen Regencharakteristiken der Messreihen zu diesem Bild führen.

Die unterschiedlichen Ergebnisse in den beiden Untersuchungsgebieten lassen sich in erster Linie auf die unterschiedliche Entfernung der Regenschreiber zueinander und ihre Verteilung über das Einzugsgebiet zurückführen. Während in Hamburg die verwendeten Regenschreiber relativ weit voneinander entfernt (3-20 km) und unregelmäßig über das Einzugsgebiet verteilt liegen, stehen die Messgeräte in Braunschweig deutlich näher beieinander (max. 4,2 km) und sind gleichmäßig über die Stadt verteilt. Dabei hat die Gesamtfläche des Einzugsgebietes eine geringere Bedeutung, sondern vielmehr die Verteilung der abflusswirksamen Flächen und der Schwachpunkte des Netzes. Je weiter die verwendeten Regenschreiber voneinander entfernt sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich auch ihre Starkregencharakteristik unterscheidet. Mit langen Zeitreihen lässt sich dieser Effekt reduzieren, da dann statistische Unsicherheiten ausgeglichen werden. Das zeigt sich auch in den hier vorliegenden Ergebnissen, bei denen die in Braunschweig verwendeten Zeitreihen 2,5 mal so lang sind, wie die in Hamburg genutzten. Welche Faktoren sich tatsächlich wie stark auswirken, kann anhand dieser Untersuchung nicht geklärt werden, zumal auch die unterschiedlichen Kanalnetzeigenschaften

einen direkten Vergleich nicht erlauben. Einen weiteren Unsicherheitsfaktor bringen die unsanierten Bereiche des Netzes mit sich. Schwachstellen eines unsanierten Netzes zeigen sich z.B. in Form von Schächten, die bei quasi jedem simulierten Regenereignis überstauen. Die in Kapitel 4.1 beschriebene Auswahl an Regenereignissen bei ungleichmäßiger Überregnung bewirkt, dass im Vergleich zur Auswahl aus nur einer Zeitreihe deutlich mehr relevante Regenereignisse existieren und in die N-A-Simulation eingehen (Tabelle 4.9). Die größere Anzahl an Regenereignissen bei der ungleichmäßigen Überregnung bewirkt dann folglich auch mehr Überstauereignisse.

Erfolgt die Auswahl der Ereignisserie hingegen auf Grundlage eines Regenschreibers und wird diese Ereignisserie ungleichmäßig mit den zeitlich parallelen Zeitreihen der übrigen nicht für die Ereignisauswahl verwendeten Regenschreiber gerechnet, so ergibt sich eine geringere Ereignisanzahl sowie eine geringe Anzahl von Überstauungen der Schächte (ZIEGLER ET AL. 2006, STÜCKEN 2000). Dieser Effekt erklärt sich durch die extremwertbezogene Ereignisauswahl für den Standort der Beobachtung und die damit verbundene Flächenabminderung der standortbezogenen Beobachtung.

**Tabelle 4.9** Anzahl ausgewählter Ereignisse für die gleichmäßige und ungleichmäßige Überregnung

	Hamburg	Braunschweig	Freiburg
gleichmäßig durchschnittlich	4,3 /a	23,8 /a	3,1 /a
ungleichmäßig	11,6 /a	26,6 /a	16 /a

Insgesamt zeigt sich hier in beiden Untersuchungsgebieten keine eindeutige Veränderung im Systemverhalten der Netze. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss einzelner Niederschlagsstationen sehr groß sein kann und die Auswahl einer repräsentativen Station für die N-A-Simulation von hoher Relevanz für die Ergebnisse ist. Außerdem wird deutlich, wie wichtig die Zeitreihenlänge für die Qualität der Ergebnisse ist.

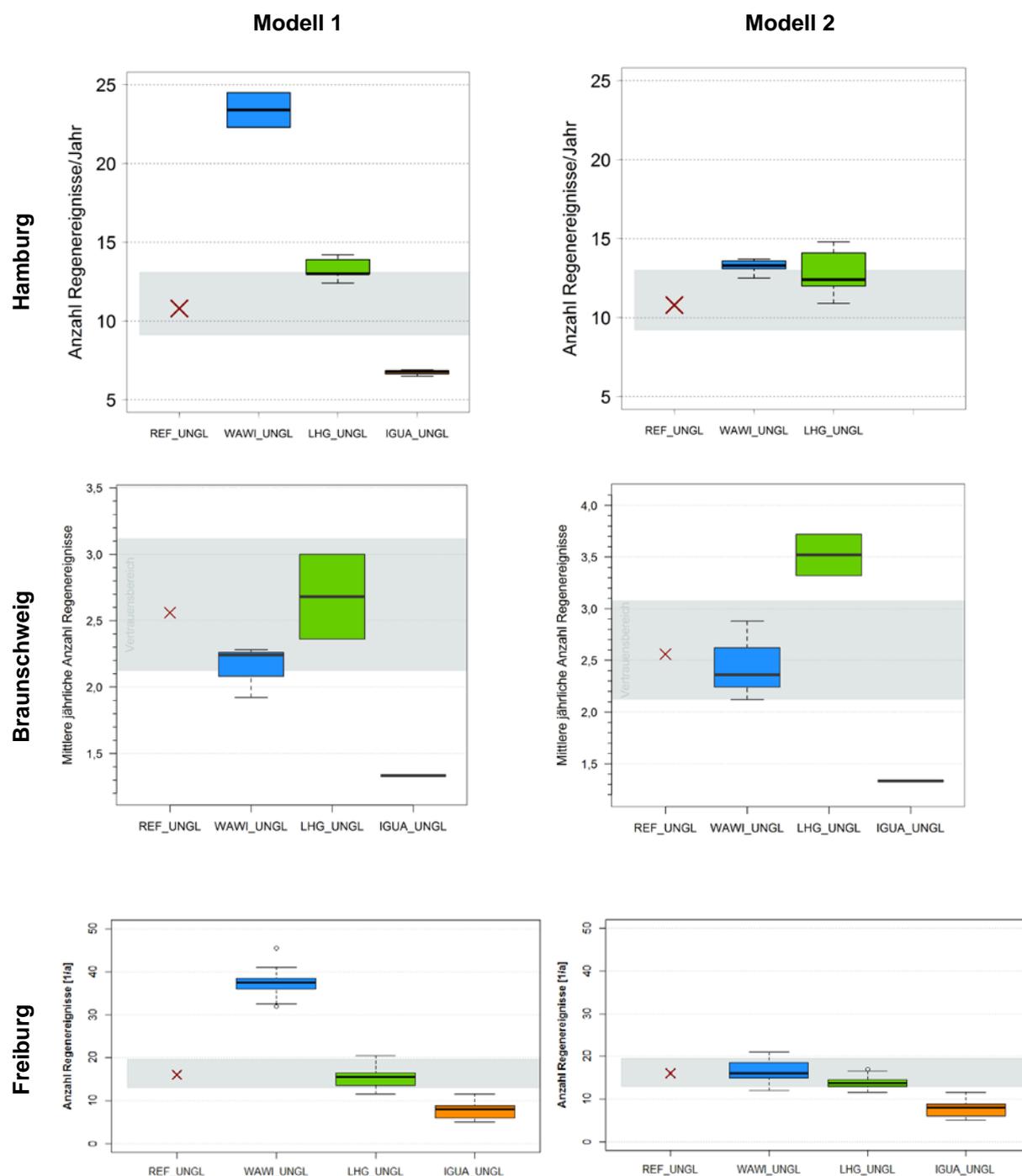
#### **4.3.3.2 Ungleichmäßige Überregnung mit synthetischen Daten**

Das Potenzial synthetischer Niederschlagszeitreihen für ihre Anwendung in der ungleichmäßigen Überregnung wird im Projekt SYNOPSE, aufbauend auf den Analysen zur Punktsimulation ebenfalls untersucht. Von den Universitäten werden zu diesem Zweck zeitlich und räumlich aufeinander abgestimmte Niederschlagszeitreihen für die Standorte der in dieser Untersuchung als Referenz verwendeten Niederschlagsstationen (vgl. Tabelle 4.8) generiert. An der Uni Augsburg wird dabei ein Modellansatz und an den Universitäten Hannover und Stuttgart jeweils zwei verschiedene Modellansätze verfolgt, welche alle, unter Verwendung mehrerer Realisationen, in den drei Kanalnetzmodellen getestet werden (vgl.

Tabelle 2.2). Analog zu den Untersuchungen für gleichmäßige Überregnung werden Vergleichssimulationen mit den Niederschlag-Abfluss-Modellen der drei Städte durchgeführt und im Anschluss die abflusseitigen Ergebnisse systematisch mit den Referenzwerten verglichen. Dabei kommen die bekannten Zielgrößen zum Einsatz: Anzahl an zu Überstau führenden Regenereignissen/Jahr, Überstauwiederkehrzeit ( $T_{\ddot{u}}$ ), Überstauvolumen ( $V_{\ddot{u}}$ ), Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ), Entlastungsvolumen ( $V_e$ ) und CSB-Fracht ( $B_{e, \text{CSB}}$ ).

Die Analyse der Ergebnisse geschieht vor allem über die Darstellung in Streudiagrammen, in denen die Simulationsergebnisse jedes einzelnen Schachtes und Überlaufbauwerkes bzw. Gewässerabschnitts gegenüber gestellt werden und so ein Gesamtbild des Kanalnetzverhaltens gezeigt wird. Auch für die ungleichmäßige Überregnung wurde ein auf Bootstrapping basierender Vertrauensbereich gebildet, welcher der Validierung und anschließenden Bewertung der Ergebnisse dient (vgl. Kapitel 4.1.3).

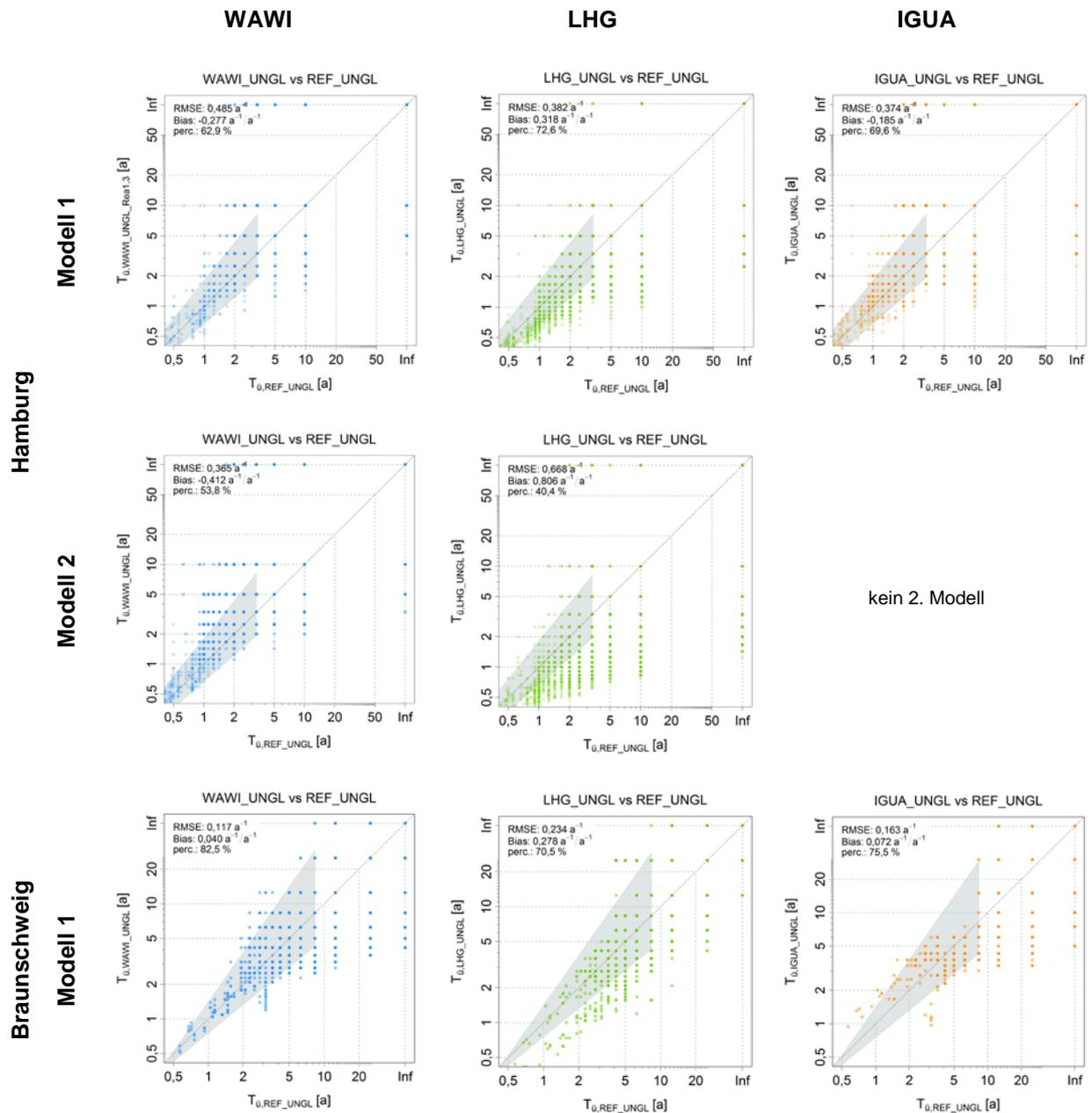
Nachfolgend abgebildet sind die Ergebnisse für die Zielgrößen Anzahl an zu Überstau führenden Regenereignissen, Überstau-Wiederkehrzeit und Entlastungs-Wiederkehrzeit. Die Ergebnisse der Zielgrößen  $V_{\ddot{u}}$  und  $V_e$  und  $B_{e, \text{CSB}}$  können im Anhang des Berichtes nachgeschlagen werden.

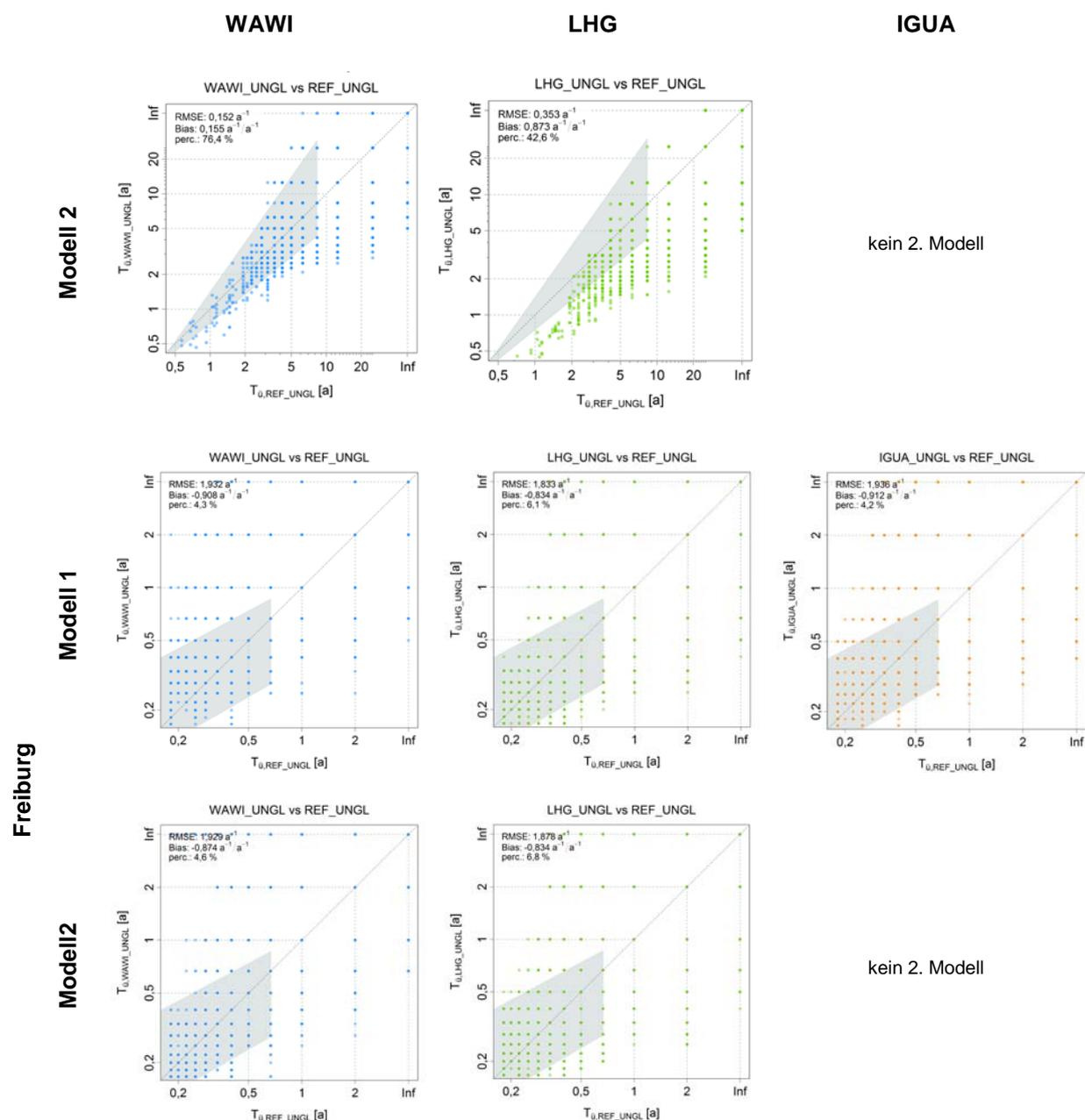


**Abbildung 4.17 Mittlere jährliche Anzahl Regenerereignisse mit Überstau für die ungleichmäßige Überregung**

Die Boxplots in Abbildung 4.17 zeigen die mittlere Anzahl der zu Überstau führenden Regenerereignisse pro Jahr. Eine Box setzt sich dabei aus den Einzelergebnissen aller simulierten Realisationen zusammen. Der graue Vertrauensbereich, welcher mit Hilfe der Bootstrapping-Methode gebildet wird, repräsentiert die Unsicherheiten im

Referenzergebnis, die sich durch die statistische Variabilität in der zeitlichen Abfolge und Häufigkeit von Regenereignissen innerhalb eines begrenzten Zeitraumes ergeben. Der Bereich lässt in beide Richtungen Abweichungen von ungefähr 20 % zu. Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen Modellansätze über alle drei Modellregionen hinweg, so trifft LHG mit Modell 1 beinahe mit allen Realisationen die Vertrauensbereiche und WAWI mit Modell 2. Die synthetischen Zeitreihen enthalten also in diesen Modellansätzen eine vergleichbare Anzahl an überstaura relevanten Regenereignissen wie die gemessenen örtlichen Zeitreihen. Das IGUA-Modell bildet in allen drei Städten zu wenig relevante Ereignisse ab.



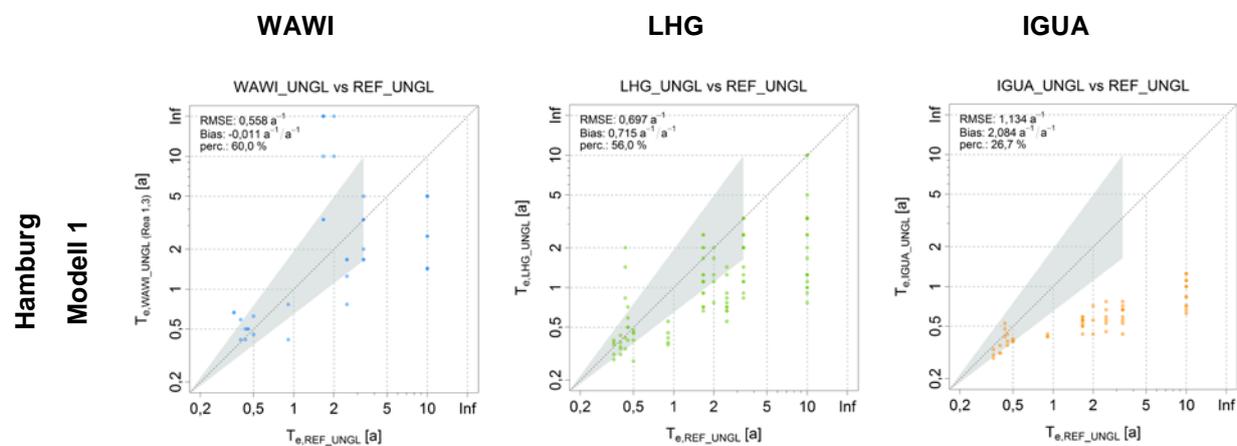


**Abbildung 4.18 Ergebnisse der Zielgrößen Überstau-Wiederkehrzeit ( $T_{\bar{0}}$ ) bei ungleichmäßiger Überregnung**

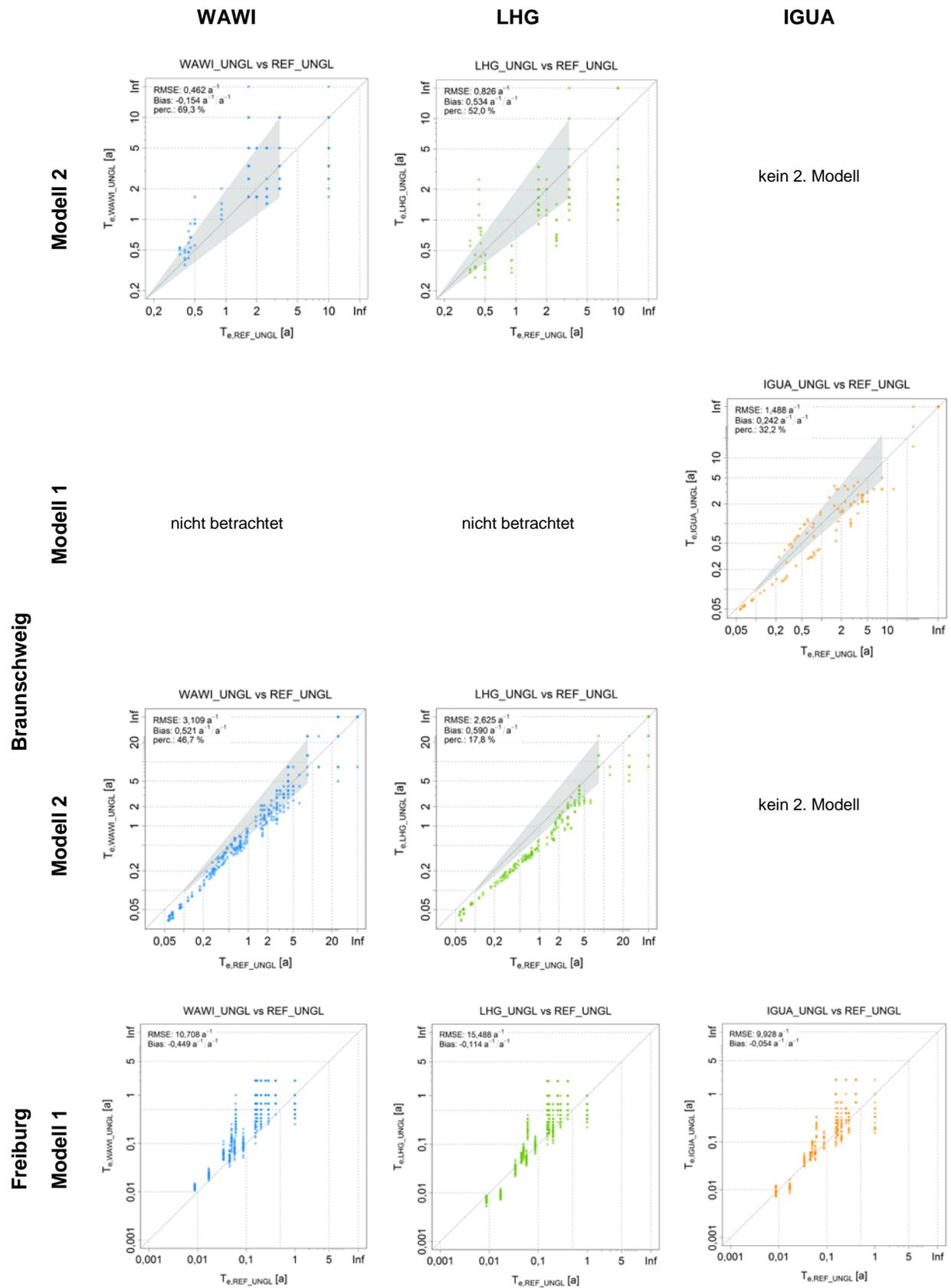
In Abbildung 4.18 sind die N-A-Simulationsergebnisse der Zielgröße Überstauwiederkehrzeit gegenübergestellt und in Abbildung 4.19 die entsprechenden Ergebnisse für die Entlastungs-Wiederkehrzeit. Auf der Abszisse sind jeweils die Referenzergebnisse und auf der Ordinate die Ergebnisse, die auf Grundlage synthetischer Daten entstanden sind, abgebildet.

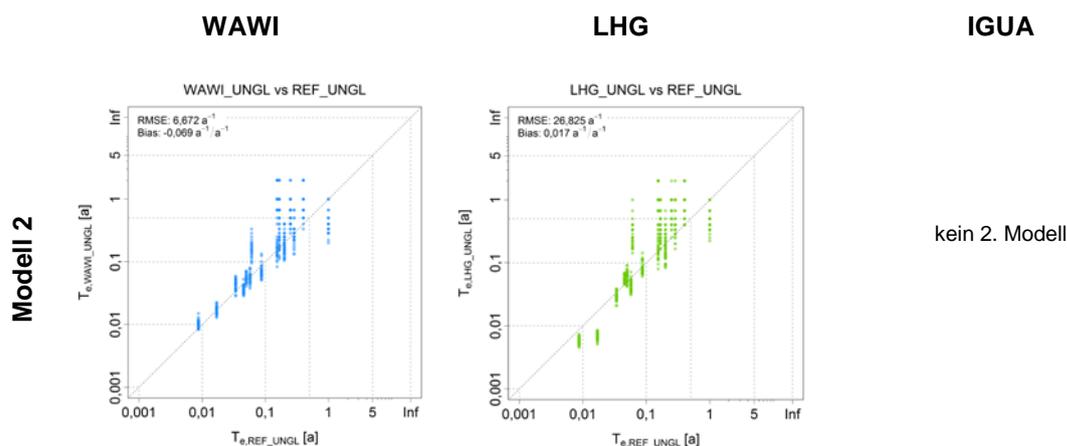
Die Überstau-Wiederkehrzeiten der Schächte im Hamburger und Braunschweiger Netz werden von allen drei Niederschlagsmodellen mit Modellansatz 1 ähnlich gut

getroffen. So erzielen die Modelle für 62 % bis 82 % der ausgewählten<sup>6</sup> Schächte eines Netzes Werte, die innerhalb der über Bootstrapping definierten Unsicherheitsbandbreite der Referenzergebnisse liegen. Die Ergebnisse von WAWI streuen im Braunschweiger Kanalnetz recht ausgeglichen in beide Richtungen, in Hamburg zeigt sich eine Tendenz zur Unterschätzung der Überstauwiederkehrzeiten. Die Ergebnisse von LHG überschätzen tendenziell sowohl im Hamburger als auch im Braunschweiger Netz, während IGUA recht ausgeglichen in beide Richtungen streut. Die 2. Modellansätze von WAWI und LHG treffen den Vertrauensbereich sowohl in Hamburg als auch in Braunschweig weniger gut. Für das LHG-Modell kommt es hier in beiden Städten zu einer deutlichen Überschätzung der Überstauwiederkehrzeiten. Die Ergebnisse im Freiburger Netz zeigen ein gegensätzliches Bild. Sie liegen bei allen Niederschlagsmodellen nur für 4 % bis 7 % der ausgewählten<sup>6</sup> Schächte innerhalb der Unsicherheitsbandbreite. Eine mögliche Erklärung kann der Einfluss der Orographie Freiburgs auf das räumliche Regengeschehen sein, der für die norddeutschen Städte Braunschweig und Hamburg nicht zum Tragen kommt. Grundsätzlich lässt die Kürze der Zeitreihen von zwei Jahren jedoch keine belastbaren Aussagen zu.



<sup>6</sup> Es werden nur die Schächte berücksichtigt, die als Referenzergebnis eine Überstau- oder Entlastungs-Wiederkehrzeit von  $0 < T \leq \frac{1}{3}$  der Referenzzeitreihenlänge aufweisen.





**Abbildung 4.19 Ergebnisse der Zielgrößen Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ) bei ungleichmäßiger Überregnung**

Die Wiederkehrzeiten von Entlastungen der Braunschweiger und Hamburger Überlaufbauwerke zeigen bei allen Niederschlagsmodellen deutlich geringere Übereinstimmungen, als die eben beschriebenen Überstauwiederkehrzeiten der Schächte. Die meisten Modelle erreichen nur für weniger als 50 % der ausgewählten<sup>6</sup> Überlaufbauwerke Werte innerhalb des Unsicherheitsbereiches der Referenzergebnisse. Dabei streuen die Ergebnisse von WAWI im Hamburger Kanalnetz ausgeglichen in beide Richtungen, während sie in Braunschweig die Entlastungs-Wiederkehrzeiten eher überschätzen. Ein überschätzendes Bild zeigt sich in beiden Städten auch mit den Ergebnissen des LHG-Niederschlagsmodells. Die Ergebnisse von IGUA überschätzen in Hamburg gravierend, während sie in Braunschweig eine ausgeglichene Streuung zeigen.

Vergleicht man die Ergebnisse der ungleichmäßigen Überregnung mit denen der gleichmäßigen, so zeigt sich meist eine Verschlechterung in den Ergebnissen der ungleichmäßigen Überregnung beim Vergleich der Referenzzeitreihen mit den synthetischen Reihen. Ausnahme bilden die Ergebnisse aus dem Modellgebiet Braunschweig für die Zielgröße Überstauwiederkehrzeit. Alle drei Niederschlagsmodelle treffen das Referenzverhalten bei ungleichmäßiger Überregnung etwas besser als bei gleichmäßiger.

Auch hier scheint der Effekt der Zeitreihenlänge deutlich zu werden. Die Referenzzeitreihen und die synthetisch generierten Zeitreihen, die bei der ungleichmäßigen Überregnung verwendet werden, sind kürzer als die der gleichmäßigen Punktsimulationen. Das bewirkt größere Unsicherheiten auf beiden Seiten. Zum einen sind die Referenzergebnisse weniger verlässlich, weil sie nur aus

einer relativ kleinen Grundgesamtheit bestehen. Der gleiche Effekt zeigt sich auch bei den kürzeren synthetischen Zeitreihen. Die Streuung zwischen den einzelnen Realisationen ist bei kürzeren Zeitreihen deutlich größer als bei langen Zeitreihen. Die besseren Ergebnisse in Braunschweig stützen diesen Zusammenhang, denn hier sind die Referenzzeitreihe und die synthetischen Zeitreihen mit 25 Jahren beinahe genauso lang, wie die Zeitreihen, welche für die gleichmäßige Überregnung verwendet werden.

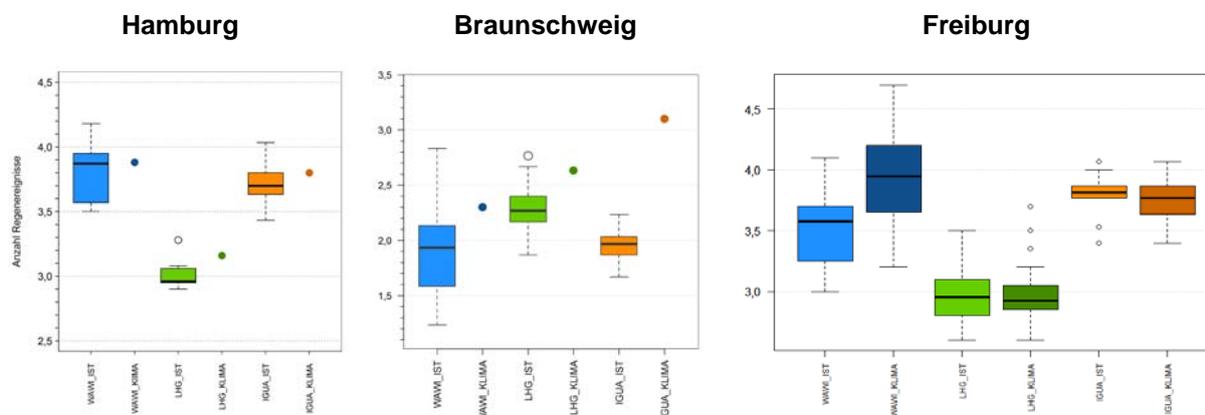
#### **4.3.4 Klimabetrachtung**

Im Rahmen des Projektes wird auch die Anwendbarkeit synthetischer Niederschlagsdaten für Klimasimulationen untersucht. Hierfür wird für die Modellregionen Hamburg und Braunschweig aus den Punkt-Niederschlagsdaten jedes Niederschlagsmodells jeweils die Realisation ausgewählt, die bzgl. der abflusseitigen Berechnungsergebnisse die größte Übereinstimmung mit der Referenzzeitreihe gezeigt hat. Für die Region Freiburg werden alle Realisationen der synthetischen Punkt-Niederschlagsdaten verwendet. Die Zeitreihen werden von der Universität Augsburg auf Grundlage des regionalen Klimamodells WRF mit einem Klimasignal belegt (basierend auf ECHAM5, Rasterauflösung 7 km x 7 km, gerechnet mit Szenario A1B, Methode siehe Kapitel 3.1.3). Um die abflusseitigen Effekte zu beschreiben, werden die generierten Klimazeitreihen als Eingangsgröße für die N-A-Modellierung verwendet und anschließend die resultierenden Ergebnisse mit den Ergebnissen der entsprechenden synthetischen Zeitreihen ohne Klimasignal verglichen.

Abbildung 4.20 zeigt die mittlere jährliche Anzahl zu Überstau führender Regenereignisse in den drei Modellregionen im Vergleich zwischen heutigem Klima (1971-2000) und zukünftigem Klima (2021-2050). Da für Hamburg und Braunschweig jeweils nur eine Klima-Realisation gerechnet wurde, erfolgt die Ergebnisdarstellung als Punkt.

Im Allgemeinen zeigt sich eine nur geringfügige Veränderung der Ergebnisse. Mit sehr wenigen Ausnahmen liegt die Anzahl der zu Überstau führenden Niederschlagsereignisse beim Klima-Szenario innerhalb des Wertebereichs des Ist-Szenarios mit einer leichten Zunahme der Häufigkeiten. Lediglich in Braunschweig

zeigen die Ergebnisse unter Ansatz der Niederschlagsdaten des IGUA-Modells eine deutlichere Zunahme von zwei auf etwa drei Ereignisse pro Jahr.

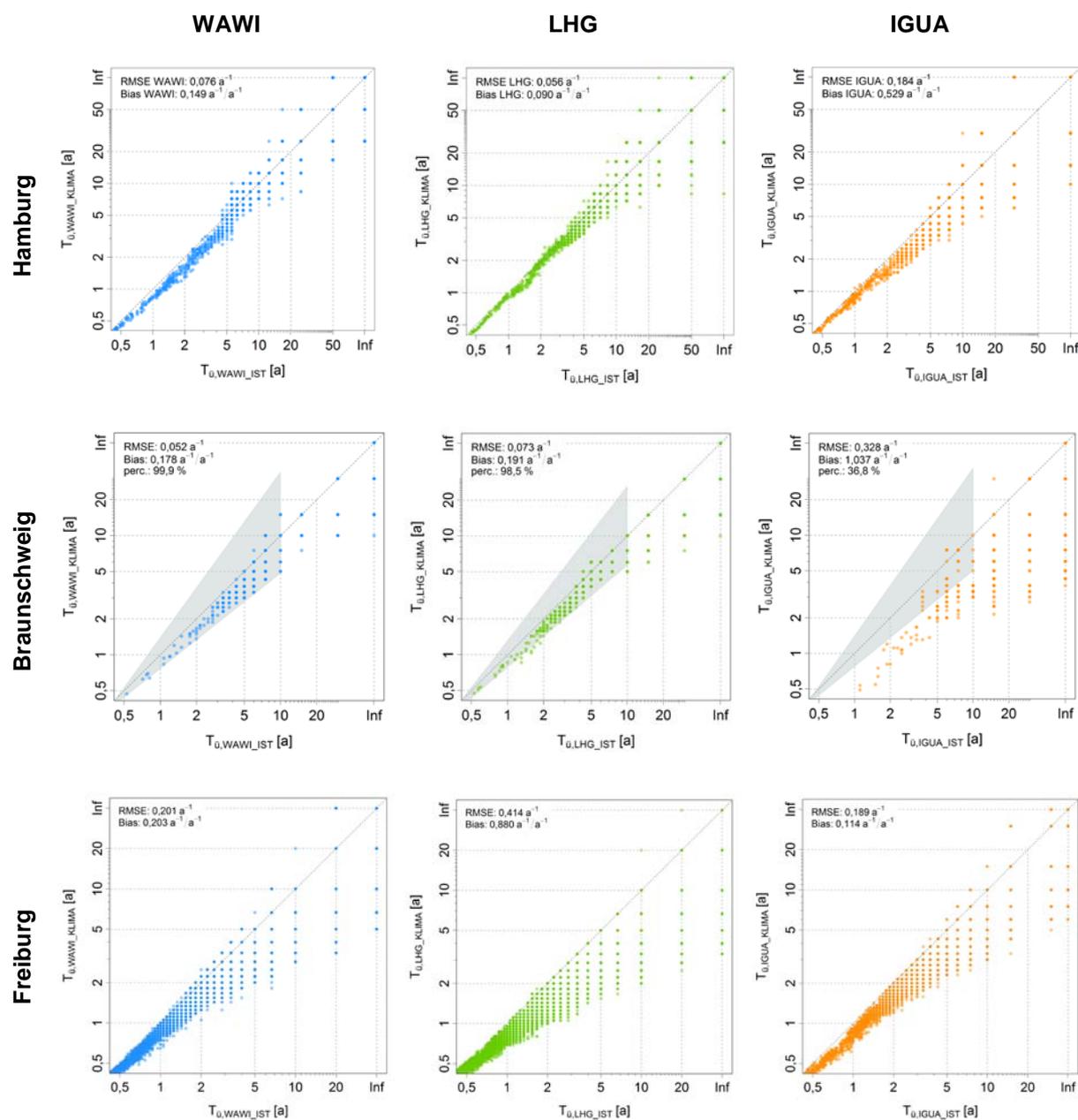


**Abbildung 4.20** Mittlere jährliche Anzahl zu Überstau führender Regenereignisse im Vergleich zwischen heutigem Klima (SYN\_IST, 1971-2000) und zukünftigem Klima (SYN\_KLIMA, 2021-2050)

Der schachtweise Vergleich der Überstau-Wiederkehrzeit  $T_{\bar{u}}$  zwischen heutigem und zukünftigem Klima ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Es zeigt sich eine Abnahme der Wiederkehrzeiten, d. h. im Umkehrschluss eine Zunahme der Überstauhäufigkeit. Je nach zugrunde liegendem Niederschlagsmodell und Modellregion sind die Veränderungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Sie stellen sich im Allgemeinen jedoch als sehr gering dar. Am Beispiel der für Braunschweig dargestellten Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Abnahme der Wiederkehrzeiten innerhalb des Vertrauensbereichs der Ist-Klima-Daten und somit innerhalb der statistischen Variabilität der Häufigkeit der dort abgebildeten Niederschlagsereignisse liegt. Nur die von IGUA für die Region Braunschweig erzeugten Niederschlagsdaten für zukünftiges Klima führen zu einer stärkeren Abnahme der Überstau-Wiederkehrzeiten. Das korrespondiert mit der in Abbildung 4.20 wiedergegebenen erhöhten Anzahl der zu Überstau führenden Regenereignisse. Vergleichbare Aussagen lassen sich bzgl. der Überstauvolumina und auch bzgl. des Entlastungsgeschehens treffen (hier nicht dargestellt).

Da es sich beim simulierten Zeitraum um die sehr nahe Zukunft handelt, erscheint das Ergebnis einer nur geringen Zunahme des Überstau- und Entlastungsgeschehens plausibel. Umfangreichere Berechnungen unter Berücksichtigung verschiedener Klima-Szenarien und einer größeren Anzahl von Realisationen können zu belastbareren Aussagen über die Effekte des Klimawandels

auf das Kanalnetz führen. Aufgrund des Fokus auf die Validierung der synthetischen Niederschlagsdaten für Ist-Klima sind im Rahmen des Projektes jedoch keine weitergehenden Klima-Berechnungen und –Betrachtungen vorgesehen. Prinzipiell wird die Eignung synthetischer Modelle für die Abbildung von Klimaszenarien als gut eingeschätzt, da sie über die Abbildung von mehreren Realisationen die Möglichkeit umfassender Unsicherheitsbetrachtungen bieten.



**Abbildung 4.21** Schachtweiser Vergleich der Überstau-Wiederkehrzeit unter Ansatz der synthetischen Niederschlagsdaten für heutiges Klima (SYN\_IST, 1971-2000) und zukünftiges Klima (SYN\_KLIMA, 2021-2050)

## 5 Bewertung der Ergebnisse

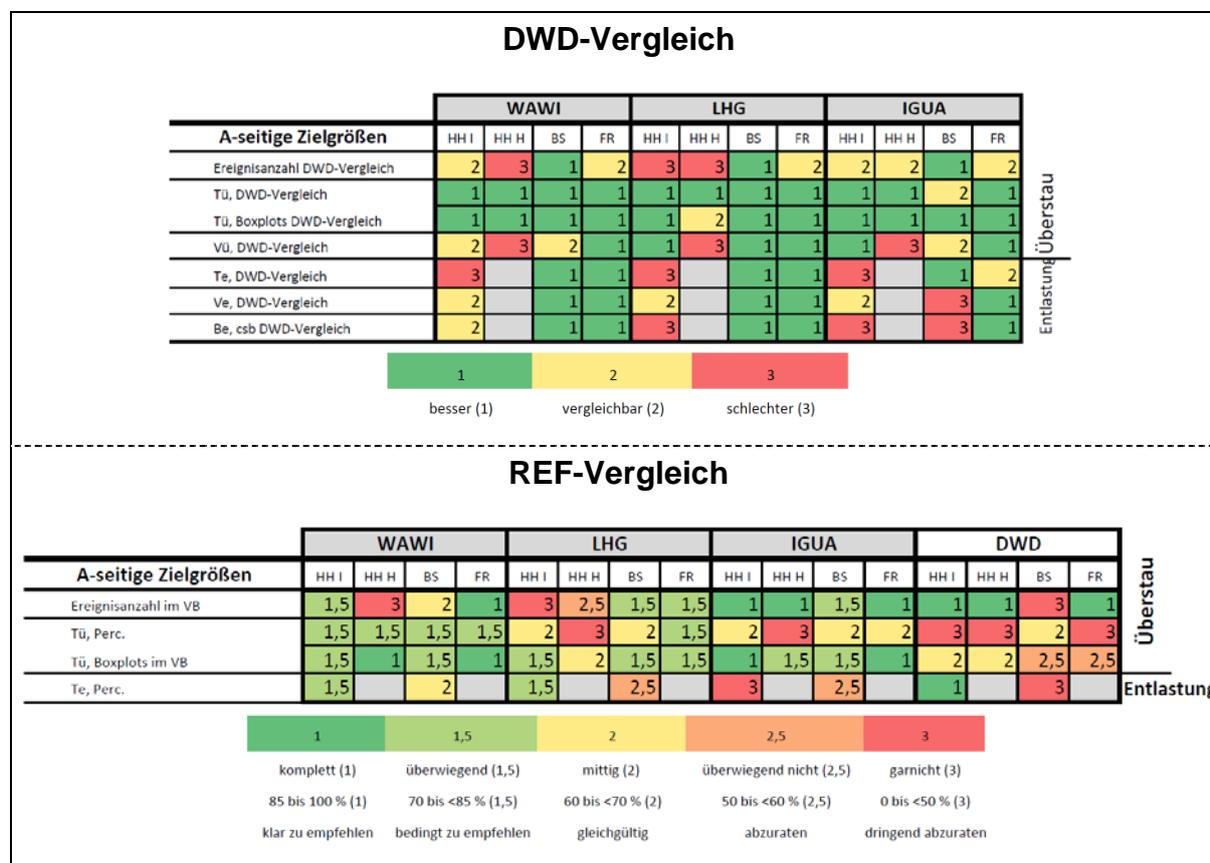
### 5.1 Eignung synthetischer Niederschlagsreihen für die Stadtentwässerung

Um die Eignung der synthetischen Niederschlagszeitreihen für die Stadtentwässerung zu bewerten, ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Die Güte der Niederschlag-Abfluss-Ergebnisse kann je nach Standort, Modell und Zielgröße variieren. Daneben sollte dieses Kapitel im Kontext zu Kapitel 5.3 gesehen werden, welches u. a. die nötigen Voraussetzungen zur Verwendung der synthetischen Niederschlagsreihen behandelt.

#### **Gleichmäßige Überregnung:**

- Im Vergleich mit der benachbarten DWD-Station konnten für alle betrachteten Überstau-Zielgrößen und die Entlastungswiederkehrzeit ( $T_e$ ) in zwei Städten (Braunschweig und Freiburg) bessere oder vergleichbare Ergebnisse erzeugt werden. Insbesondere für die Überstauwiederkehrzeit ( $T_{\ddot{u}}$ ), die eine der wichtigsten Zielgrößen in der Planung und Optimierung von Kanalnetzen darstellt, zeigen sich für alle Städte bessere (22-mal), bzw. vergleichbare (2-mal) Ergebnisse (siehe Abbildung 5.1). Synthetische Zeitreihen sind somit grundsätzlich geeignet, um zu kurze und zu weit entfernte DWD-Zeitreihen zu ersetzen und können dazu beitragen, Planungsunsicherheiten zu reduzieren. (vgl. Abbildung 5.1)
- Der direkte Vergleich der synthetischen Ergebnisse mit der örtlichen Referenz zeigt für alle betrachteten Überstau-Zielgrößen in zwei Städten (Braunschweig und Freiburg) vergleichbare Ergebnisse. Dagegen muss für die Zielgröße Entlastungswiederkehrzeit ( $T_e$ ) für alle N-Modelle noch Verbesserungspotential festgestellt werden. (vgl. Abbildung 5.1)
- Für die kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung (hydrologische Modellierung mit KOSIM, vereinfachtes Modell, nur für Freiburg) und deren Zielgrößen ist eine höhere Güte der Ergebnisse zur Referenz festzustellen als für das Aufgabenfeld der hydraulischen Dimensionierung (Überstaunachweis) mit detaillierten, hydrodynamischen Modellen. Synthetische Niederschlagsdaten

eignen sich folglich besonders gut für die Anwendung als Kontinuum in hydrologischen Modellen.



**Abbildung 5.1 Bewertungsmatrix für die Ergebnisse der gleichmäßigen Überregnung**

Generell ist festzustellen, dass die synthetischen Zeitreihen für den Großteil der betrachteten Zielgrößen Ergebnisse liefern, die das Referenzverhalten genauer abbilden als die Zeitreihen von DWD-Stationen mittlerer Entfernung (gemäß Praxisszenario).

**Ungleichmäßige Überregnung:**

- Der Vergleich der Zielgrößen führt zu einem sehr uneinheitlichen Bild. In der Mehrheit der Fälle zeigt sich überwiegend bis gar keine Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der synthetischen Daten und der Referenz. Lediglich das Niederschlagsmodell LHG 1 zeigt für die Überstau-Kenngrößen überwiegend gute Ergebnisse. Die Anwendung der synthetischen Zeitreihen für die Abbildung der ungleichmäßigen Überregnung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht empfohlen werden. Dies gilt sowohl für die kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung mit hydrologischen Berechnungsansätzen als auch

für die Seriensimulation für die hydraulische Dimensionierung mit hydrodynamischen Abflusstransportmodellen. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Eine wichtige Voraussetzung für weitergehende Untersuchungen ist die Verfügbarkeit langjähriger, zeitlich paralleler und räumlich benachbarter Niederschlags-zeitreihen. (siehe Abbildung 5.2)

REF-Vergleich																
A-seitige Zielgrößen	WAWI 1			WAWI 2			LHG 1			LHG 2			IGUA 1			
	HHI	BS	FR	HHI	BS	FR	HHI	BS	FR	HHI	BS	FR	HHI	BS	FR	
Ereignisanzahl im VB	3	1,5	3	2,5	1	1,5	1,5	1	1,5	1,5	3	1,5	3	3	3	Überstau
Tü, Perc.	2	1,5	3	2,5	1,5	3	1,5	1,5	3	3	3	3	2	1,5	3	
Te, Perc.	2			2	3		2,5			2,5	3		3	3		Entlastung
	1	1,5	2	2,5		3										
	komplett (1)	überwiegend (1,5)	mittig (2)	überwiegend nicht (2,5)		garnicht (3)										
	85 bis 100 % (1)	70 bis <85 % (1,5)	60 bis <70 % (2)	50 bis <60 % (2,5)		0 bis <50 % (3)										
	klar zu empfehlen	bedingt zu empfehlen	gleichgültig	abzuraten		dringend abzuraten										

**Abbildung 5.2** Bewertungsmatrix für die Ergebnisse der ungleichmäßigen Überregnung

### Klimaveränderung – gleichmäßige Überregnung:

- Synthetische Zeitreihen eignen sich zur Abbildung von Klimaänderungen, weil diese den Zeitreihen über Faktoren, ermittelt aus regionalen Klimamodellen, „aufgeprägt“ werden können. Auch wenn eine direkte Validierung der Ergebnisse nicht möglich ist, spricht die Anwendbarkeit der synthetischen Zeitreihen für den gleichmäßigen Überregnungsansatz für das aktuelle Klima dafür, dass mit Hilfe synthetischer Niederschlagsmodelle Abschätzungen von Klimaänderungen auf die urbanhydrologischen Prozesse möglich sind. Die Zeitreihen ermöglichen zum einen auf Grund der großen Zeitreihenlänge Aussagen über die Häufigkeit und Bandbreite extremer Ereignisse; zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass sich die Klimaänderungen in den Zielgrößen in einem unterschiedlichen Ausmaß und Umfang abbilden: z. B. zeigen die Schmutzfrachtergebnisse für Freiburg einen geringen Anstieg der Einstauereignisse jedoch eine überproportionale Zunahme der Entlastungsereignisse. Diese Kontinuums-, bzw. Seriensimulation synthetischer Zeitreihen liefert somit ein differenzierteres Bild als die häufig praktizierte Verwendung statistischer Regenhöhen (z. B. aus KOSTRA-DWD) zur Modellregenerstellung, die mit einem Klimafaktor beaufschlagt werden.

## 5.2 Kosten-Nutzen-Analyse

In einer Kosten-Nutzen-Analyse werden die Vor- und Nachteile der im Projekt untersuchten, verschiedenen Typen von Niederschlagsdaten gegenübergestellt. Das Ergebnis dient dem Anwender als Entscheidungshilfe bei der Wahl der im Rahmen der Entwässerungsplanung zu verwendenden Niederschlagsdaten. Verglichen werden die folgenden Datengrundlagen, die in Tabelle 5.1 definiert sind: A) gemessene, lange örtliche Zeitreihe, B) synthetische Zeitreihe und C) benachbarte Zeitreihe des DWD.

**Tabelle 5.1 Datengrundlagen der Kosten-Nutzen-Analyse**

<b>A gemessene, lange, örtliche Zeitreihe</b>	<b>B synthetische Zeitreihe</b>	<b>C benachbarte, meist kurze Zeitreihe des DWD</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- min. 3 mal so lang wie das Bemessungsziel</li> <li>- 5-minütige Auflösung</li> <li>- Ort der Messung innerhalb des EZG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- min. 30-60 Jahre lang</li> <li>- min. 10 Rechenläufe/Realisationen</li> <li>- 5-minütige Auflösung</li> <li>- generiert für Punkt innerhalb des EZG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittlere Zeitreihenlänge 16 Jahre</li> <li>- mittlere Entfernung zum EZG 30-50km</li> <li>(- hier DWD-Stationen des Praxisszenarios)</li> </ul>

Orientiert an verschiedenen Kosten- und Nutzenposten werden die drei Datengrundlagen einander gegenübergestellt. Dabei sind Kosten und Nutzen nicht monetär hinterlegt sondern werden lediglich „qualitativ“ bzw. in Rangfolgen bewertet. Auf der Nutzenseite werden die Planungssicherheit, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die Bandbreite der Anwendungsfelder und der Zugang zu Daten beleuchtet. Auf der Kostenseite werden die monetären Kosten für Anschaffung und Betrieb, der Planungsaufwand in der Anwendung sowie der Rechenaufwand betrachtet.

Ob für den Nutzer durch die Verwendung synthetischer Zeitreihen ein Mehrwert entsteht und wie hoch dieser ausfällt, hängt stark vom konkreten Anwendungsfall und von den verfügbaren Ressourcen ab. Bei Planungen im Bereich der Stadtentwässerung ist die **Planungssicherheit** in Bezug auf die Bemessungsziele ein zentrales Erfolgskriterium. Je genauer die Planung die Realität widerspiegelt, umso geringer ist das Risiko einer Unter- oder Überdimensionierung. Lange und

hoch aufgelöste örtliche Niederschlagszeitreihen spiegeln das tatsächliche Regengeschehen vergleichsweise genau wider. Verwendet man sie für Kanalnetzsimulationen, führen die Ergebnisse zu einer hohen Planungssicherheit. Doch auch diese Daten sind räumlich und zeitlich beschränkt und können nicht die gesamte Bandbreite des möglichen Regengeschehens abdecken. Diese Unsicherheiten werden häufig unterschätzt. Sie sollten dem Anwender, neben Messfehlern und Datenlücken, aber bewusst sein. Liegt vor Ort keine lange Messreihe vor, dient eine benachbarte DWD-Zeitreihe häufig als Alternative. Auf Grund der Entfernung und Kürze der Zeitreihe erhält man durch sie in vielen Fällen deutlich unsicherere Ergebnisse. Mit synthetischen Zeitreihen lassen sich hingegen oft bessere Ergebnisse erzielen. Aufgrund modellspezifischer Annahmen und Unsicherheiten ist die Planungssicherheit im Vergleich zu langen, gemessenen, örtlichen Zeitreihen per Definition zwar zunächst geringer, allerdings kann sie durch die Verwendung mehrerer Realisationen oder sehr langer Zeitreihen erhöht werden. Darüber hinaus beinhalten synthetische Niederschlagszeitreihen Informationen vieler umliegender Stationen und damit ein größeres Spektrum an Niederschlagscharakteristiken, was die Planungssicherheit zusätzlich erhöhen kann. Ein weiteres Qualitätskriterium für Kanalnetzplanungen ist die **Reproduzierbarkeit** der Ergebnisse. Bei der Verwendung von langen, gemessenen Niederschlagszeitreihen ist die Reproduzierbarkeit sehr hoch. Zwar können sich durch Fortführung der Messungen Änderungen in der Extremwertstatistik der Zeitreihen ergeben, doch haben diese auf Grund des großen Stichprobenumfangs einer langen Zeitreihe kaum Einfluss. Bei kurzen Zeitreihen, wie denen der betrachteten benachbarten DWD-Stationen, können sich wenige Jahre hingegen schon deutlich auswirken. Die Reproduzierbarkeit synthetischer Zeitreihen ist auf Grund der verschiedenen Modellansätze, unterschiedlicher Realisationen bzw. Zeitreihenlängen, unterschiedlicher Datengrundlagen und der stetigen Weiterentwicklung der Modelle zunächst gering, auch wenn einzelne Zeitreihen bei gleichen Eingangsparametern identisch erneut erzeugt werden können. Je länger allerdings die Zeitreihe ist, die genutzt wird, desto reproduzierbarer sind ihre extremwertstatistischen Ergebnisse. Die Zeitreihenlänge ist hier erneut ein Vorteil. In der Entwässerungsplanung werden Niederschlagsdaten für eine große **Bandbreite von Anwendungsfällen** benötigt. Bis zu welcher Wiederkehrzeit

Bemessungsziele verlässlich beschrieben werden können, hängt direkt von der Zeitreihenlänge ab (DWA-A 118). So ist die Bandbreite der Anwendungsfelder bei langen, gemessenen Zeitreihen sehr groß und im Gegensatz dazu bei kurzen Zeitreihen stark eingeschränkt. Auf Grund der beliebigen Länge synthetischer Zeitreihen sind ihre Einsatzmöglichkeiten also prinzipiell sehr groß. Aus statistischer Sicht ermöglichen die Zeitreihen auch Aussagen über sehr seltene Regenereignisse. Es zeigt sich allerdings in den Projektergebnissen, dass die Güte der Ergebnisse zwischen verschiedenen Zielgrößen stark variieren kann.

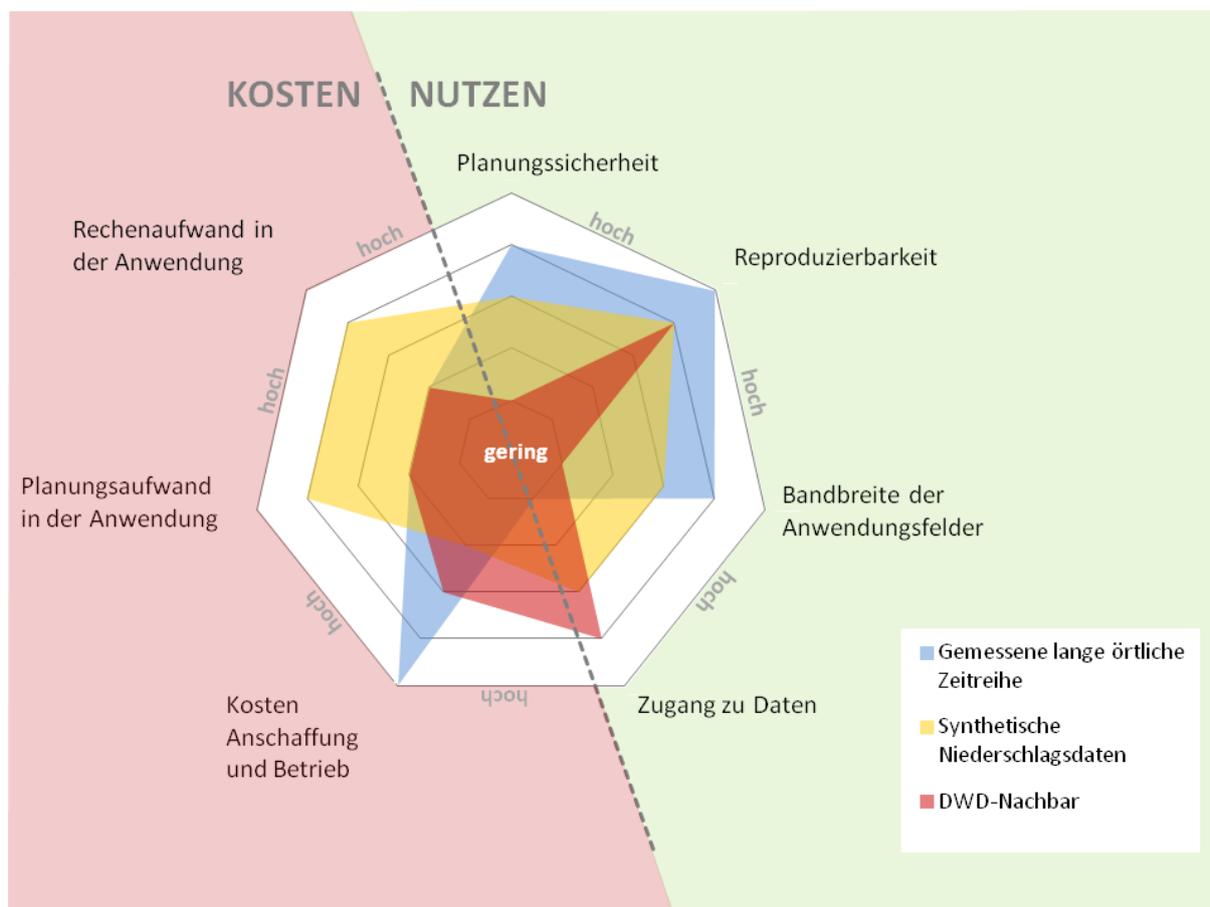
Der **Zugang zu Daten** für die Kanalnetzplanung ist häufig der limitierende Faktor bei der Auswahl einer geeigneten Niederschlagszeitreihe als Datengrundlage. Lange, zeitlich hochaufgelöste gemessene Daten liegen am Untersuchungsort selten vor und der Aufbau eines Messnetzes führt erst in ferner Zukunft zu einer verwendbaren Datengrundlage. Meist befindet sich in der Nachbarschaft eine Niederschlagsstation des DWD, deren Zeitreihen in ganz Deutschland kostenpflichtig zur Verfügung stehen. Synthetische Zeitreihen sind aktuell in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen zu erwerben. Kurz bis mittelfristig sollen Daten für ganz Deutschland bereitgestellt werden.

Ein wichtiges Entscheidungskriterium sind die monetären **Kosten**, die für die unterschiedlichen Datengrundlagen anfallen. Die **Anschaffung** und der **Betrieb** eines eigenen Niederschlagmessnetzes sowie die **Qualitätssicherung** und die **Dokumentation** der Daten sind im Vergleich zum Bezug von Daten des DWD oder synthetischen Zeitreihen sehr teuer. Vergleicht man die Preise gemessener Daten des DWD mit den synthetischen Zeitreihen, so sind die letzteren günstiger. Setzt man die hier beschriebenen Kosten für die Niederschlagsdaten allerdings in Relation zu den Baukosten einer resultierenden Planung, so sind sie oft nur noch ein kleiner Teil der Gesamtausgaben und sollten deshalb nicht überbewertet, sondern vielmehr als lohnende Investition betrachtet werden.

Die Entscheidung für eine der drei Datengrundlagen bringt für den Nutzer einen unterschiedlich großen **Planungsaufwand in der Anwendung** mit sich. Bei Verwendung einer langen, örtlichen Messzeitreihe ist der Planungsaufwand vergleichsweise gering. Es ist nur eine einzelne Kanalnetzsimulation nötig und die Ergebnisse können schnell und einfach ausgewertet werden. Gleiches gilt für die kurze Zeitreihe einer benachbarten DWD-Station. Bei der Verwendung synthetischer

Zeitreihen ist der Planungsaufwand dagegen vergleichsweise hoch. Um die Vorteile der synthetischen Zeitreihen zu nutzen, sollten entweder viele Realisationen oder eine sehr lange Zeitreihe in die Kanalnetzsimulation einfließen. Zur Auswertung und Bewertung der Simulationsergebnisse bedarf es eines Anwenders mit Erfahrung.

Der eigentliche **Rechenaufwand** ist abhängig von der Anzahl an Realisationen mit denen simuliert wird. Die Verwendung synthetischer Niederschlagsdaten bedarf also deutlich mehr Rechnerkapazitäten, als bei den gemessenen, einzelnen Zeitreihen nötig sind. Bedenkt man jedoch, dass Unsicherheitsbetrachtungen, z. B. im Rahmen von Klimafolgenabschätzungen, in Zukunft generell wichtiger werden, gewinnt die Simulation mit mehreren Realisationen auch bei der Verwendung gemessener Daten an Bedeutung.



**Abbildung 5.3 Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Niederschlagsdaten**

Wie Abbildung 5.3 veranschaulicht, füllen die verglichenen Datengrundlagen die Kosten- und Nutzenpositionen unterschiedlich stark aus. Je nach Fragestellung und Ausgangsvoraussetzungen kann für den Nutzer die eine oder andere Datengrundlage am geeignetsten sein. Ein individuelles Abwägen der erläuterten

Punkte kann als Entscheidungshilfe dienen. Zusammenfassend können die folgenden Feststellungen gemacht werden: Lange, örtlich gemessene Zeitreihen bringen den größten Nutzen mit sich, sind aber teuer in Anschaffung und Betrieb und häufig schlichtweg nicht vorhanden. Benachbarte DWD-Zeitreihen haben relativ geringe Kosten, aber gleichzeitig auch wenig Nutzen. Der Nutzen synthetischer Niederschlagsdaten verteilt sich breit über die untersuchten Positionen, während sich die Kosten vor allem aus einem hohen Rechen- und Planungsaufwand zusammensetzen.

### **5.3 Praxisempfehlungen und Verwertung**

Niederschlagsmessungen sind die wichtigste Grundlage für die Berechnung urbanhydrologischer Prozesse und die Auslegung entwässerungstechnischer Anlagen. Auch die synthetischen Niederschlagsmodelle basieren auf Niederschlagsmessdaten. Die Instandhaltung bestehender Messnetze mit dem Ziel der Bereitstellung langer, kontinuierlicher Zeitreihen in hoher zeitlicher Auflösung sollte daher auch in Zukunft intensiv betrieben werden.

Ein großer Vorteil synthetischer Niederschlagszeitreihen besteht darin, dass sie grundsätzlich mit den in SYNOPSE verwendeten Niederschlagsmodellen für jeden Ortspunkt generiert werden und so die im Messnetz vorhandenen Lücken schließen können. Dabei werden bei der Generierung der synthetischen Zeitreihen auch die Niederschlagscharakteristiken umliegender Orte berücksichtigt.

Die Projektergebnisse zeigen, dass sich mit langen synthetischen Zeitreihen in den meisten der untersuchten Anwendungsfälle bessere Ergebnissen erzielen lassen, als mit den verfügbaren, oft deutlich kürzeren Zeitreihen benachbarter DWD-Stationen. Liegen örtlich keine hochaufgelösten und ausreichend langen Zeitreihen vor, ist die Verwendung synthetischer Niederschlagsdaten zu empfehlen und der Nutzung von Nachbarstationen, die zu weit entfernt liegen oder deren Registrierungen zu kurz sind, vorzuziehen.

Die Variabilität innerhalb der synthetischen Daten zeigt, dass die Verwendung einer einzelnen synthetischen Zeitreihe üblicher Länge (dreifache Wiederkehrzeit des Bemessungsziels) nicht ausreicht, um das örtliche Niederschlagsspektrum repräsentativ abzubilden. Im SYNOPSE-Projekt hat sich eine Verlängerung der synthetischen Zeitreihe mindestens um den Faktor 10 als verlässlich herausgestellt.

Alternativ können zehn oder mehr Realisationen herkömmlicher Länge verwendet werden. Als Faustformel zur Festlegung der erforderlichen Länge der synthetischen Zeitreihen lässt sich also festhalten:

$$\text{Länge synthetische Zeitreihe} = \text{Wiederkehrzeit Bemessungsziel} \times 3 \times 10$$

Ob abhängig vom Anwendungsfall und verwendeten Niederschlagsmodell auch eine kürzere Zeitreihe bzw. eine geringere Anzahl von Realisationen ausreichend ist, sollte Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein.

Zur Vorabschätzung der Eignung einer synthetischen Zeitreihe ist die Voranalyse ihrer partiellen Serien für die je nach Anwendungsfall maßgeblichen Dauerstufen ein empfehlenswertes Mittel. So können Ausreißer identifiziert und die Daten durch den Abgleich mit Erfahrungswerten plausibilisiert werden.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Nutzung synthetischer Daten zur Abbildung ungleichmäßiger Überregnung ebenfalls möglich ist, ihre Verwendung jedoch aufgrund der bislang unzureichenden Berücksichtigung der zeitlich-räumlichen Zusammenhänge (z.B. Wolkenzugrichtung) noch nicht empfohlen werden kann. Grundsätzlich ist der Einfluss der Ungleichmäßigkeit der Überregnung abhängig von der Topologie und Ausdehnung des Entwässerungssystems, orographischen und klimatischen Einflüssen sowie der Länge der verwendeten Zeitreihe. Im Rahmen von SYNOPSE konnten diese vielschichtigen Einflüsse auf Grund der begrenzten Datengrundlage zur Validierung jedoch nicht umfassender untersucht werden.

Auch eine gemessene, örtliche Niederschlagszeitreihe kann immer nur einen Teil der Realität wiedergeben; sie ist zeitlich und räumlich beschränkt und unterliegt stochastischen Effekten des Wettergeschehens. Der statistische Vergleich der Abflussergebnisse benachbarter Niederschlagsstationen innerhalb von SYNOPSE zeigt den großen Einfluss der räumlichen Variabilität des Niederschlagsgeschehens. Diese Unsicherheiten sollten dem Nutzer bewusst sein, besonders wenn es sich um kurze Zeitreihen (kleiner als die dreifache Wiederkehrzeit des Bemessungsziels) handelt. Die Erwartungshaltung der heutigen Bemessungspraxis beruft sich auf klare Grenzwerte und verlangt nach präzisen Simulationsergebnissen. Dies steht aber im Gegensatz zu den Unsicherheiten in den Niederschlagszeitreihen – sei es in

synthetischen oder gemessenen Daten. Hier sollte ein Umdenken hin zu Unsicherheitsbetrachtungen stattfinden. Gerade in Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels und anderer unsicherer Zukunftsprognosen, wie demographischer Entwicklung und Stadtentwicklung wird das Verständnis von Bandbreiten und ihre Kommunikation immer bedeutender.

Die Anwendung synthetischer Niederschlagszeitreihen kann eine verlässliche und gleichzeitig wirtschaftlich effiziente Kanalnetzplanung ermöglichen und eine praxistaugliche Planungsgrundlage darstellen. Der Aufwand zur Auswertung der umfangreichen Berechnungsergebnisse sollte dabei immer im Verhältnis zu der zu planenden Maßnahme und den Gesamtinvestitionskosten gesehen werden. Zukünftig wird der mit den großen Zeitreihenlängen verbundene Rechenaufwand zunehmend weniger ins Gewicht fallen. Auch der Planungsaufwand kann durch verbesserte Methodik (Niederschlagsmodelle, Zeitreihenlänge, Auswerteroutinen) reduziert werden.

Der am LHG entwickelte Niederschlagsgenerator NiedSim wird z.B. bereits von vier verschiedenen Landesbehörden (Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen, Bayern) verwendet. Diese stellen damit Ingenieurbüros synthetische Niederschlagsreihen zur Verfügung. Die Weiterentwicklungen des Niederschlagsgenerators für Punktniederschläge werden in einer neuen Version (NiedSim3) des Niederschlagsgenerators integriert.

## **6 Zusammenfassung**

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.

Die generierten Zeitreihen wurden hinsichtlich des Niederschlagskontinuums, der enthaltenen Ereignisse und der Extremwerte validiert und analysiert. Dabei zeigen die Niederschlagsmodelle in Abhängigkeit des betrachteten Kriteriums und der jeweiligen Region Stärken und Schwächen. Keines der Modelle kann als eindeutiger Favorit gesehen werden.

Für die urbanhydrologische Modellierung wurden sowohl generierte als auch beobachtete Zeitreihen als Eingangsdaten verwendet. Die Untersuchungen mit den Niederschlagsmodellen haben gezeigt, dass synthetische Regenreihen für den Großteil der betrachteten Zielgrößen Ergebnisse liefern, die näher an der Realität sind als Stationen aus dem DWD – Messnetz, die sich entsprechend der Messnetzdichte in einer typischen Entfernung (hier 29-50 km) zum Bemessungsort befinden („Praxisszenario“).

Dieser Nachweis erfolgte mit Hilfe von direkt an ausgewählten Orten verfügbaren Referenzregenreihen, die für die Niederschlagsmodellierung nicht berücksichtigt wurden. Als Nachweiskriterien wurden sowohl Niederschlagscharakteristika (Jahresniederschlag, Anzahl Ereignisse, Extremwertstatistiken u.a.) als auch Abflusscharakteristika (Überstauhäufigkeit, -dauer und Volumen, u.a.) verwendet. Für die Niederschlagscharakteristika wurde eine Kreuzvalidierung für alle registrierenden Niederschlagsstationen mit ausreichend langen Reihen in den Bundesländern Baden-Württemberg und Niedersachsen durchgeführt (insgesamt ca. 50 Stationen). Für die Abflusscharakteristika erfolgte die Validierung anhand von drei in verschiedenen Klimabereichen liegenden Kanalnetzen Hamburg, Braunschweig und Freiburg. Zur Ermittlung der Abflusscharakteristika erfolgten hydrodynamische Kanalnetzsimulationen mit den unterschiedlichen Niederschlagsbelastungen.

Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen von SYNOPSE folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die N-Modelle liefern für punktuelle Simulation (gleichmäßige Überregnung) für den Großteil der betrachteten Zielgrößen bessere Ergebnisse als das Praxisszenario. Die Modellgüte gegenüber den Referenzreihen ist derzeit als gut bis befriedigend einzuschätzen. Eine Einführung in die Bemessungspraxis kann empfohlen werden.
2. Für die multivariate N-Simulation (ungleichmäßige Überregnung) bestehen allerdings noch Defizite. Eine uneingeschränkte Einführung in die Bemessungspraxis ist noch nicht zu empfehlen.

3. Keines der drei getesteten Niederschlagsmodelle ist eindeutiger Favorit hinsichtlich der Modellgüte. Die Rangfolge der Modelle variiert je nach betrachtetem Zielkriterium und Untersuchungsgebiet.
4. Wesentliche Kriterien für die Auswahl eines N-Modells für die Praxis sind deren nicht zu hohe Komplexität, eine ausreichende Transparenz und deren Handhabbarkeit für einen flächendeckenden Einsatz in Deutschland.

## Literatur

- Asquith, W., (2012): lmomco-L-moments, trimmed L-moments, L-comoments, censored L-moments, and many distributions [online]. R package version 1.6.1. Available from: <http://www.cran.r-project.org/package=lmomco>. [Accessed 30 March 2012].
- Angermaier, G., Braunschmidt, S. und Obermayer, A., (2012): Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Führung eines Überflutungsnachweises in urbanen Gebieten. GeoCPM: Geowissenschaftliche Simulation städtischer Abflussvorgänge. Korrespondenz Abwasser, Abfall (59), Nr. 5, 2012
- ATV (1992): Arbeitsblatt ATV-A 128: Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. GFA, Hennef, April 1992
- ATV-DVWK (2004): Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bestehender Entwässerungssysteme. Arbeitsbericht der ATV-DVWK Arbeitsgruppe ES 2.1 „Berechnungsverfahren“. Korrespondenz Abwasser (51) Nr. 1, 2004
- Bárdossy, A., (1998): Generating precipitation time series using simulated Annealing. Water Resources Research, 34(7):1737-1744.
- Bárdossy, A. und Hörning, S., (2016): Random Mixing: An Approach to Inverse Modeling for Groundwater Flow and Transport Problems. Transport in Porous Media, 114(2): 241-259.
- Bárdossy, A. und Li, (2008), J.: Geostatistical interpolation using copulas, Water Resources and Research, Volume 44, Issue 7.
- Bárdossy, A. und Pegram, G. G. S.: Copula based multisite model for daily precipitation simulation. Hydrology and Earth System Sciences 13 (2009), Nr. 12, 2299–2314.
- Berg P., Wagner S., Kunstmann H., Schaedler G., (2013). High resolution regional climate model simulations for Germany: part I — validation, Climate Dynamics, Volume 40, Issue 1, pp 401-414.
- Berndt, C., Rabiei, E., & Haberlandt, U., (2014). Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios. Journal of Hydrology, 508, 88-101.

- Charpentier, A. und Flachaire, E., (2014). Log-Transform Kernel Density Estimation of Income Distribution. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=2514882> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2514882>, September 29, 2014.
- Czado, C., (2010). Pair-copula constructions of multivariate copulas. In P. Jaworki, F. Durante, W. Härdle, and T. Rychlik (Eds.), Workshop on Copula Theory and Its Applications, Lecture Notes in Statistics 198, DOI 10.1007/978-3-642-12465-5\_1,\_c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- Delignette-Muller, M.L., Pouillot, R., Denis, J.B., Dutang, C., (2010). fitdistrplus: help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data [online]. R package. Available from: <http://cran.r-project.org/web/packages/fitdistrplus/index.html> .
- DIN (2008): DIN EN 752. Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Berlin, 2008
- DWA (2006): Arbeitsblatt DWA-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, März 2006
- DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 102: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Oktober 2016 (Gelbdruck)
- DWA (2016): Merkblatt DWA-M 119: Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, November 2016
- DWA-BWK (2013). Starkregen und urbane Sturzfluten – Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. DWA-Themen T1/2013, Hennef, August 2013
- DWD (2005) KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000). Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main
- Efron and Tibshirani, (1993): An Introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall/CRC, 1993.

- Fuchs, L., (2013). Methoden und Beispiele zur Gefährdungsanalyse und Risikoabschätzung von urbanen Sturzfluten, in 13. DWA Regenwassertage, 10.-11. Juni 2013, Freiburg i. Breisgau
- Genest, C. and A. Favre, (2007). Everything You Always Wanted to Know about Copula Modeling but Were Afraid to Ask. *Journal of Hydrological Engineering* 12, 347-368.
- Haberlandt, U., (1996). Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen. PhD thesis, Inst. für Wasserbau, Univ. Stuttgart, Mitteilungen, Heft 88, 1996.
- Haberlandt U., (1998) Stochastic rainfall synthesis using regionalized model parameters. *J Hydrol Eng* 3(3):160–168
- Haberlandt U., Ebner von Eschenbach A.-D., and I. Buchwald, (2008). A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12: 1353-1367.
- Hofert, M., Maechler, M., (2011). Nested Archimedean Copulas Meet R: The nacopula Package. *Journal of Statistical Software*, 39(9), 1-20.
- Itwh, (2014). Kanalnetzberechnung. Hydrodynamische Abfluss-Transport-und Schmutzfrachtberechnung. HYSTEM-EXTRAN 7. Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover
- Knoesen, D. and Smithers, J., (2009). The development and assessment of a daily rainfall disaggregation model for South Africa, *Hydrological Sciences*, 54
- Kojadinovic, I., Yan, J., (2010). Modeling Multivariate Distributions with Continuous Margins Using the copula R Package. *Journal of Statistical Software*, 34(9), 1-20.
- Lorenz, M, (2016). A copula-based downscaling methodology of RCM precipitation fields, Vortrag, EGU General Assembly 2016.
- Nelsen, R. B., (2006). *An Introduction to Copulas*. 2nd edition. Springer, New York. ISBN 9780387286594.
- Olsson, J., (1998): Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2 (1), 19-30
- R Development Core Team, (2012). *R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics*. R version 2.15.0. Available from: <http://www.r-project.org/> [Accessed 30 March 2012].

- Rabiei, E., & Haberlandt, U., (2015). Applying bias correction for merging rain gauge and radar data. *Journal of Hydrology*, 522, 544-557
- Rohde, S., Müller, H., Schroeder, K., Kuchenbecker, A., Haberlandt, U., (2014). SYNOPSE – Künstliche Niederschlagsreihen. Das BMBF-geförderte Verbundprojekt erforscht Entwicklung und Anwendung synthetischer Niederschlagsdaten, *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik*, 11-12, S. 8-11
- Rohde, S., Müller, H., Schroeder, K., Kuchenbecker, A., Haberlandt, U., (2015). Mit SYNOPSE auf Starkregen und urbane Sturzfluten vorbereiten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 62(2)
- Rossman, L. A., (2010). Storm Water Management Model Version 5.0 User's Manual Revised July 2010. U.S. Environmental Research Agency. EPA/600/R-05/040
- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N.T. and R. Rosso., (2007). *Extremes in Nature: An Approach Using Copulas*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 9781402044144.
- Schepsmeier, U.; Stoeber, J.; Brechmann, E.C.; Graeler, B., (2014). *Vine Copula: Statistical inference of vine copulas*, R package version 1.3.
- Segond, M-L., (2006). *Stochastic Modelling of Space-Time Rainfall and the Significance of Spatial Data for Flood Runoff Generation*, Dissertation, Imperial College London.
- Serinaldi, F., (2009). A multisite daily rainfall generator driven by bivariate copula-based mixed distributions, *Journal of Geophysical Research*.
- Sinclair, S. and Pegram, G., (2005). Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmosph. Sci. Lett.*, 6: 19–22. doi: 10.1002/asl.85
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G., (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*, 125pp., NCAR Tech. Note NCAR/TN–475+STR .
- Stücken, L.; (2000). *Auswirkungen von gleichmäßiger und ungleichmäßiger Überregnung bei Überstau- und Schmutzfrachtberechnungen*, Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, 2000

- Tandler.com (2014). ++SYSTEMS. Modellierungswerkzeug für wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen. Handbuch. Tandler.com GmbH, Buch am Erlbach
- van den Berg, M.J., Vandenberghe, S., De Baets, B. and Verhoest, N.E.C., (2011). Copula-based downscaling of spatial rainfall: a proof of concept, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13
- Venables, W. N. and Ripley, B. D., (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth edition. Springer.
- Verworn, H.-R., (1999): Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie, *Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz*, Heft 18
- Wagner S., Berg P., Kunstmann H., Schaedler G, (2013). High resolution regional climate model simulations for Germany: part II — projected climate changes, *Climate Dynamics*, Volume 40, Issue 1, pp 415-427, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-012-1510-1>.
- Wagner S., Kunstmann H, (2016). High resolution precipitation fields for the planning of urban drainage systems using WRF; Technical Report, Steinbuch Computing Centre, KIT.
- Wilks DS, (1998). Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *J Hydrol* 210(1–4):178–191
- Yan, J., (2007). Enjoy the Joy of Copulas: With a Package copula. *Journal of Statistical Software*, 21(4), 1-21.
- Ziegler, J., Krämer, S., Verworn, H.-R., (2006). Langzeitsimulation mit Radardaten, *Korrespondenz Abwasser* 2006 (53) Nr. 11, 1123-1129

## 7 Anhang

### 7.1 Validierung räumlicher bivariater Kriterien

Die für die Validierung genutzten bivariaten Kriterien sind die Auftretenswahrscheinlichkeit, das Kontinuitätsverhältnis und der Korrelationskoeffizient. Die Beobachtungswerte dieser drei Kriterien sind in Abbildung 3.10 dargestellt, die Validierungsergebnisse in Tabelle 7.1. Aufgrund der geringen Beträge der Beobachtungskriterien (z.B. die Auftretenswahrscheinlichkeit in BS hat einen mittleren Wert von 0,02) äußern sich auch geringe Abweichungen bereits in hohen Prozentzahlen.

**Tabelle 7.1 Validierung der räumlichen bivariaten Kriterien (alle Abweichungen in [%])**

	Bedingte Wahrscheinlichkeit		Korrelations- koeffizient		Kontinuitätsmaß	
	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias
Wawi V1	62	-47	48	-45	11	1
	92	-92	50	-49	19	15
	74	-74	96	-96	28	9
Wawi V2	622	468	80	68	101	97
	79	79	24	-23	222	221
	113	104	78	3	151	139
LHG V1	148	56	72	-70	31	-28
	17	-11	53	-52	22	-18
	34	-25	70	-54	43	-37
LHG V2	156	70	65	-61	32	-61
	14	-7	41	-39	29	-25
	31	-21	69	-44	45	-39
IGUA V2	698	-58	171	162	59	-58
	121	121	60	57	64	-60
	211	209	157	77	203	-37

## 7.2 Erläuterung der beim Vergleich der Kanalnetzrechnungsergebnisse verwendeten Vertrauensbereiche

Für die Bewertung der synthetischen Niederschlagsdaten erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse von Kanalnetzrechnungen unter Ansatz a) der synthetischen Daten und b) der örtlich gemessenen Niederschlagsdaten als Referenz. Bezüglich des Überstaugeschehens werden die aus der Berechnung resultierenden Überstauwiederkehrzeiten und Überstauvolumina schachtweise verglichen. Die Darstellung erfolgt als Streudiagramm, wobei die Ergebnisse der synthetischen Daten auf der Ordinate über den Ergebnissen der Referenzdaten auf der Abszisse aufgetragen sind. Bei Übereinstimmung der Ergebnisse eines Schachtes liegt der geplottete Punkt somit auf der Winkelhalbierenden.

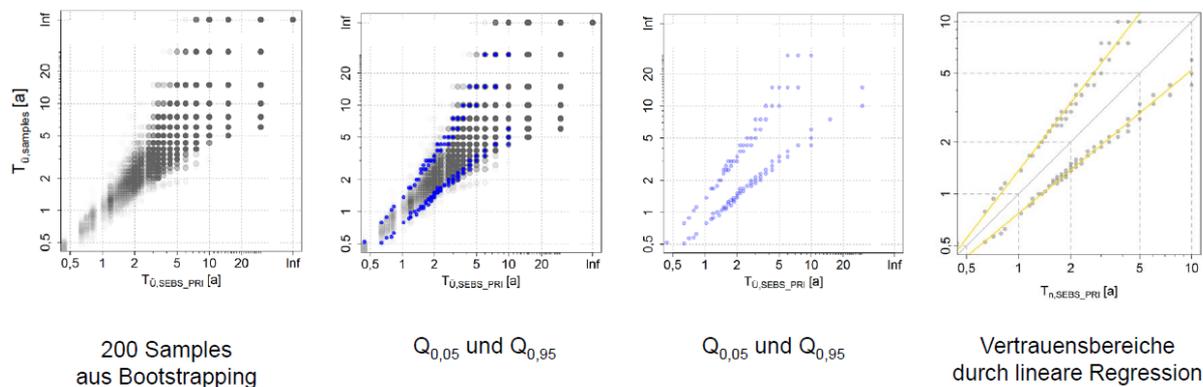
Um die natürliche Variabilität und klimatisch/statistisch mögliche Bandbreite des Niederschlagsgeschehens in den Referenzdaten abzubilden, werden mittels der Methode des Bootstrappings (EFRON & TIBSHIRANI 1993) mehrere Realisationen von Referenzergebnissen erzeugt und in Form eines Vertrauensbereichs den Ergebnissen der synthetischen Daten gegenübergestellt. Das Bilden der Vertrauensbereiche und die Bewertung anhand der Vertrauensbereiche erfolgt für die Hauptbewertungsgrößen Überstau- ( $T_{\bar{u}}$ ) und Entlastungs-Wiederkehrzeit ( $T_e$ ).

Dabei wird wie folgt vorgegangen: Zunächst wird eine einmalige Kanalnetzrechnung unter Ansatz der Referenz-Niederschlagszeitreihe durchgeführt. Das eigentliche Bootstrapping besteht dann in einem 1000-fachen Sampling (Ziehen mit Zurücklegen) der berechneten Jahresscheiben (siehe Abbildung 7.1). Je Sample werden die aus den Berechnungen vorliegenden Überstauereignisse ausgewertet und die resultierende Überstauwiederkehrzeit ermittelt.

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	$\Sigma$
Ref	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
Sample 1	1	1	0	1	2	1	2	1	0	1	10
Sample 2	0	1	1	3	1	0	2	0	1	1	10
...											
Sample i	1	2	1	1	1	1	0	1	0	2	10

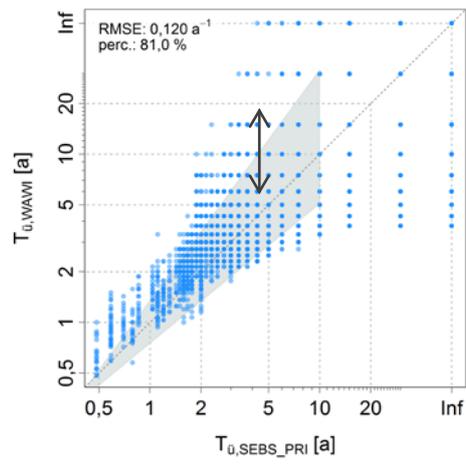
Abbildung 7.1 Beispielhafte Darstellung des jahresbasierten Bootstrappings (hier Sampling einer 10-jährigen Niederschlagsreihe)

Als Ergebnis liegt nun je Schacht eine Bandbreite möglicher Wiederkehrzeiten vor (Abbildung 7.2, links). Um mögliche Ausreißer in den Samples zu eliminieren, werden das 5%-Quantil und das 95%-Quantil der Samples gewählt, die nun die Ränder des Vertrauensbereichs bilden (Abbildung 7.2, 2.- 3. Diagramm). Schließlich erfolgt eine Glättung der Ränder durch lineare Regression (Abbildung 7.2, rechts).



**Abbildung 7.2 Verfahren zur Bildung der Vertrauensbereiche mittels Bootstrapping**

Die so ermittelten Vertrauensbereiche werden den Streudiagrammen zur Bewertung der synthetischen Daten hinterlegt. Dabei wird der Vertrauensbereich vertikal zum Referenzwert aufgetragen (siehe Pfeil in Abbildung 7.3). Mit dieser Darstellung kann überprüft werden, ob die synthetischen Niederschlagsdaten sich im Bereich der Unsicherheiten bewegen, die schon in den Messdaten vorhanden sind oder ob sie im Vergleich zu den Unsicherheiten in den Messdaten systematisch unterschiedliche Unsicherheiten abbilden. Die Bewertung erfolgt durch auszählen der Punkte, die sich innerhalb des Vertrauensbereichs befinden (Kenngröße perc. in %). Berücksichtigt werden nur die Schächte, deren Referenz-Wiederkehrzeit kleiner oder gleich einem Drittel der zugrunde liegenden Referenz-Niederschlagsreihe ist (beispielsweise 10 Jahre bei einer 30-jährigen Niederschlagsreihe in Abbildung 7.3).



**Abbildung 7.3** Verfahren zur Bewertung der synthetischen Daten unter Verwendung des Vertrauensbereichs

## 7.3 Ergänzende Ergebnisse der Validierung der synthetischen Zeitreihen

### 7.3.1 Ergebnisse aus dem Modellgebiet Hamburg-Harburg

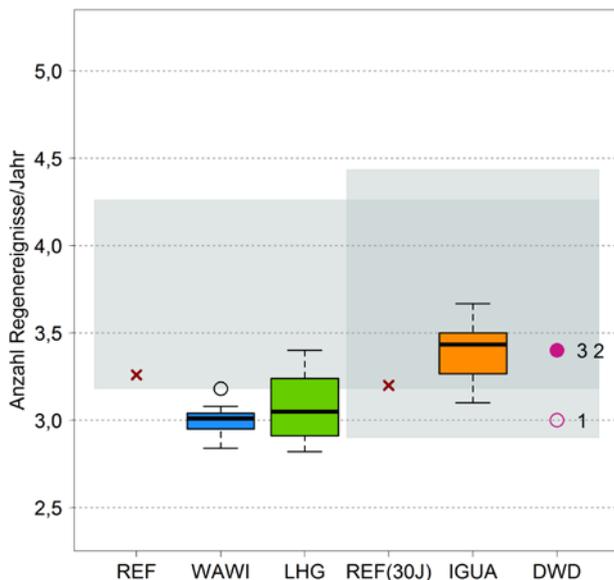


Abbildung 7.4 Relevante, mittlere Ereignisanzahl mit Überstau pro Jahr im Untersuchungsgebiet Hamburg-Harburg

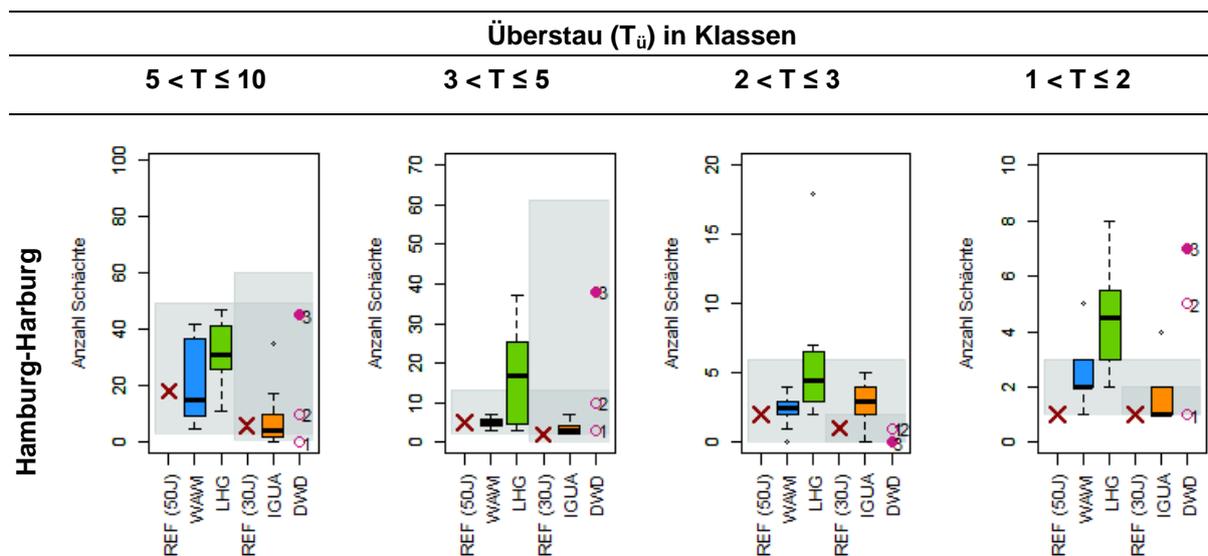


Abbildung 7.5 Anzahl von Schächten nach Überstauhäufigkeiten gem. DWA-A 118 für das Untersuchungsgebiet Hamburg-Harburg

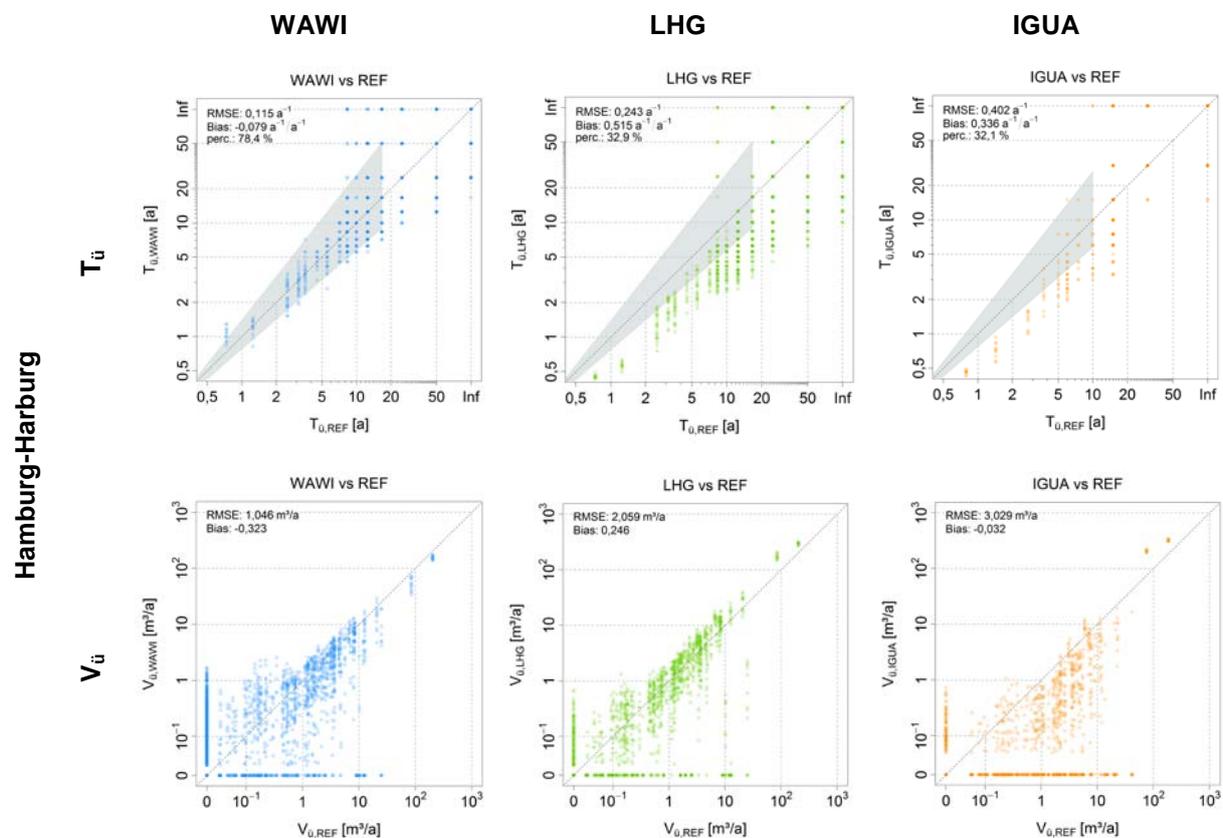
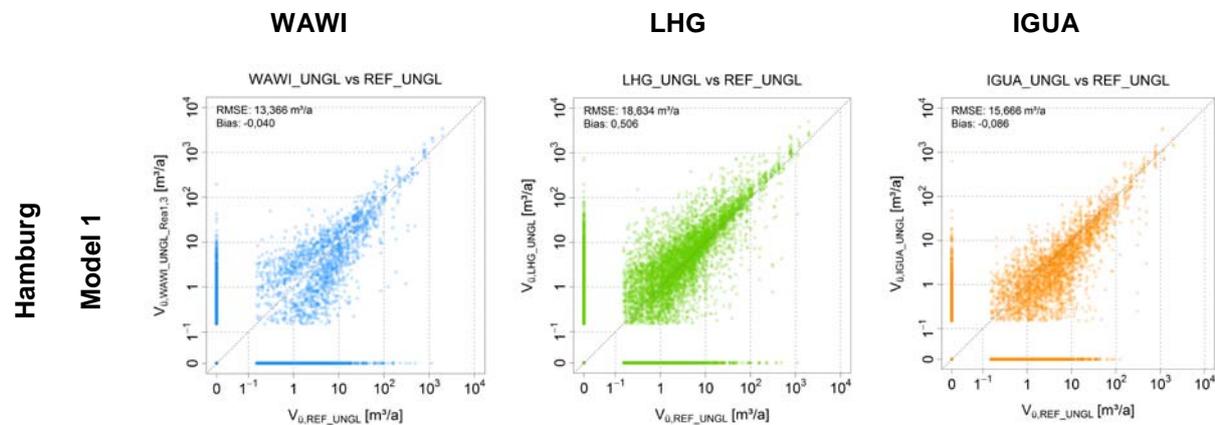
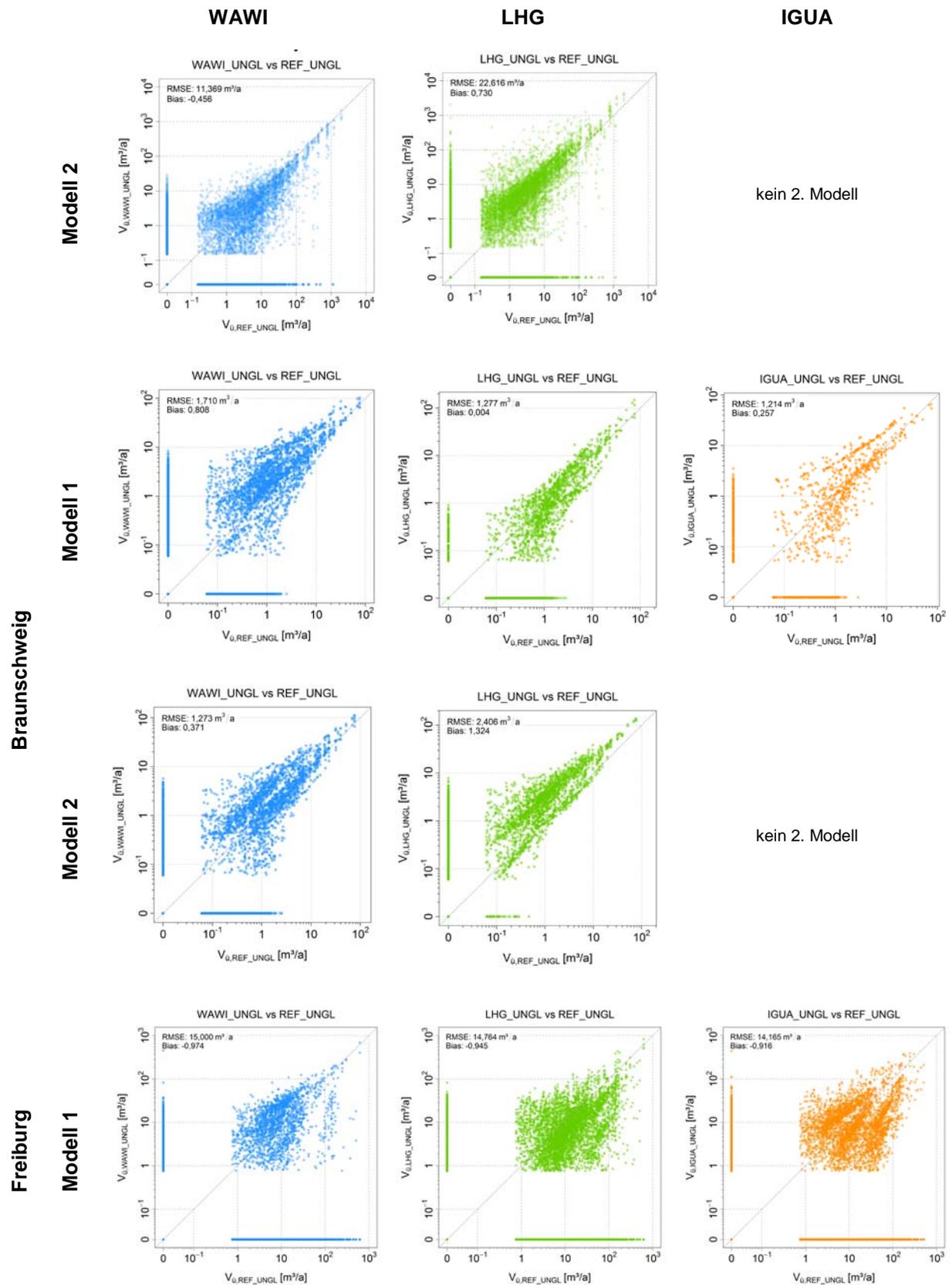


Abbildung 7.6 Ergebnisse der Zielgröße  $T_{\ddot{u}}$  und  $V_{\ddot{u}}$  aus dem Untersuchungsgebiet Hamburg-Harburg – Vergleich „synthetisch“ mit Referenz

### 7.3.2 Ergebnisse der ungleichmäßigen Überregnung





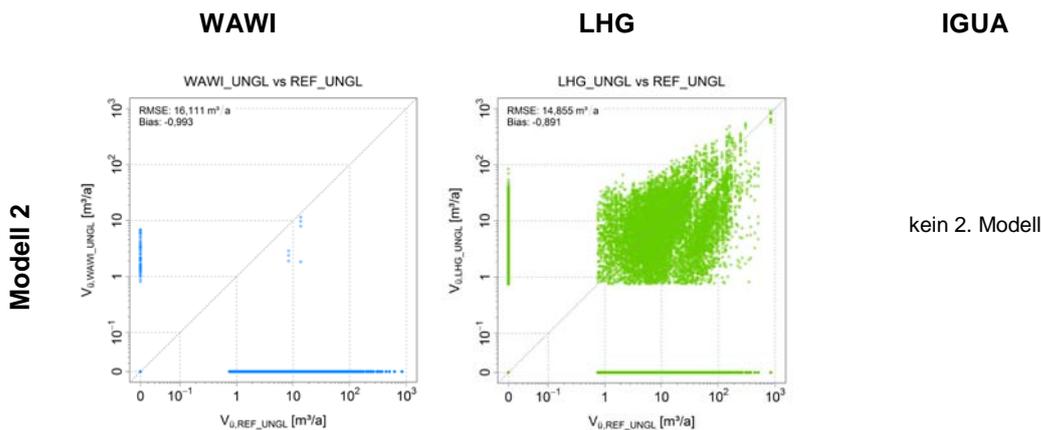
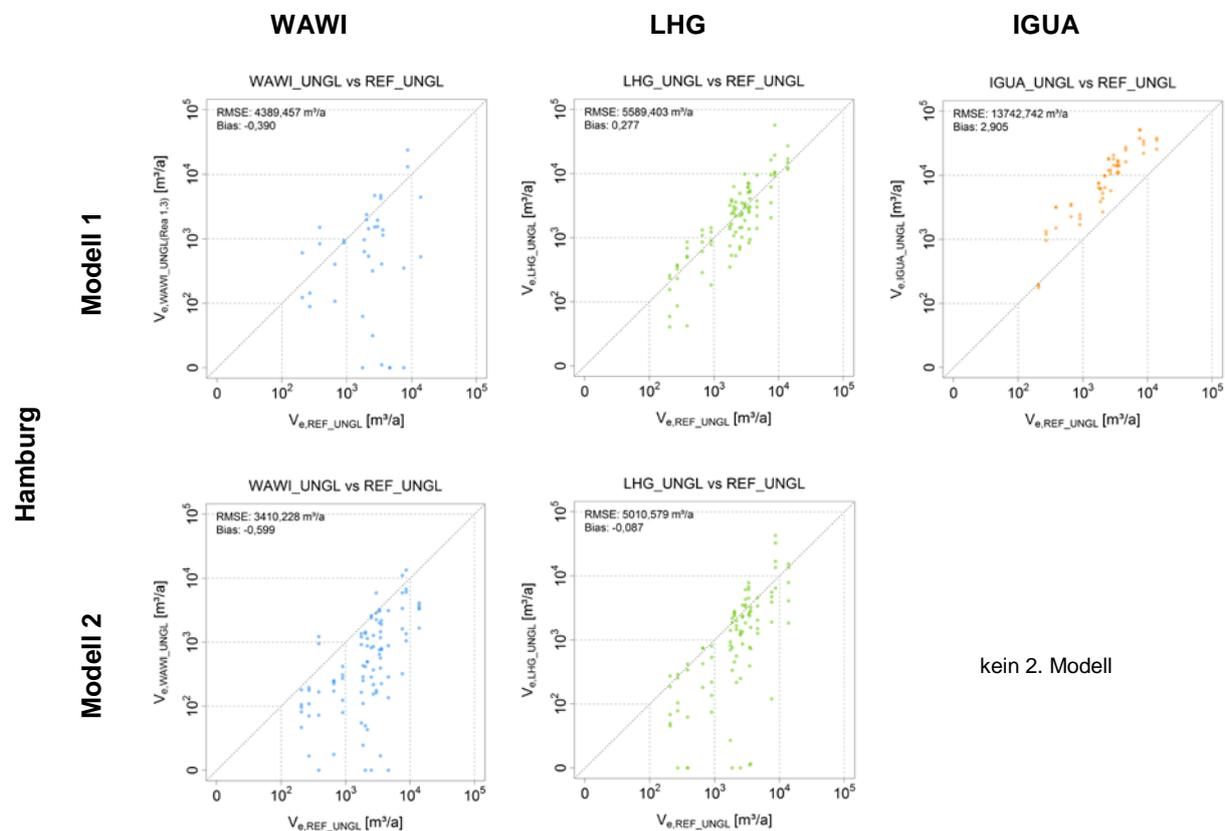


Abbildung 7.7 Ergebnisse der Zielgrößen Überstau-Volumen ( $V_{ii}$ ) bei ungleichmäßiger Überregnung – Vergleich „synthetisch“ mit Referenz



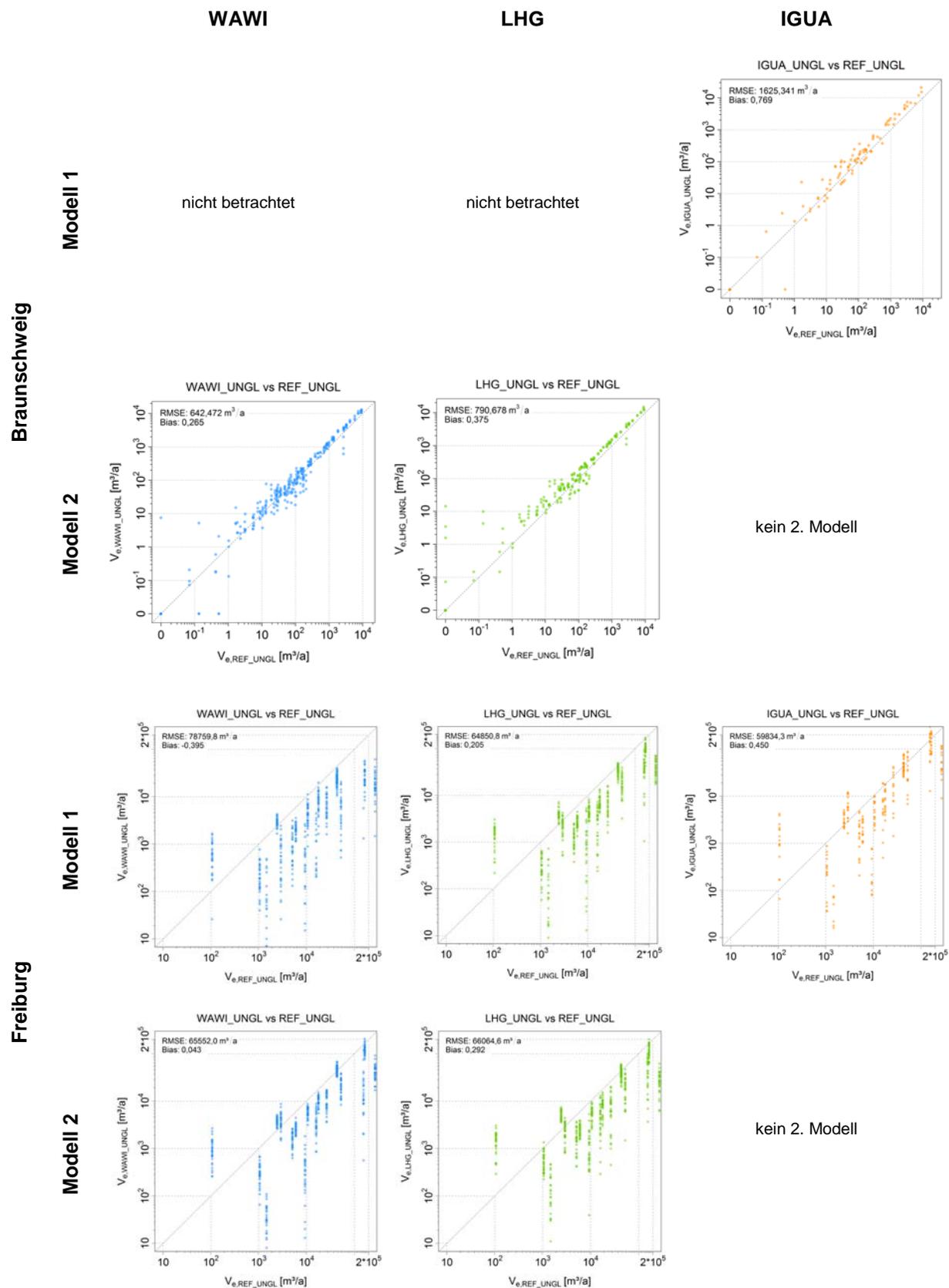


Abbildung 7.8 Ergebnisse der Zielgrößen Entlastungsvolumen ( $V_e$ ) bei ungleichmäßiger Überregnung – Vergleich „synthetisch“ mit Referenz

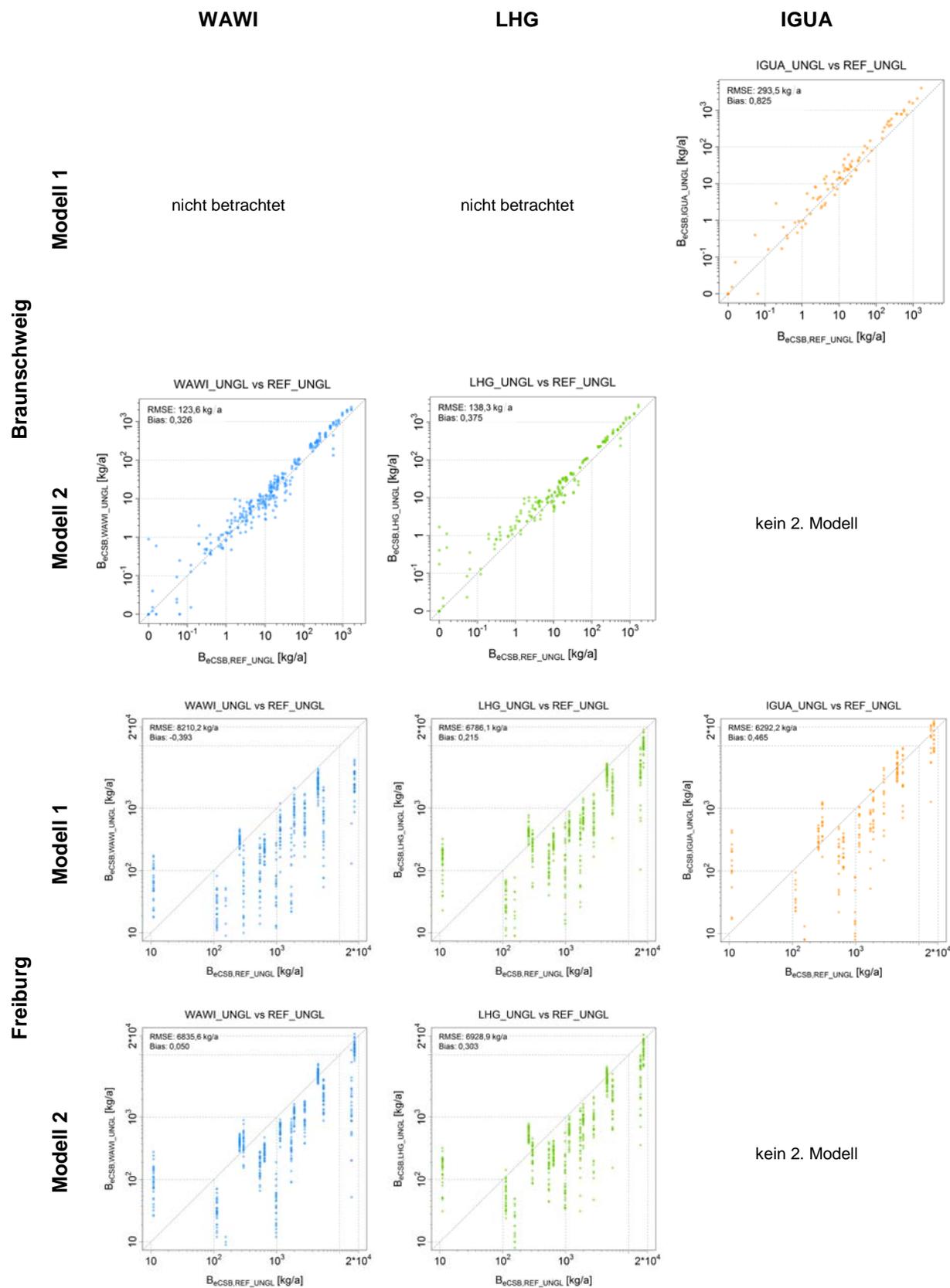


Abbildung 7.9 Ergebnisse der Zielgrößen Entlastungsvolumen ( $B_{e,CSB}$ ) bei ungleichmäßiger Überregnung – Vergleich „synthetisch“ mit Referenz

## 7.4 Kontinuierliche Schmutzfrachtberechnungen

Die kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung erfolgt mit dem hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modell KOSIM (Version 7.4). Innerhalb der Langzeitsimulation mit KOSIM werden alle „trocken“- und „nass“-Zeiträume einer Beobachtungszeitreihe als Kontinuum berücksichtigt. In Bezug auf die Entlastungstätigkeit von Regenüberläufen oder Regenüberlaufbecken ist die kontinuierliche Simulation aus zwei Aspekten von Bedeutung:

- Zum einen erfolgt eine detaillierte Berücksichtigung der Regeneration der Abflussbildungsparameter, insbesondere der Benetzungs- und Muldenverluste durch eine zeitabhängige Verdunstung während der Trockenphasen zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen.
- Zum anderen werden alle Ereignisse des Kontinuums berücksichtigt, d. h. es werden auch solche Ereignisse simuliert, die nicht zu einer Entlastung sondern lediglich zu einer Teilfüllung führen.

Durch die Berücksichtigung der natürlichen Abfolge aller Trockenphasen und Regenereignisse innerhalb der Kontinuumssimulation wird gewährleistet, dass auch die kleinen, häufigen Ereignisse in der Simulation des Entlastungsverhaltens vollständig abgebildet werden, die im Rahmen einer erforderlichen Ereignisvorauswahl für die Schmutzfrachtseriensimulation mit hydrologisch-hydrodynamischen Modellen nicht berücksichtigt werden und im Rahmen der extremwertstatistischen Analysen und des Überstauverhaltens nicht untersucht worden sind.

Für die kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung mit KOSIM wird ein vereinfachtes Modell für das Mischsystem der Stadt Freiburg verwendet. Die Systemtopologie und die Flächen wurden aus dem detaillierten hydrodynamischen N-A Modell übernommen. Es enthält 18 Entlastungsbauwerke, davon sieben Regenüberläufe und 11 Regenüberlaufbecken und umfasst eine angeschlossene befestigte Fläche von 775 ha.

Für die Auswertung werden folgende Zielgrößen verwendet:

- Mischwasserzufluss ( $\text{m}^3/\text{a}$ ),
- Anzahl der Einstauereignisse ( $1/\text{a}$ ),
- Einstaudauer ( $\text{h}/\text{a}$ ),
- Anzahl der Überlaufereignisse ( $1/\text{a}$ ),

- Überlaufdauer (h/a),
- Überlaufmenge (m<sup>3</sup>/a).

Für die Bewertung der synthetischen Zeitreihen werden die Zielgrößen für verschiedene Regenbelastungsszenarien berechnet und gegenübergestellt:

- Gleichmäßige Überregnung
  - Referenzzeitreihe Freiburg (20 Jahre)
  - WAWI (30 Realisationen je 20 Jahre)
  - LHG (30 Realisationen je 20 Jahre)
  - IGUA (10 Realisationen je 30 Jahre)
  - DWD Station (mittlere Entfernung, Elzach)
  - DWD Stationen, benachbart (Emmendingen, Ihringen, Buchenbach; < 14 km)
- Ungleichmäßige Überregnung
  - Referenz: Zeitreihe Freiburg und acht Stationen der BADENOVA / bnNETZE GmbH für 2013 und 2014
  - WAWI (30 Realisationen je 2 Jahre)
  - LHG (30 Realisationen je 2 Jahre)
  - IGUA (15 Realisationen je 2 Jahre)

Zur Einordnung der Ergebnisse der synthetischen Daten (Abbildung 7.11) ist die jährliche Variabilität der Referenz durch die Bandbreite der einzelnen Jahresmittelwerte (grauer Bereich, resultierend aus Maximum und Minimum) ergänzend zu den Mittelweltergebnissen des vollständigen Kontinuums der Referenzzeitreihe dargestellt. Die farblich markierten Bereiche (blau: WAWI, grün LHG, gelb IGUA) beschreiben die Bandbreite der Ergebnisse der zugehörigen Realisationen. Die entsprechende farbliche Linie markiert den Median, für den 50 % der Ergebnisse der Realisationen oberhalb und 50 % unterhalb liegen. Die Ergebnisse für die untersuchten Zielgrößen sind bauwerksbezogen angegeben. Eine Systemskizze mit der Topologie der Bauwerke und spezifischen Kenngrößen ist in Abbildung 7.10 dargestellt.

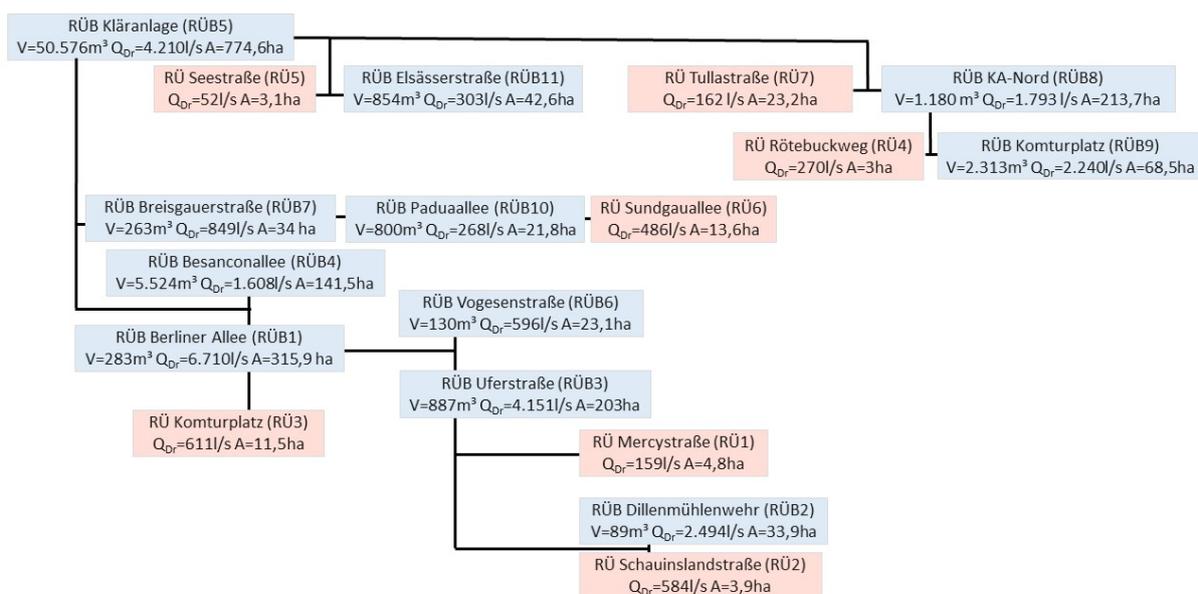


Abbildung 7.10 Topologie der Entlastungsbauwerke im Freiburger Untersuchungsgebiet

#### 7.4.1 Gleichmäßige Überregnung

Für die gleichmäßige Überregnung werden die Ergebnisse der 20-jährigen Referenzzeitreihe der Stadt Freiburg mit den Ergebnissen der Realisationen der synthetischen Zeitreihen (WAWI, LHG und IGUA) sowie des Praxisszenarios (DWD-Station in mittlerer Entfernung) und den benachbarten DWD-Stationen verglichen. Abbildung 7.11 zeigt die Ergebnisse als absolute (links) und relative Abweichungen bzw. Differenzen von der Referenzzeitreihe für die untersuchten Zielgrößen. Die Referenzergebnisse sind durch die „Null-Linie“ gekennzeichnet.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zuflussvolumen:** Aufgrund der bilanzierenden Funktion über alle Ereignisse ist die Zielgröße Mischwasserzufluss eine robuste Größe, die im Wesentlichen von der Niederschlagshöhe über den betrachteten Zeitraum abhängig ist. Die Abweichungen der synthetischen Zeitreihen für die einzelnen Bauwerke sind gering und betragen maximal 6 % vom Mittelwert des Kontinuums der Referenzzeitreihe. Die Variabilität der Zuflussergebnisse der synthetischen Zeitreihen liegt deutlich innerhalb der Bandbreite der jährlichen Ergebnisse der Referenzzeitreihe sowie der benachbarten DWD Stationen und des Praxisszenarios. Allerdings zeigen die Zeitreihen geringfügige systematische

Fehler durchgängig über die Bauwerke: z. B: Unterschätzung für WAWI, Überschätzung für LHG in einer Größenordnung von 2-3 %.

- **Anzahl Einstauereignisse:** Die Zielgröße ist ein Indikator für kleine Ereignisse von kurzer Dauer oder geringer Intensität. Die Ergebnisse liegen innerhalb der Bandbreite der jährlichen Ergebnisse der Referenz und befinden sich mit Ausnahme der Bauwerke zwei und sieben innerhalb der Bandbreite der Nachbarstationen sowie des Praxisszenarios. Die Ergebnisse für WAWI und LHG lassen keinen systematischen Fehler erkennen und variieren im Wesentlichen zwischen  $\pm 25$  % der Referenzanzahl der Einstauereignisse. Für IGUA sind eine größere Variabilität und eine geringfügige, systematische Überschätzung erkennbar.
- **Einstaudauer:** Sie beschreibt die Dauer der kleinen häufigen Ereignisse. Die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen zeigen ein ähnliches Verhalten wie die der Zielgröße Einstauereignisse. Sie liegen innerhalb der Bandbreite der Jahresergebnisse der Referenz sowie der benachbarten DWD-Stationen und des Praxisszenarios. Die Bandbreite der Realisationen ist für WAWI geringfügig größer als im Vergleich zur Zahl der Einstauereignisse; die systematische Überschätzung für IGUA ist hingegen geringer.
- **Anzahl Überlaufereignisse:** Sie beschreibt häufige Ereignisse des Regengeschehens, die mehrere Millimeter Niederschlagshöhe beinhalten ( $> 4$  mm) und ist für die Akzeptanz der synthetischen Zeitreihen von großer Bedeutung.

Die Variabilität der Jahresergebnisse der Referenz (grauer Bereich) ist im Gegensatz zu den zuvor erläuterten Zielgrößen größer als die der Nachbarstationen sowie des Praxisszenarios. Ausgehend von einer geringen Entlastungshäufigkeit der Referenz, die zwischen den Bauwerken zwischen  $1/a$  und  $10/a$  (Ausnahme RÜB Elsässerstraße:  $24/a$ ) variiert, bewegen sich die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen innerhalb der Bandbreite der benachbarten DWD Stationen sowie des Praxisszenarios. Die Bandbreite der Abweichungen der Entlastungshäufigkeit von der Referenz für die Realisationen eines Niederschlagsmodells sind im Wesentlichen geringer als  $\pm 25$  % und zeigen eine hohe Konzentration (Median) zu den Referenzergebnissen. Die Entlastungsergebnisse der drei synthetischen

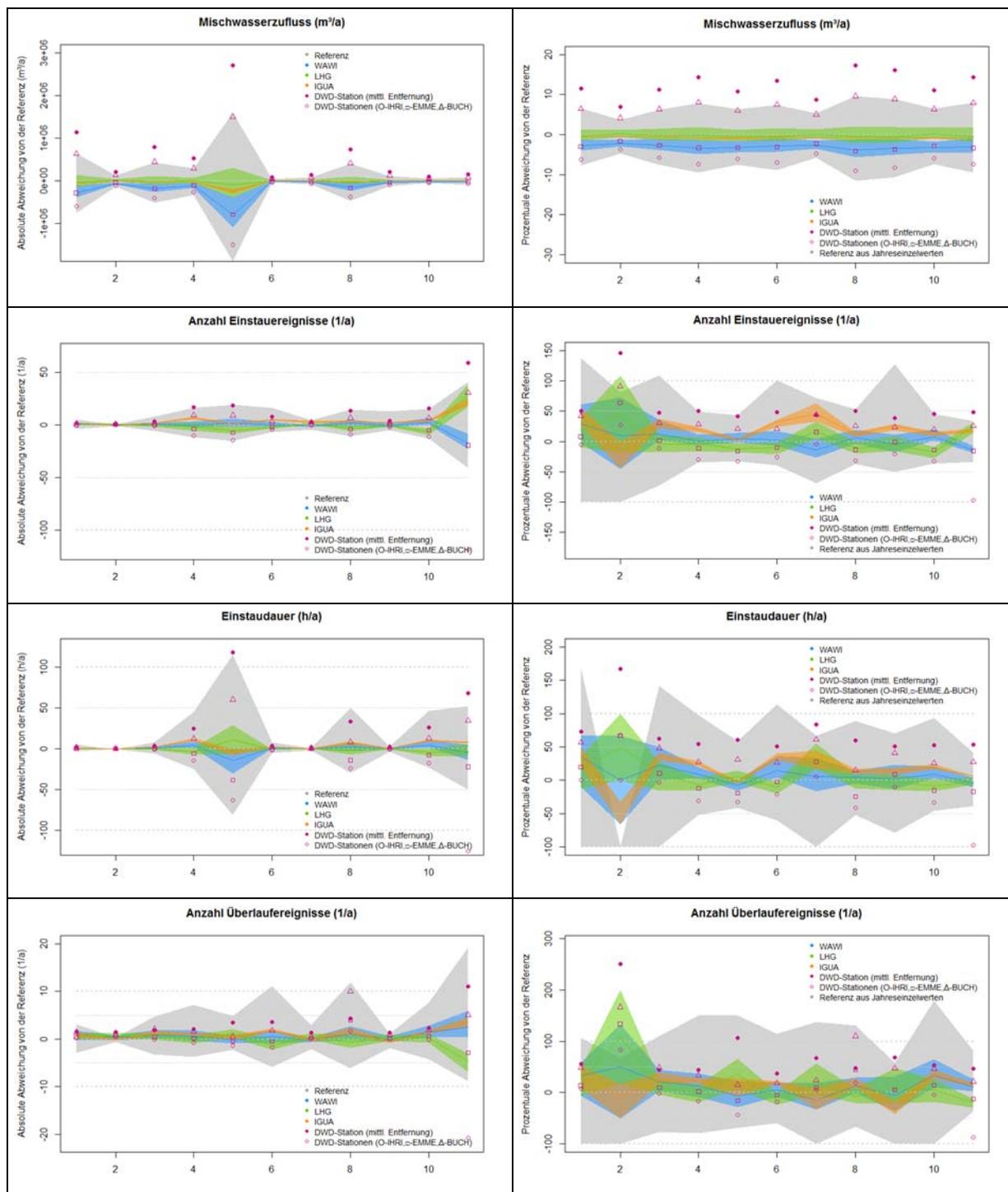
Zeitreihen bzw. Realisationen zeigen untereinander eine Variabilität in gleicher Größenordnung; signifikante, systematische Über- oder Unterschätzungen im Entlastungsverhalten lassen sich nicht erkennen.

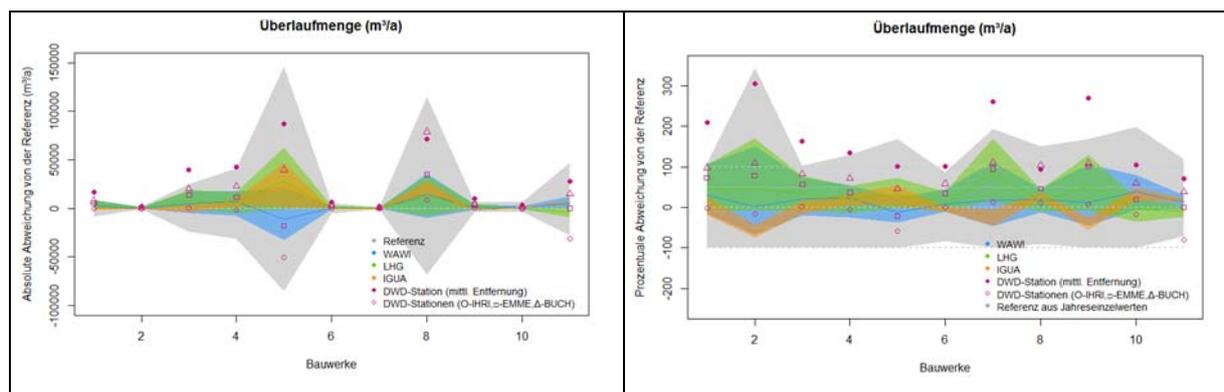
- **Überlaufvolumen:** Wie zuvor liegen die Ergebnisse innerhalb der Jahresergebnisse der Referenz sowie der benachbarten DWD-Stationen bzw. des Praxisszenarios. Die relativen Abweichungen sind jedoch größer und betragen bis zu 100 % der Referenzergebnisse. Auffällig ist eine Tendenz zur Überschätzung für die synthetischen Zeitreihen von LHG. Allerdings ist eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der benachbarten DWD-Stationen festzustellen.

Übergeordnet sind folgende Sachverhalte festzustellen:

- Die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen von IGUA zeigen im Vergleich zu den anderen Ergebnissen der synthetischen Zeitreihen geringere Schwankungsbreiten der Realisationen.
- Sowohl innerhalb der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen und deren Realisationen als auch zwischen den drei synthetischen Zeitreihen sind bauwerkspezifische Unterschiede im Entlastungsverhalten festzustellen, die nicht systematisch sind. Dieser Sachverhalt ist sowohl als Indiz für die Niederschlagsvariabilität der Zeitreihen als auch als Abhängigkeit von systemspezifischen Kenngrößen (angeschlossene Fläche, Speichervolumen) zu werten.
- Die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen zeigen zielgrößen- und bauwerksübergreifend eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Referenzzeitreihe.
  - Die Mediane der Realisationen zeigen eine hohe Konzentration zu den Referenzergebnissen. Die Bandbreiten für die Realisationen der maßgebenden Zielgrößen Anzahl Einstau- und Übertauereignisse bewegen sich im Wesentlichen innerhalb eines Bereiches von  $\pm 25\%$  der Referenzergebnisse.
  - Die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen für alle Realisationen liegen nahezu ausnahmslos innerhalb der Bandbreite der Jahresergebnisse der Referenz.

- Die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen liegen überwiegend innerhalb der Bandbreite der benachbarten DWD-Stationen, die Abweichungen sind geringer als die Ergebnisse für das Praxisszenario.





**Abbildung 7.11** Kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung, Ergebnisse gleichmäßige Überregnung

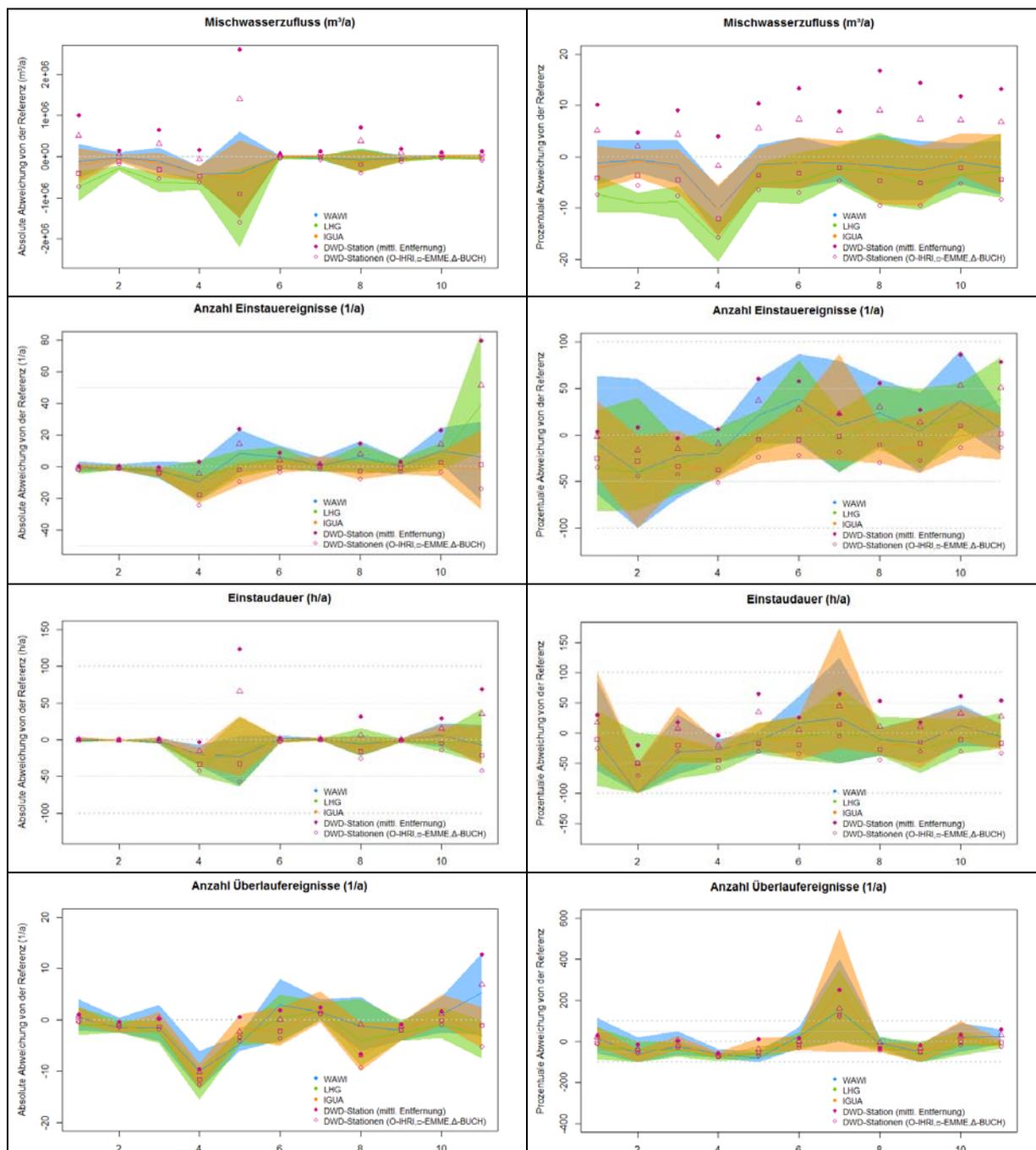
## 7.4.2 Ungleichmäßige Überregnung

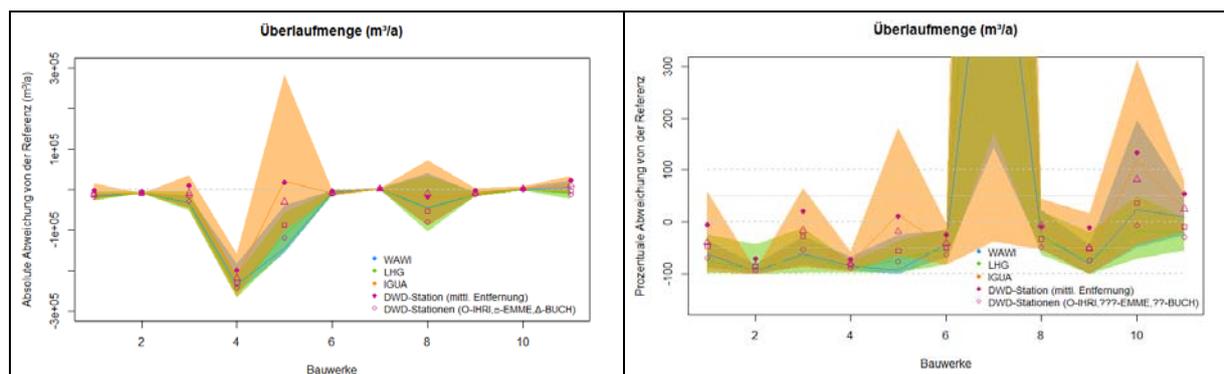
Zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Überregnung werden die neun Regenschreiber im Stadtgebiet Freiburgs mit Hilfe der Thiessen-Polygon-Methode (nächster Nachbar) den Einzugsgebietsflächen in dem Modell KOSIM zugeordnet. Für die neun Regenschreiber liegen zeitlich parallele Messungen über einen Zeitraum von zwei Jahren vor. Da für die ungleichmäßige Referenzmessung nur zwei Jahre zur Verfügung stehen, wird in den Auswertungen auf eine Darstellung der Bandbreite der Jahreswerte verzichtet (vgl. Abbildung 7.12).

- **Zuflussvolumen:** Die Realisationen der synthetischen Zeitreihen zeigen im Vergleich zu gleichmäßigen Regenbelastungen (vgl. Abbildung 7.11) eine geringfügig größere Variabilität und Bandbreite der Realisationen. Für LHG ist eine Tendenz zur Unterschätzung gegenüber der Referenz zu beobachten.
- **Einstauereignisse:** Analog zur Zielgröße Mischwasserzufluss ist eine größere Variabilität und Bandbreite der Ergebnisse festzustellen. Die Mediane der Realisationen der synthetischen Zeitreihen bewegen sich in Bereichen bis  $\pm 40\%$  zur Über- und Unterschätzung der Referenz (gleichmäßige Überregnung: ca.  $\pm 25\%$ ).
- **Einstaudauer:** Wie zuvor zeigen die synthetischen Zeitreihen eine größere Bandbreite der Einstaudauern.
- **Überlaufereignisse:** In den Ergebnissen der synthetischen Zeitreihen ist eine deutliche Erhöhung der Variabilität festzustellen. Die Bandbreite der Realisationen bewegt sich in Bereichen bis  $+50\%$  bzw.  $-100\%$  Über- und

Unterschätzung (gleichmäßige Überregnung  $\pm 25\%$ ). Auffällig ist dabei, dass die Mediane der Realisationen der synthetischen Zeitreihen systematisch unterhalb der Referenz liegen und somit eine Tendenz zur Unterschätzung im Vergleich zur ungleichmäßigen Referenzbelastung zeigen.

- Überstauvolumen:** Die Überlaufvolumen der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen für alle drei Niederschlagsgeneratoren unterschätzen die Referenzergebnisse systematisch in einer Größenordnung von mehr als 50 %.





**Abbildung 7.12 Kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung, Ergebnisse ungleichmäßige Überregnung**

Für den Lastfall ungleichmäßige Überregnung zeigen die Ergebnisse für alle drei synthetischen Zeitreihen zielgrößen- und bauwerksübergreifend eine systematische Unterschätzung des Einstau- und Entlastungsverhaltens. Die Unterschätzung ist für das Entlastungsverhalten (maßgebende Ereignisse) deutlich ausgeprägter als für das Einstauverhalten (kleine, häufige Ereignisse).

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen eine größere Bandbreite der Realisationen im Vergleich zum Lastfall gleichmäßige Überregnung. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die erzielten Ergebnisse für den Lastfall ungleichmäßige Überregnung eine geringe Aussagekraft haben, da die Referenzzeitreihen für die Validierung lediglich zwei Jahre umfassen.

### 7.4.3 Klima

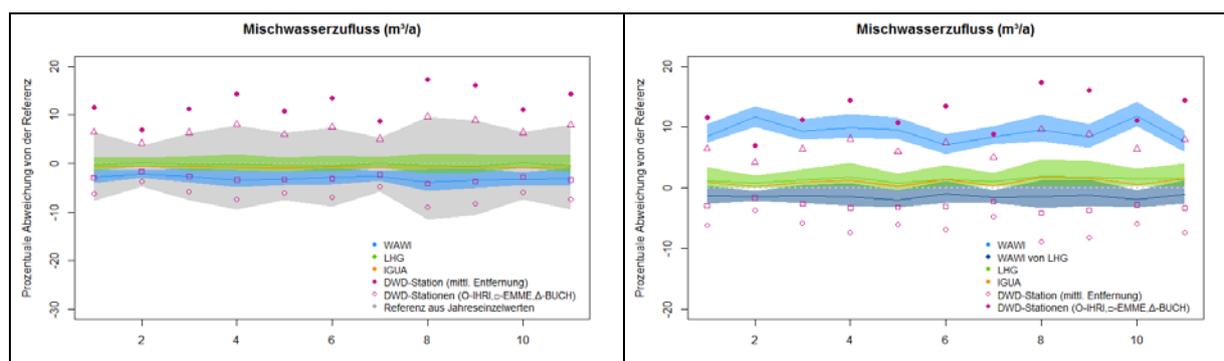
Die Bewertung der synthetischen KLIMA-Regenreihen für den Lastfall gleichmäßige Überregnung erfolgt durch den Vergleich mit der Referenzzeitreihe Freiburg und den synthetischen Daten für das aktuelle Klima (vgl. Kapitel 4.3.4). Für die eingeführten Zielgrößen sind die Ergebnisse als relative Abweichungen von der Referenz in Abbildung 7.13 dargestellt; die linke Spalte enthält die Ergebnisse aus Abbildung 7.11 für den Lastfall gleichmäßige Überregnung, rechts sind die Ergebnisse für die Klimaveränderung abgebildet.

Die KLIMA-Regenreihen wurden von der Universität Stuttgart basierend auf den synthetischen Regenreihen der gleichmäßigen Überregnung generiert. Auf die Zeitreihen von LHG, IGUA und WAWI wurde ein einheitliches Klimaänderungsmuster aufgeprägt (vgl. 4.3.4). Folgende Veränderungen gegenüber den

Referenzergebnissen und der synthetischen Zeitreihen für das KLIMA IST sind festzustellen, die gleichermaßen bzw. konsistent für alle drei synthetischen Zeitreihen gelten:

- **Zuflussvolumen:** Es ist für alle drei synthetischen Zeitreihen eine geringe Zunahme des Mischwasserzuflusses von 1,5 – 2,0 % zu beobachten.
- **Einstauereignisse:** Die Anzahl der Einstauereignisse nimmt um ca. 15 % zu. Die Mediane der Realisationen der drei Zeitreihen liegen oberhalb der Referenz.
- **Einstaudauer:** Die Einstaudauern zeigen analog eine durchschnittliche Erhöhung um 16 %.
- **Überlaufereignisse:** Im Vergleich zu den Einstaudauern ist eine deutlich stärkere Zunahme der Überlaufereignisse in einer Größenordnung von 26 % zu erkennen.
- **Überstauvolumen:** Die Zunahme der Überlaufvolumina ist überproportional und beträgt durchschnittlich zwischen 30 % – 40 % (WAWI / LHG).

Übergreifend ist für alle Zielgrößen eine Zunahme der Bandbreite der Ergebnisse für die drei synthetischen Zeitreihen festzustellen: durchschnittlich 31 % bei WAWI, 41 % bei LHG und 35 % bei IGUA. Wie auch schon bei der vorherigen Abbildung, bilden die Maximalwerte von LHG annähernd die DWD-Station mit mittlerer Entfernung ab.



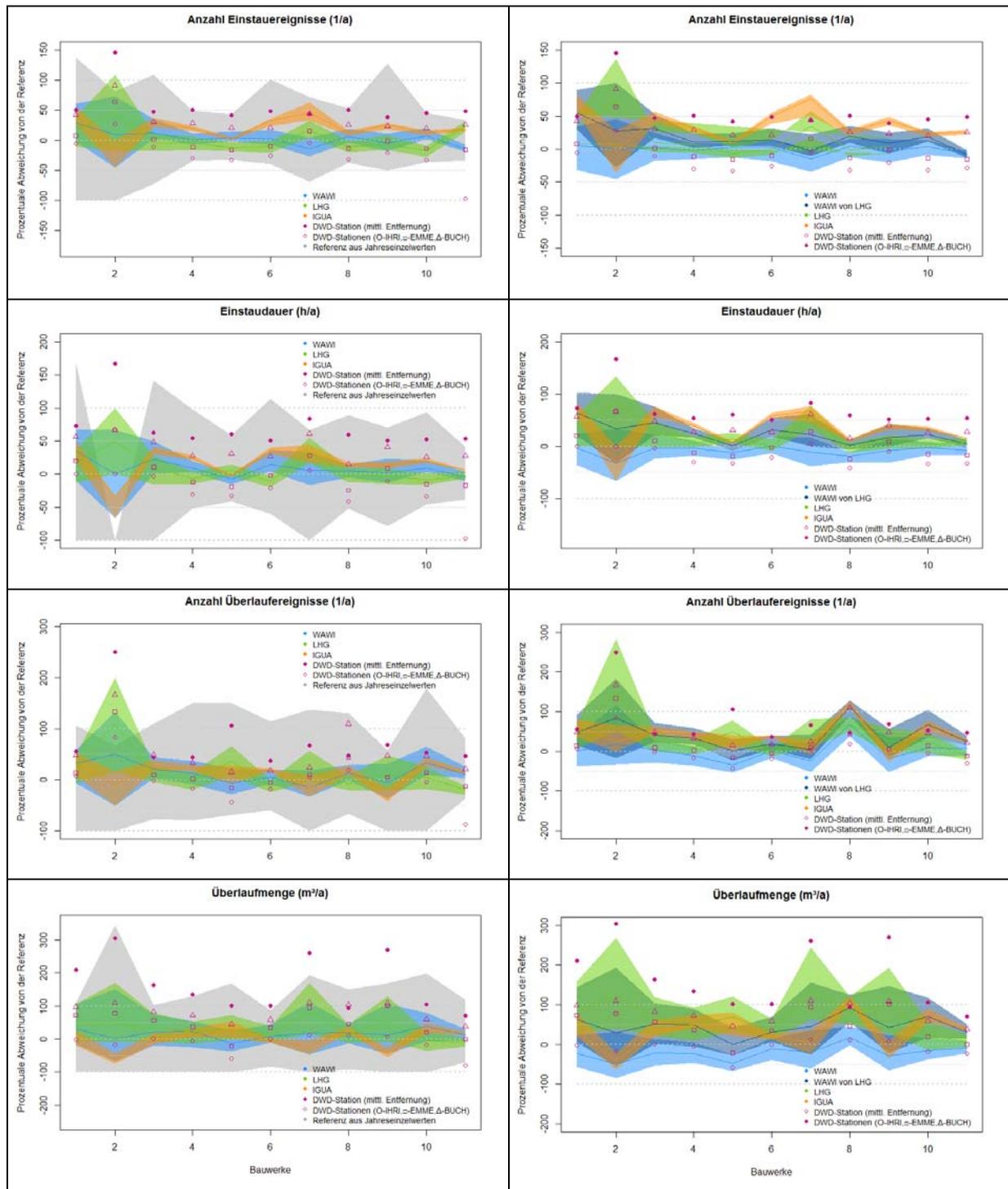


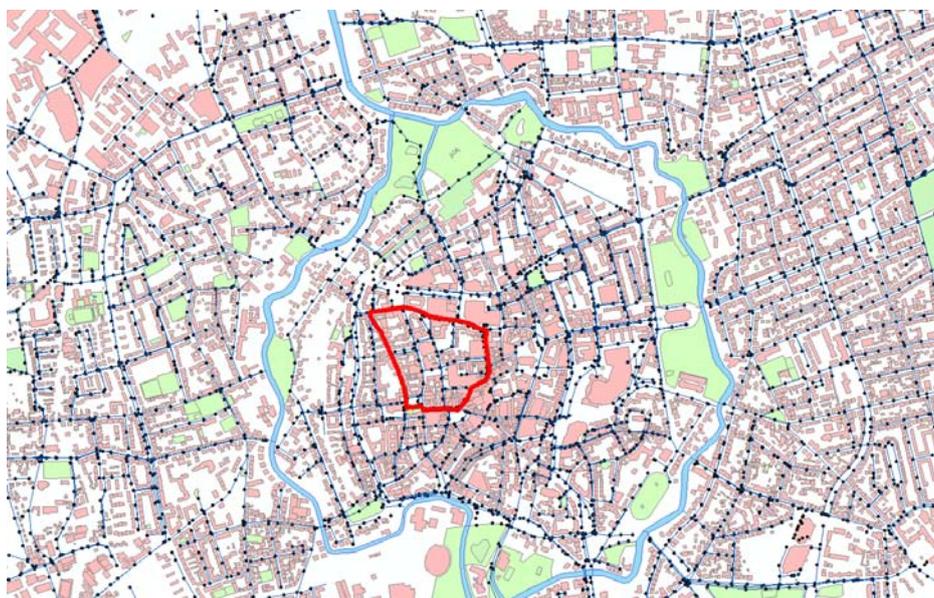
Abbildung 7.13 Kontinuierliche Schmutzfrachtberechnung, Ergebnisse Klimaänderung

## 7.5 Anwendungsbeispiele und Systemoptimierung

Im Hauptteil des Berichtes werden die Ergebnisse der systematischen Validierung der synthetischen Zeitreihen vorgestellt. Zusätzlich zu dieser umfassenden, statistischen Analyse werden die Zeitreihen außerdem für jedes Untersuchungsgebiet in einem praxisnahen Anwendungsbeispiel getestet. Die Untersuchungen sollen einen Einblick geben, ob und wie stark sich die festgestellten, statistischen Abweichungen in konkreten Fragestellungen der Stadtentwässerung tatsächlich auswirken. Es handelt sich um einzelne Beispiele, deren Ergebnisse stark von den individuellen Randbedingungen abhängig sind. Die Ergebnisse können folglich nicht verallgemeinert werden.

### 7.5.1 Anwendungsbeispiel Braunschweig

Betrachtet wird ein Teilbereich der Braunschweiger Innenstadt, in dem die Berechnung unter Ansatz der örtlich gemessenen Referenzregenreihe mehrere Schächte aufzeigt, die die nach Arbeitsblatt DWA-A 118 (DWA 2006) geforderten Überstauhäufigkeiten von seltener als einmal in 5 Jahren nicht einhalten. Das Gebiet ist begrenzt durch die Straßen *Hintern Brüdern* und *Schild* im Norden, *Schuhstraße* im Osten, *Poststraße* im Süden und *Breite Straße* im Westen (siehe Abbildung 7.14).

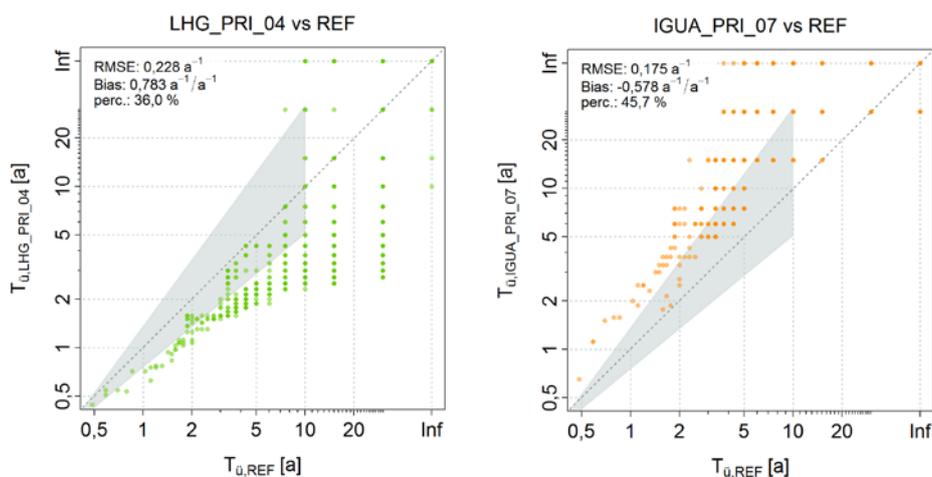


**Abbildung 7.14** Im Praxisbeispiel betrachtetes Teilgebiet der Innenstadt Braunschweig

Für die gegebene Situation werden unter Ansatz der örtlich gemessenen Referenzregenreihe (Station Prinzenweg, PRI) Sanierungsmaßnahmen

(Kanalerweiterungen) erarbeitet, durch die die o.g. hydraulischen Anforderungen eingehalten werden. Für diese Maßnahmen werden die Kosten ermittelt.

Um mögliche Auswirkungen des Ansatzes synthetischer Niederschlagsdaten auf die Auslegung der Kanalisation und die einhergehenden Kosten zu bewerten, werden in einem zweiten Schritt die unter Ansatz der niederschlagsstärksten und der niederschlagsschwächsten Realisation erforderlichen Sanierungsmaßnahmen erarbeitet (max. Realisation: LHG\_PRI\_04, min. Realisation: IGUA\_PRI\_07). Auch hierfür werden die Kosten ermittelt.



**Abbildung 7.15** Verwendete Realisationen der synthetischen Niederschlagsdaten (max.: LHG\_PRI\_04, min.: IGUA\_PRI\_07)



**Abbildung 7.16** Überstaukarte Anwendungsbeispiel Braunschweig, Schächte mit rechnerischer Überstauhäufigkeit von mehr als einmal in 5 Jahren sind gekennzeichnet. Links Referenzregenreihe, Mitte synthetische Regenreihe LHG\_PRI\_04 (max.), rechts synthetische Regenreihe IGUA\_PRI\_07 (min.)

Die hydraulischen Berechnungen unter Ansatz der örtlichen Referenzregenreihe zeigen fünf Schächte, für die die Anforderungen nicht eingehalten werden (siehe Abbildung 7.16 links). Die Überstau-Wiederkehrzeiten dieser Schächte liegen zwischen 1,9 und 4,3 Jahren. Unter Ansatz der niederschlagsstärksten Realisation

der synthetischen Daten halten elf Schächte die Anforderungen nicht ein, die Überstau-Wiederkehrzeiten liegen zwischen 1,6 und 2,3 Jahren. Unter Ansatz der niederschlagsschwächsten Realisation der synthetischen Daten halten alle Schächte die Anforderungen ein, die geringste Überstau-Wiederkehrzeit beträgt 6 Jahre.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden für jeden der drei Belastungsansätze Sanierungsmaßnahmen, d.h. hier Kanalerweiterungen erarbeitet, so dass jeweils die zulässige Überstau-Wiederkehrzeit von seltener als einmal in 5 Jahren eingehalten wird. Dabei wird darauf geachtet, dass es nicht zu einer Verschiebung des hydraulischen Problems in andere Netzabschnitte kommt.

**Tabelle 7.2 Zusammenstellung der Gesamtsanierungslänge und der Gesamtsanierungskosten (netto) unter Ansatz der betrachteten Belastungsansätze Referenzregenreihe, synthetische Regenreihe LHG\_PRI\_04 (max.), synthetische Regenreihe IGUA\_PRI\_07 (min.)**

<b>Belastungsansatz</b>	<b>Referenz Station PRI</b>	<b>Max. Realisation LHG_PRI_04</b>	<b>Min. Realisation IGUA_PRI_07</b>
<b>Anzahl Haltungen</b>	11	26	0
<b>Sanierungslänge</b>	362 m	870 m	0 m
<b>Sanierungskosten</b>	740.000 €	2.110.000 €	0 €

Für die erarbeiteten Sanierungsalternativen werden schließlich die Anzahl der zu sanierenden Haltungen, die Gesamtsanierungslänge (summierte Länge der sanierten Haltungen) und die entsprechenden Gesamtsanierungskosten ermittelt. Ausgewiesen werden die Netto-Baukosten inkl. Baunebenkosten. Die Ergebnisse zeigen für die Betrachtung unter Ansatz der Referenzregenreihe eine Sanierungslänge von 362 m und Gesamtkosten von 740.000 €. Unter Ansatz der niederschlagsstärksten Realisation der synthetischen Daten (LHG\_PRI\_04) ergeben sich eine Sanierungslänge von 870 m und Gesamtkosten in Höhe von 2.110.000 €. Das sind um den Faktor 2,9 höhere Kosten als unter Ansatz der Referenzregenreihe. Unter Ansatz der niederschlagsschwächsten Realisation (IGUA\_PRI\_07) ist eine hydraulische Sanierung des Kanalnetzes nicht erforderlich (siehe Tabelle 7.2).

Das Praxisbeispiel Braunschweig zeigt, dass die Verwendung einzelner, extremer Realisationen der synthetischen Niederschlagsdaten zu deutlichen Fehlentscheidungen bei der Auslegung der Kanalnetze und somit zu

Fehlinvestitionen führen kann. Bei der Auswahl bzw. beim Bereitstellen von Realisationen als Belastungsansatz für die Bemessungs- und Nachweisverfahren muss folglich sichergestellt werden, dass es sich hierbei nicht um einzelne, extreme Realisationen handelt (vgl. Kapitel 5.3).

### 7.5.2 Anwendungsbeispiel Freiburg

In Freiburg besteht ein infolge von Bevölkerungszug anhaltender Bedarf an zusätzlichem Wohnraum. Die Stadt Freiburg plant daher die Entwicklung eines neuen Stadtteils Dietenbach mit 5.500 Wohneinheiten und einer Wohnbaufläche von ca. 54 ha im nordwestlichen Stadtgebiet (vgl. Abbildung 7.17). Zudem soll das ca. 160 ha große Untersuchungsgebiet unter anderem den Bedarf an Gewerbeflächen decken. Der Stadtteil soll ca. vier Kilometer westlich des Stadtzentrums entwickelt werden.

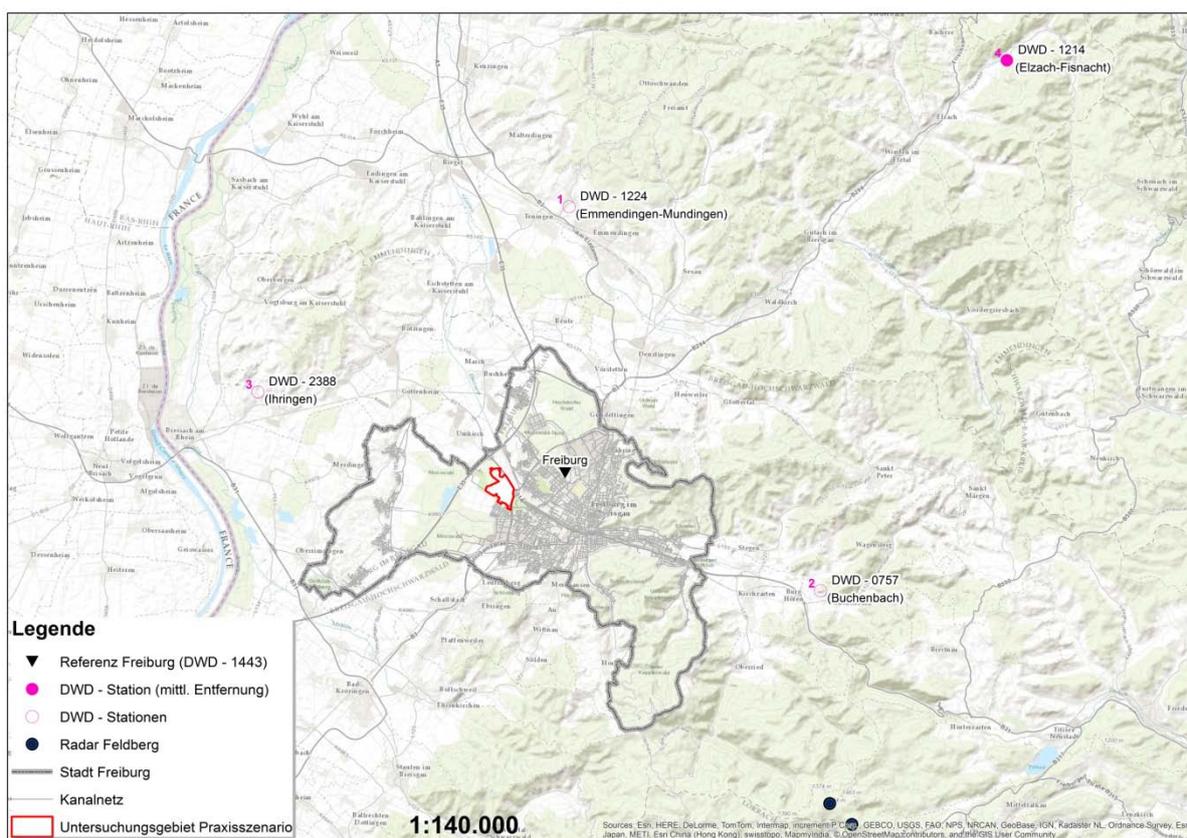


Abbildung 7.17 Lage des Untersuchungsgebietes im Anwendungsbeispiel Freiburg

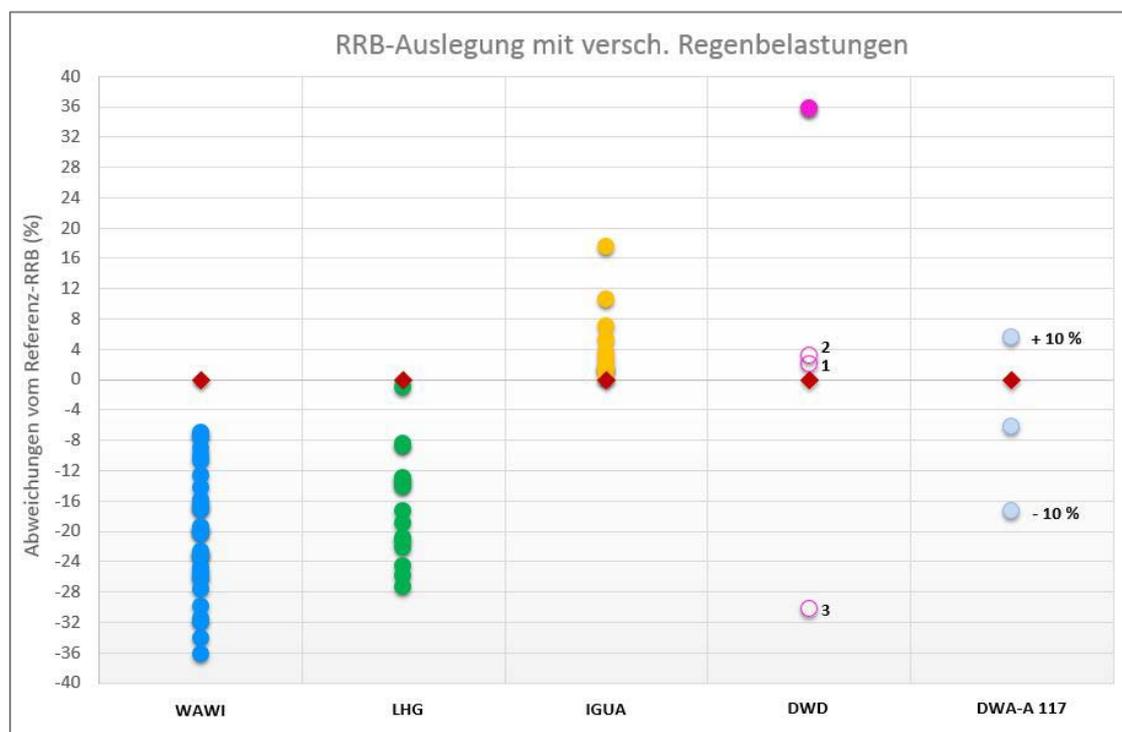
Das zukünftig im geplanten Stadtteil anfallende Regenwasser muss gefasst und dem Stand der Technik entsprechend, sicher behandelt werden. Generell gibt es

verschiedene Möglichkeiten für die Regenwasserbehandlung, wie z.B. dezentrale Versickerung, Speicherung und verzögerte Ableitung durch Stauraumaktivierung und Steuerung oder den Bau eines Regenrückhaltebeckens.

Um die Eignung der synthetischen Daten anhand eines Praxisbeispiels zu prüfen, wird für den geplanten Stadtteil Dietenbach beispielhaft die Behandlung des Regenwassers mit Hilfe eines zentralen Regenrückhaltebeckens und einer verzögerten Ableitung angenommen. Die Dimensionierung des Beckens erfolgt gemäß DWA A-117 nach zwei Ansätzen:

- a) Kontinuumssimulation mit dem hydrologischen Kontinuumssimulationsmodell KOSIM unter Anwendung der Referenzzeitreihe Freiburg, der synthetischen Zeitreihen (WAWI, LHG und IGUA) sowie den benachbarten DWD-Stationen (Elzach (Praxisszenario), Ihringen, Buchenbach Emmendingen)
- b) Vereinfachtes Verfahren nach DWA A-117 unter Anwendung statistischer Regenhöhen nach KOSTRA-DWD

Auf Grundlage der Referenzzeitreihe wird ein erforderliches Beckenvolumen von ca. 16.800 m<sup>3</sup> mit einer Drosselleistung von 100 l/s ermittelt. Die berechneten Beckenvolumina der synthetischen Zeitreihen und Praxisszenarien sind mit der Bemessung des Bauwerks gemäß der Referenzzeitreihen in Abbildung 7.18 in Relation gesetzt. Die Datenpunkte der synthetischen Zeitreihen zeigen die Ergebnisse einzelner Realisationen.



**Abbildung 7.18 Praxisbeispiel Freiburg (DWD-Stationen: 1. Emmendingen-Mundingen 12,9 km, 2. Buchenbach 13,6 km, 3. Ihringen 15,4 km, Elzach 30 km)**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Realisationen der synthetischen Zeitreihen nahezu vollständig innerhalb der Bandbreite der benachbarten DWD-Stationen liegen. Eine Ausnahme bilden drei Realisationen der synthetischen Zeitreihen des WAWI-Modells. Insgesamt ist die Ergebnisbandbreite unter Ansatz der DWD-Daten aufgrund der natürlichen Variabilität des Regengeschehens in der Größenordnung von  $\pm 30\%$  sehr groß, obwohl die Nachbarstationen sehr geringe Entfernungen aufweisen ( $< 14$  km). Die Bemessung gemäß dem Praxisszenario (Station Elzach in 30 km Entfernung) bewirkt eine Vergrößerung des Beckenvolumens von 35 % gegenüber der Referenzberechnung. Die DWD-Station 3 Ihringen liegt nordwestlich von Freiburg, so dass der neu geplante Stadtteil und mithin der Standort des angenommenen Planungsszenarios (Bau eines Regenrückhaltebeckens) räumlich zwischen der Referenzstation Freiburg und der Station Ihringen liegt.

Für die Bemessungsergebnisse mit dem vereinfachten Verfahren nach DWA A-117 wurden zusätzlich Unsicherheitsbandbreiten der Regenhöhen nach KOSTRA-DWD berücksichtigt, die eine Abminderung bzw. Erhöhung der statistischen Regenhöhen von  $\pm 10\%$  beinhalten. Insbesondere die Abminderung von 10 % wirkt sich überproportional auf die Bemessung aus und ist ein Beleg für die hohe Sensitivität der Regenbelastung.

Insgesamt zeigt dieses Beispiel für Freiburg, dass unter Anwendung natürlicher, beobachteter Niederschlagszeitreihen eine hohe Variabilität der Bemessungsergebnisse festzustellen ist, die unter Annahme von spezifischen Baukosten von 300 €/m<sup>3</sup> Mehr- oder Minderinvestitionen von bis zu 1,8 Mio. € beinhalten. Durch die Verwendung der synthetischen Zeitreihen, die innerhalb der Generierung die räumliche Variabilität der umliegenden Stationen berücksichtigen und deren Ergebnisse im Wesentlichen innerhalb der Ergebnisse der Bandbreite des natürlichen Regengeschehens liegen, werden, im Vergleich zur Verwendung der benachbarten DWD-Stationen, die Unsicherheiten in der Beckendimensionierung reduziert und die Sicherheit bzw. Belastbarkeit der Bemessungsergebnisse erhöht. Als Folge werden Investitionskosten bedarfsgerecht aufgewendet. Unter Kenntnis der vorliegenden Ergebnisse und des geplanten Standortes kann eine geringere Beckengröße als die auf Grundlage der Referenzzeitreihe abgeleitet werden, wenn z. B. die Zeitreihen LHG oder WAWI als Bemessungsgrundlage verwendet werden würde. Die Zeitreihen LHG und WAWI bilden in diesem Fall die Regencharakteristiken der DWD-Station 3 (Ihringen) und der Referenzzeitreihe ab, zwischen denen das Neubaugebiet räumlich gelegen ist.

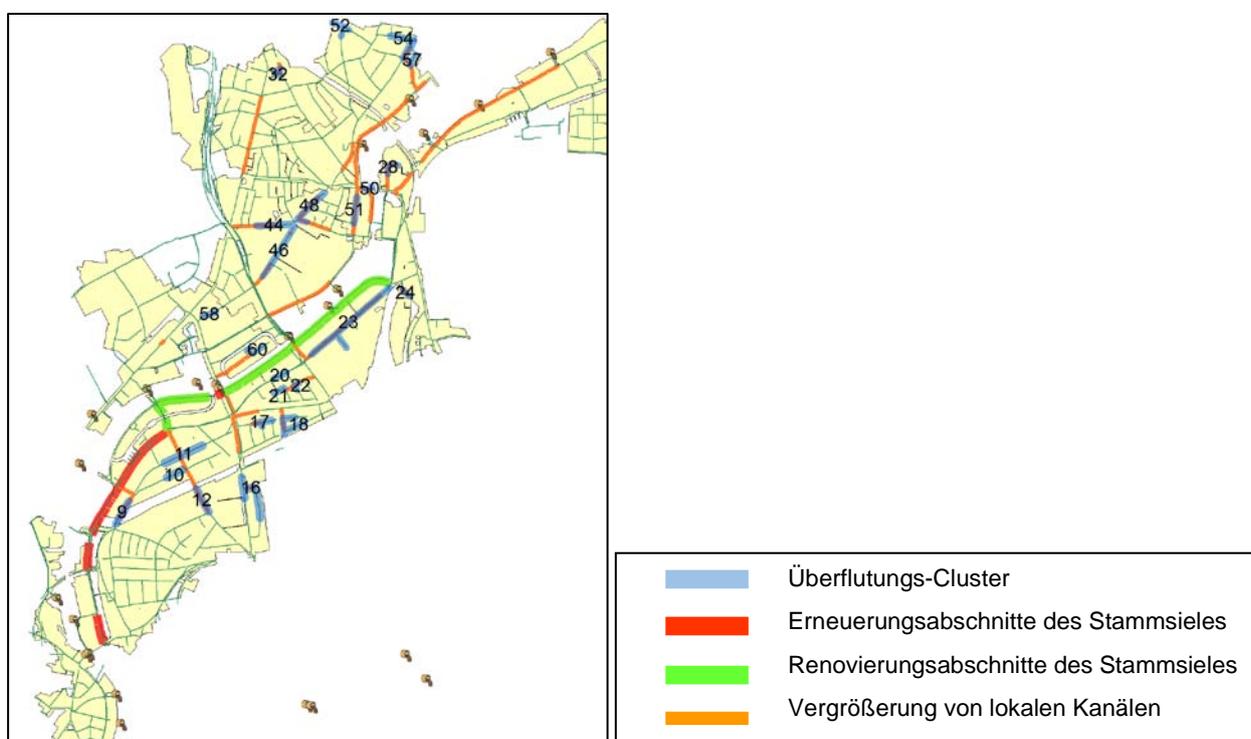
### **7.5.3 Anwendungsbeispiel Hamburg**

Als Anwendungsbeispiel im Untersuchungsgebiet Hamburg wird die Sanierungsplanung eines Abwassersammlers im Nordosten der Innenstadt betrachtet. Für den 4.424 m langen südlichen Abschnitt des Stammsieles Rathenaustraße ergibt sich aufgrund des Bauzustandes ein mittelfristiger Sanierungsbedarf. Der Sanierungsbereich lässt sich anhand von Profilwechseln und bedeutenden Zuflüssen in 10 Teilabschnitte einteilen, für die im Rahmen der konzeptionellen Bearbeitung zu klären war, ob sie noch per Schlauch- oder Rohrrerlining renoviert werden können, oder ob sie mit vergrößerten Profilen erneuert werden müssen.

Als Vorarbeit wird die hydraulische Situation im Einzugsgebiet des Stammsieles untersucht. Dabei werden 25 Überstau-Cluster (Bereiche mehrerer hydraulisch zusammenhängender und rechnerisch überstauter Schächte) identifiziert, in denen die zulässigen Überstau- und / oder Überflutungshäufigkeiten nicht eingehalten

werden können (Abbildung 7.19). Auf dieser Analyse aufbauend wird ein hydraulisch sanierter Netzzustand im Modell abgebildet, indem die Kanäle im Einzugsgebiet des Stammsieles Rathenastraße so weit vergrößert werden, dass aufbauend auf einer Vorbemessung mit dem im Freispiegel abzuleitenden zweijährlichen Modellregen einerseits die normativen Anforderungen des Überstau- und des Überflutungsnachweises für alle Cluster und andererseits die für die Hamburger Gewässer geltenden Entlastungshäufigkeiten an den 17 im Einzugsgebiet liegenden Mischwasserüberläufen eingehalten werden können.

Als Ergebnis können 4 Teilabschnitte des Stammsieles renoviert werden, 6 Abschnitte müssen mit größeren Profilen erneuert werden. Zusätzlich müssen weitere 10,5 km Mischwasserkanäle im Einzugsgebiet vergrößert werden.



**Abbildung 7.19** Übersichtskarte zum Anwendungsbeispiel "Stammsiel Rathenastraße" (Hamburg)

Um zu prüfen, ob die Planung mit synthetischen Niederschlagsdaten zu vergleichbaren Ergebnissen führt, wird das sanierte Netz in einem ersten Schritt mit jeweils zwei bis drei Realisationen der drei synthetischen Niederschlagsmodelle simuliert. Dabei werden die Realisationen ausgewählt, deren partielle Serien diejenigen der gemessenen Referenz-Niederschlagsdaten am besten und am

schlechtesten treffen (vgl. Tabelle 7.3). Zusätzlich erfolgt ein Rechenlauf mit den Daten der benachbarten DWD-Station Wendisch Evern.

**Tabelle 7.3      Verwendete Realisationen im Anwendungsbeispiel Hamburg**

Niederschlagsmodell	beste Realisation	am deutlichsten unterschätzende Realisation	am deutlichsten überschätzende Realisation
IGUA	Realisation 03	Realisation 08	- *)
WAWI	Realisation 10	Realisation 12	Realisation 06
LHG	Realisation 08	Realisation 02	Realisation 09

\*) entfällt da nur deutliche Unterschätzungen aber nur minimale Überschätzungen festgestellt wurden

Vergleichsgrößen für das Praxisszenario sind:

- Einhaltung des Überflutungsnachweises an allen Punkten im Einzugsgebiet des Stammsieles Rathenaustraße
- Einhaltung der zulässigen Überstauhäufigkeiten in den während der Konzeptbearbeitung identifizierten, überflutungsgefährdeten 25 Überstaubereichen
- Einhaltung der zulässigen Entlastungshäufigkeiten an allen 17 Mischwasserüberläufen im Stammsiel Rathenaustraße

Zur Bewertung der zweiten und der dritten Vergleichsgröße werden Starkregenseriensimulationen durchgeführt. Aus diesen werden die Regenereignisse, die im Einzugsgebiet des Stammsieles Rathenaustraße die höchsten Überstauvolumina ergeben, mit Hilfe der gekoppelten 1D / 2D-Simulation erneut berechnet, um die Überflutungssicherheit nachweisen zu können.

Der **Überflutungsnachweis** wird mit fünf der acht gerechneten Realisationen sowie mit der DWD-Zeitreihe überall eingehalten. Mit zwei Realisationen wird der Überflutungsnachweis in ein bis zwei Clustern nicht eingehalten. Eine Realisation führt in sechs Clustern sowie in weiteren, bislang nicht als Überflutungsschwerpunkte erkannten, Bereichen zu Überflutungen.

**Tabelle 7.4      Überflutungsergebnisse der Realisationen im Anwendungsbeispiel Hamburg**

Niederschlags-	beste Realisation	am deutlichsten	am deutlichsten
----------------	-------------------	-----------------	-----------------

<b>modell</b>		<b>unterschätzende Realisation</b>	<b>überschätzende Realisation</b>
IGUA	überall eingehalten	überall eingehalten	-
WAWI	überall eingehalten	überall eingehalten	6 Cluster verfehlt
LHG	überall eingehalten	2 Cluster verfehlt <sup>7</sup>	1 Cluster verfehlt
DWD Wend.-Evern	überall eingehalten		

Der **Überstaunachweis** wird mit vier der gerechneten Realisationen überall eingehalten. Mit drei Realisationen wird der Überstaunachweis in einem Cluster und mit einer Realisation sowie mit der DWD-Zeitreihe in vier bis fünf Clustern nicht eingehalten.

**Tabelle 7.5 Überstauergebnisse der Realisationen im Anwendungsbeispiel Hamburg**

<b>Niederschlagsmodell</b>	<b>beste Realisation</b>	<b>am deutlichsten unterschätzende Realisation</b>	<b>am deutlichsten überschätzende Realisation</b>
IGUA	überall eingehalten	überall eingehalten	-
WAWI	überall eingehalten	überall eingehalten	5 Cluster verfehlt
LHG	1 Cluster verfehlt	1 Cluster verfehlt	1 Cluster verfehlt
DWD Wend.-Evern	4 Cluster verfehlt		

Die zulässige **Entlastungshäufigkeit** von 1,2 Entlastungsereignissen pro Jahr wird mit fünf Realisationen überall eingehalten, mit den anderen drei Realisationen sowie mit der DWD-Zeitreihe findet eine Überschreitung der Zielvorgabe an ein bis drei Überläufen statt.

<sup>7</sup> Obwohl es sich um die am deutlichsten unterschätzende Realisation handelt enthält sie einzelne extreme Regenereignisse, die in diesem Bsp. zu Überflutungen führen.

**Tabelle 7.6 Entlastungsergebnisse der Realisationen im Anwendungsbeispiel Hamburg**

<b>Niederschlagsmodell</b>	<b>beste Realisation</b>	<b>am deutlichsten unterschätzende Realisation</b>	<b>am deutlichsten überschätzende Realisation</b>
IGUA	3 Überläufe verfehlt	überall eingehalten	-
WAWI	überall eingehalten	überall eingehalten	überall eingehalten
LHG	überall eingehalten	1 Überlauf verfehlt	1 Überlauf verfehlt
DWD Wend.-Evern	1 Überlauf verfehlt		

Damit gibt es drei Realisationen, bei denen alle Nachweise eingehalten werden: die jeweils unterschätzenden Realisationen von IGUA und WAWI sowie die anhand der partiellen Serien als beste erkannte Realisation von WAWI.

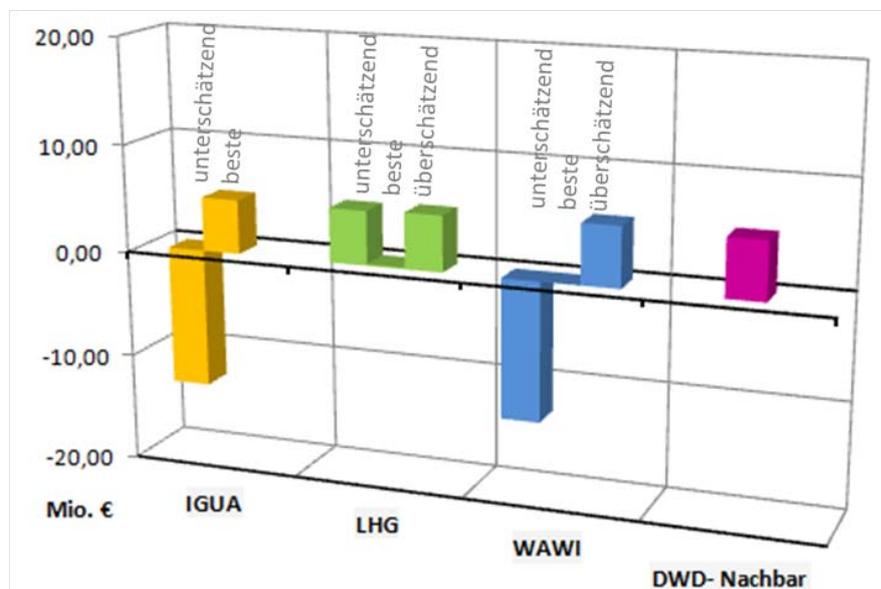
In einem zweiten Schritt wird für diese Realisationen in einem iterativen Prozess geprüft, ob in den im Rahmen der Konzeptbearbeitung ermittelten Erneuerungsabschnitten des Stammsieles ganz oder teilweise doch ein Rohrrelining vorgenommen werden kann. Für die Realisationen, die nicht alle Nachweise erfüllen, werden geeignete zusätzliche Vergrößerungen des Kanalnetzes angesetzt.

Als Ergebnis des zweiten Schrittes bleibt festzuhalten, dass

- eine Realisation (WAWI, beste Realisation) zu genau dem gleichen Planungsergebnis führt wie die Konzeptbearbeitung auf Grundlage gemessener Regendaten
- zwei Realisationen (IGUA und WAWI, unterschätzende Realisationen) die Renovierung des Stammsieles auf der gesamten Länge zuließen
- mit vier Realisationen (überschätzende Realisationen LHG und WAWI, beste Realisation IGUA, unterschätzende Realisation LHG) sowie mit der DWD-Zeitreihe ein aus der Konzeptbearbeitung als renovierbar ermittelter Abschnitt vergrößert werden müsste
- mit vier Realisationen sowie mit der DWD-Zeitreihe einzelne zusätzliche Vergrößerungen der lokalen Kanäle erfolgen müssten.

Damit ergeben sich bezogen auf die Anzahl der in der Konzeptbearbeitung gegenüber dem Istzustand vorgeschlagenen Maßnahmen (Renovierungs- bzw. Erneuerungsabschnitte, Vergrößerung lokaler Kanäle) für die mit synthetischen Regen durchgeführten Nachrechnungen prozentual nur geringe Abweichungen. Da

aber der Meterpreis für eine Erneuerung momentan das Mehrfache des Preises einer Renovierung beträgt, schlagen diese Unterschiede finanziell deutlich zu Buche (vgl. Abbildung 7.20).



**Abbildung 7.20** Kostenunterschiede der verschiedenen Planungsvarianten (Referenzkosten 60 Mio. €)

Neben variierenden Kosten verändert sich mit der Datengrundlage auch das Risiko von Überflutungen und Entlastungen. In den Fällen, in denen mit kleineren Durchmessern (Rohrrelining) geplant wird, können die geforderten Überflutungs- und Entlastungshäufigkeiten in Realität gegebenenfalls nicht mehr eingehalten werden. Das Beispiel zeigt, wie sehr die Auswirkungen einzelner Realisationen vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig sein können. Außerdem wird deutlich, welches Risiko die Nutzung einer einzelnen Realisation und auch einer benachbarten DWD-Station mit sich bringen kann. Durch die Verwendung von vielen Realisationen oder einer deutlichen Verlängerung der Zeitreihen und der Analyse ihrer Ergebnisse als Gesamtheit können die Unsicherheiten verringert werden und verlässliche Planungsergebnisse entstehen.

## 7.5.4 Anwendungsbeispiel Steuerung (Freiburg)

### 7.5.4.1 Veranlassung und Vorgehensweise

Ein Hauptgegenstand der Untersuchungen in diesem Forschungsverbund ist die Weiterentwicklung, die Testung und der Vergleich von Niederschlagsmodellen zur

Erzeugung synthetischer Niederschlagsdaten für die Planung und Optimierung von Stadtentwässerungssystemen. Dabei wird unter anderem der stadthydrologische Anwendungsbereich „Einschätzung der Steuerungswürdigkeit von Entwässerungssystemen“ betrachtet.

Im Rahmen dieser Bearbeitung erfolgt die Prüfung der Eignung synthetischer Niederschläge für die Planung von Kanalbewirtschaftungsmaßnahmen. Die Bearbeitung erfolgt anhand folgender Bearbeitungsschritte:

- Übernahme und Anpassung der vorhandenen Modelle für die Steuerungsuntersuchung
- Analyse des Systems hinsichtlich der Möglichkeit der Abflusssteuerung einzelner Bauwerke.
- Definition von Bewirtschaftungszielen.
- Entwicklung einer Steuerstrategie und Umsetzung in die Regelbasis
- Iterative Verbesserung der Regelbasis anhand der Auswertung von Simulationsberechnungen mit verschiedenen Regenbelastungen.
- Nachweis und Bewertung der Steuereingriffe für die synthetischen Regenreihen und Vergleich mit anderen Regendaten unter Berücksichtigung gleichmäßiger und ungleichmäßiger Überregnung.

#### **7.5.4.2 Einführung in die Kanalnetzsteuerung**

Die konventionelle Art Entwässerungsprobleme wie hydraulische Engpässe zu lösen oder Mischwasserentlastungen in die Gewässer zu reduzieren, ist in der Regel die Schaffung zusätzlicher Speicherräume, z. B. durch den Bau von Regenbecken und neuen Stauraumkanälen, die Aufweitung von Durchlässen oder die Reduzierung der Zuflüsse durch dezentrale Maßnahmen. Eine andere Möglichkeit, die in der letzten Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist der aktive Eingriff in das Abflussgeschehen des Kanalnetzes durch Steuerung. Diese Bewirtschaftung hat zum Ziel, vorhandenen Speicherraum innerhalb des Systems durch gezielte Steuerung optimal auszunutzen und somit den Bau zusätzlicher Speicher zu vermeiden.

Insbesondere können bei unterschiedlicher Auslastung einzelner Netzteile lokale Entlastungen oder Überlastungen auftreten, während in anderen Bereichen die

Speicherräume nur teilweise ausgelastet sind. In diesen Fällen kann eine passive Steuerung durch starre Drosseln zu unerwünschten Effekten führen. Lokal gesehen kann die Drosselung richtig sein, da nur ein rechnerisch bestimmter maximaler Drosselabfluss weitergeleitet wird. Global betrachtet führt dies unter Umständen zu ungünstigen Abflüssen, da in anderen Netzteilen Kapazitäten frei sind, während hingegen an stark belasteten Abschnitten eine Entlastung stattfindet.

Steuerungs- und Regelungskonzepte können die Ressourcen der Entwässerungssysteme unter ständiger Kontrolle der vorliegenden Randbedingungen optimal ausnutzen. Insbesondere die Anpassungsfähigkeit an variierende Randbedingungen wie Klima- oder demografischer Wandel macht die Kanalnetzbewirtschaftung oder Steuerung zu einer sehr nachhaltigen Maßnahme.

Für die optimale Bewirtschaftung vorhandener Systeme, kommt der Kanalnetzsteuerung eine zunehmend wichtigere Rolle zu. Hierbei gilt es, unterschiedliche Bewirtschaftungsziele, wie z. B. die optimale Nutzung von Rückhaltevolumen, eine minimale Gewässerbelastung oder eine gleichmäßige Beladung der Kläranlage gleichzeitig möglichst optimal zu erfüllen.

Die komplexen Fragestellungen der Dimensionierung und Bewirtschaftung werden nach Stand der Technik mittels hydraulischer Simulation des Kanalnetzes untersucht. Da hierbei die Vorfällung des Systems von großer Bedeutung ist, reicht eine ereignisbasierte Simulation nicht aus. Eine adäquate Risikoabschätzung kann nur über Langzeitsimulation erreicht werden. Als Eingangsdaten sind dafür langjährige, zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagszeitreihen notwendig.

### **7.5.4.3 Verwendete Daten**

#### **7.5.4.3.1 Simulationsmodelle**

Die Bearbeitung erfolgt auf Basis folgender Simulationsmodelle des Kanalnetzes von Freiburg:

- Hydrologisches Modell im Format KOSIM 7.4 zur Durchführung von Langzeitsimulationen zur Beurteilung der Veränderung des Entlastungsverhaltens aufgrund von Steuerungseingriffen ins Kanalnetz.
- Hydrodynamisches Modell im Format EXTRAN 7.8 zur Durchführung von Simulationen zur Beurteilung der Veränderung des Überstauverhaltens aufgrund von Steuerungseingriffen ins Kanalnetz.

### **7.5.4.3.2 Niederschlagsdaten**

Für die Bewertung der Eignung der synthetischen Zeitreihen für die Planung von Kanalbewirtschaftungsmaßnahmen werden folgende Regenbelastungsszenarien berechnet und gegenübergestellt:

- Gleichmäßige Überregnung
  - Referenzzeitreihe Freiburg (20 Jahre)
  - LHG (30 Realisationen je 20 Jahre)
  - DWD Station mit mittlerer Entfernung (10 Jahre)
- Ungleichmäßige Überregnung
  - Regenschreiber Referenz Freiburg und acht Regenschreiber der bnNETZE GmbH (2 Jahre)
  - LHG (30 Realisationen je 2 Jahre)
  - DWD Station mit mittlerer Entfernung (2 Jahre)
  - Gleichmäßige Referenzzeitreihe Freiburg (2 Jahre)

### **7.5.4.4 Modelltechnische Umsetzung der Kanalnetzsteuerung**

Zur Entwicklung einer Regelbasis, mit der die im Folgenden erläuterte Steuerungsstrategie umgesetzt werden soll, wird das Steuerungssystem ITWH-CONTROL in Verbindung mit dem Programmpaket HYSTEM-EXTRAN bzw. KOSIM verwendet. ITWH-CONTROL ermöglicht es, zielgerichtete Eingriffe in den Abflussvorgang eines Entwässerungssystems aufgrund systemweiter Informationen vorzunehmen. Einsetzbar ist ITWH-CONTROL sowohl in einem real existierenden Entwässerungssystem als auch zur Simulation der Steuerung anhand eines Modells des Entwässerungssystems.

Das wesentliche Ziel der modelltechnischen Untersuchungen ist die Aufstellung einer Regelbasis, die in verschiedenen Modellen genutzt und möglichst einfach auf das reale System übertragen werden kann. Anhand des Vergleichs der Berechnungsergebnisse des ungesteuerten Systems mit den gesteuerten Ergebnissen kann das Steuerungspotenzial des Entwässerungssystems und die Eignung der synthetischen Regen für die Steuerungsuntersuchungen eingeschätzt werden.

#### **7.5.4.4.1 Definition von Steuerungszielen**

Folgende übergeordnete Ziele können durch den Betrieb einer Abflusssteuerung beispielsweise verfolgt werden:

- Verminderung der Gewässerbelastung,
- Vermeidung von Überlastungen in Abwasseranlagen,
- Verminderung von Betriebskosten,
- Durchführung von Betriebsvorgängen,
- Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs,
- Einhaltung von wasserrechtlichen und vertraglichen Vorgaben.

Im Rahmen der Bearbeitung werden folgende Zielstellungen definiert, die durch gezielte Bewirtschaftung der Systembereiche verbessert bzw. eingehalten werden sollen:

- Reduzierung des mittleren jährlichen Gesamtentlastungsvolumens aus dem Gesamtsystem.
- Beibehaltung bzw. Verbesserung des Überstauverhaltens.

#### **7.5.4.4.2 Systemanalyse zur Ermittlung von zur Steuerung geeigneten Systembereichen**

Die vorliegende Bearbeitung beschränkt sich auf die gezielte Bewirtschaftung der maßgeblichen Rückhaltevolumina im Entwässerungssystem in folgenden Systembereichen mit Überlaufbauwerken:

- RÜB Kläranlage ( $V=50.570 \text{ m}^3$ ),
- RÜB KA-Nord ( $V=1.180 \text{ m}^3$ ),
- RÜB Komturplatz ( $V=2.310 \text{ m}^3$ ) und
- RÜB Besanconallee ( $V=5.520 \text{ m}^3$ ).

Die Ermittlung der Steuerungsbereiche erfolgt durch Analyse der Simulationsmodelle und der Auswertung von Berechnungsergebnissen unterschiedlicher Niederschlagsbelastungen insbesondere hinsichtlich des Entlastungsverhaltens. Die Auswahl der vier Systembereiche stellt die Basis für Steuerungsuntersuchungen dar, kann aber im Rahmen weitergehender Untersuchungen erweitert bzw. optimiert werden.

Die Netzverknüpfungen der Systembereiche sind vereinfacht in folgender Systemskizze dargestellt (vgl. Abbildung 7.21). Sämtliche dargestellten Systembereiche besitzen Mischwasserentlastungsbauwerke (nicht dargestellt).

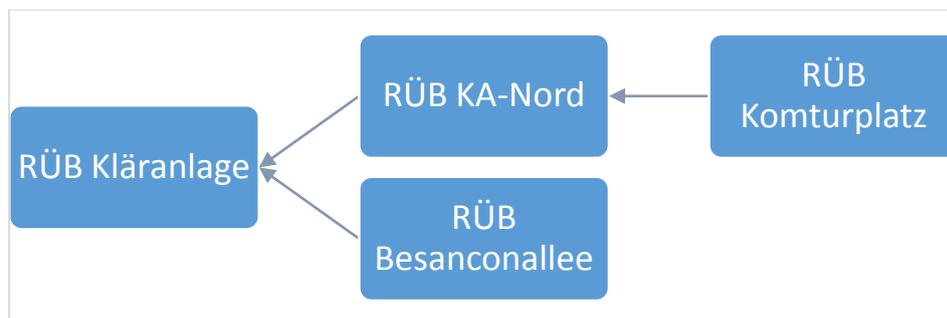


Abbildung 7.21 Systemskizze der gesteuerten Systembereiche

#### 7.5.4.4.3 Aufstellung der Regelbasis

##### Vorgehensweise

Zur modelltechnischen Simulation eines gesteuerten Entwässerungssystems müssen Steuerungsregeln formuliert werden, nach denen das System betrieben wird. Die Steuerungsregeln beschreiben die Abhängigkeiten zwischen Systemzuständen und Steuerungseingriffen. Die Regelbasis wird aus verbal formulierten Einzelregeln gebildet. Die Aufstellung / Verbesserung der Regelbasis erfolgt anhand der Simulationsmodelle KOSIM bzw. EXTRAN in Verbindung mit dem Steuerungsmodell ITWH-CONTROL. Der auf der Theorie der FUZZY-LOGIK aufgebaute Regelinterpreter verarbeitet darin Informationen über die Systemzustände auf der Grundlage einer vorgegebenen Regelbasis. Als Ergebnis der Verarbeitung liefert er neue Sollwerte für definierte Regelorgane.

Mit Hilfe von modelltechnischen Berechnungen für ausgewählte Regenereignisse wird in einem iterativen Prozess die Regelbasis aufgestellt, mit der die oben genannten Ziele und Randbedingungen möglichst optimal berücksichtigt werden.

Zur Aufstellung der Regelbasis werden Messstellen definiert, auf deren Messwerten die Steuerungseingriffe basieren sollen. Diese verwendeten Messwerte können z. B. Wasserstände, Durchflüsse oder Niederschlagshöhen sein. Zur Aufstellung der Regelbasis für das Entwässerungssystem Freiburg werden die Wasserstände in den vier Speicherräumen der oben genannten Systembereiche genutzt.

Zur optimalen Nutzung der vorhandenen Speichervolumina in den vier Systembereichen werden aufgrund der Messwerte die Weiterleitungsmengen an den Drosselbauwerken RÜB KA-Nord, RÜB Komturplatz und RÜB Besanconallee gesteuert. In die Weiterleitung am RÜB Kläranlage wird durch die Steuerung nicht aktiv eingegriffen.

Durch Auswertung der systemweiten Messwerte werden die Weiterleitungsmengen an den drei Steuerbauwerken, sofern erforderlich, gegenüber dem ungesteuerten System reduziert. Eine Erhöhung der Drosselabflüsse gegenüber dem ungesteuerten System erfolgt in diesem Rahmen nicht.

#### **7.5.4.4 Grundlagen der Steuerstrategie**

Die "grobe" Strategie, die bei der Aufstellung der Regeln verfolgt wird, ist im Folgenden kurz erläutert.

Um das Überstauverhalten des Entwässerungssystems gegenüber dem Bestandssystem nicht zu verschlechtern, werden die Weiterleitungsmengen maximiert, sobald die Stauziele überschritten werden. Eine Veränderung der Stauziele gegenüber dem ungesteuerten System erfolgt nicht.

#### **Weiterleitungsmenge am RÜB Komturplatz**

Einstellung der Weiterleitungsmenge in Abhängigkeit der Füllung des Speichers RÜB KA-Nord. Um eine gleichmäßige Auslastung der beiden Speicherräume zu gewährleisten gilt folgende Strategie:

- Hohe Weiterleitungsmenge bei geringer Füllung RÜB KA-Nord
- Geringe Weiterleitungsmenge bei großer Füllung RÜB KA-Nord

#### **Weiterleitungsmengen am RÜB KA-Nord und RÜB Besanconallee**

Einstellung der Weiterleitungsmengen an beiden Trennbauwerken in Abhängigkeit:

- der Füllung des Speichers RÜB Kläranlage und
- der Tendenz des Wasserstandsanstiegs am Speicher RÜB Kläranlage.

Aufgrund des vergleichsweise hohen Speichervolumens des RÜB Kläranlage werden bei Regenbeginn und bei geringer Füllung des RÜB Kläranlage die Zuflüsse vom RÜB KA-Nord und RÜB Besanconallee maximiert.

Solange der Wasserstand am RÜB Kläranlage ansteigt werden die Zuflüsse vom RÜB KA-Nord und RÜB Besanconallee reduziert, solange die Becken noch teilgefüllt sind.

Um einen Überlauf des Beckens RÜB Kläranlage durch eine Entleerung der oberhalb liegenden Speicherräume zu vermeiden, werden die Zuflüsse vom RÜB KA-Nord und RÜB Besanconallee solange reduziert, bis die Entleerung des RÜB Kläranlage beginnt.

#### **7.5.4.5 Modelltechnische Nachweisführung**

##### **7.5.4.5.1 Hydrologische Nachweisführung**

Anhand des hydrologischen Modells im Format KOSIM 7.4 werden diverse Langzeitsimulationen zur Ermittlung des Entlastungsverhaltens durchgeführt.

Zur Beurteilung der Veränderung des Entlastungsverhaltens aufgrund von Steuerungseingriffen ins Kanalnetz werden für jeden Lastfall (siehe Kapitel 7.5.4.3.2) die Simulationen am ungesteuerten und gesteuerten System durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Die Berechnungen werden dabei für gleichmäßige und ungleichmäßige Überregnung durchgeführt. Die Berechnungen und Auswertungen der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen erfolgt realisationsbezogen.

##### **Bewertung des Steuerungspotenzials**

Eine gezielte Bewirtschaftung der drei Bereiche innerhalb des Entwässerungssystems führt bei allen ausgewählten Belastungssituationen zu einer deutlichen Verbesserung im Gesamtentlastungsverhalten des Systems.

Besonders bei Niederschlagsbelastungen, die zu mittleren bis geringen Entlastungsvolumina in die Gewässer führen kann durch Steuerung der Weiterleitungsmengen eine deutliche Verringerung der Entlastungsmenge erzielt werden. Bei Starkregen, die bereits im ungesteuerten Zustand zu einer Füllung sämtlicher Speicherräume führen, ist die durch Steuerung zu erzielende Verbesserung des Entlastungsverhaltens geringer ausgeprägt.

Eine gezielte Bewirtschaftung der drei ausgewählten Systembereiche führt bei einer gleichmäßigen Überregnung mit den synthetischen Regen zu einer deutlichen Verbesserung des Entlastungsverhaltens.

Die Analyse der Berechnungsergebnisse weist auf, dass durch gezielte Bewirtschaftung der vorhandenen Speichervolumina im Kanalnetz Freiburg eine deutliche Verringerung der jährlichen Gesamtentlastungsmenge (um ca. 6,6 %) erreicht werden kann (vgl. Abbildung 7.22).

Die synthetischen Regenreihen der gleichmäßigen Überregnung zeigen im Mittel eine ähnliche Größe in den mittleren Jahresentlastungsmengen wie die Referenzzeitreihe auf. Die mittleren Jahresentlastungsmengen zeigen eine Bandbreite von ca. 299.000 m<sup>3</sup>/a bis 483.000 m<sup>3</sup>/a im ungesteuerten Modellzustand, in welcher auch das Ergebnis der Referenz mit 387.347 m<sup>3</sup>/a liegt. Die DWD-Station mittlerer Entfernung zeigt dagegen eine doppelt so hohe mittlere Entlastungsmenge wie die Referenz auf und liegt damit sogar über dem maximalen Wert der oberen Bandbreite der synthetischen Zeitreihen. Bei der Gegenüberstellung der Differenz und dem Vergleich mit den Referenzergebnissen vom ungesteuerten zur gesteuerten mittleren Jahresentlastung, kann festgestellt werden, dass die synthetischen Zeitreihen und DWD-Station ein ähnliches Steuerungspotenzial aufzeigen (vgl. Abbildung 7.22).

Die Ergebnisse der synthetischen Regenreihen der ungleichmäßigen Überregnung zeigen im Mittel eine geringere Größe in den mittleren Jahresentlastungsmengen als die Referenzzeitreihe auf. Betrachtet man allerdings das Steuerungspotenzial, so erhält man in beiden Fällen (Referenz, SYN) eine ähnliche Verringerung der Gesamtentlastungsmenge.

Durch weitere Optimierung der Regelbasis oder die Implementierung weiterer Speicherräume und Messstellen in die Bewirtschaftungsstrategie, wird eine weitere Reduzierung der Entlastungsmengen gegenüber dem ungesteuerten Zustand erwartet.

	mittlere Jahresentlastungsmenge (m <sup>3</sup> /a)			Differenz [%]
	ungesteuert	gesteuert	Differenz	
<b>gleichmäßige Überregnung</b>				
Referenzzeitreihe Freiburg (20a)	331.575	309.598	21.977	6,63 %
DWD-Station mittlerer Entfernung Elzach (10a)	675.765	635.080	40.685	6,02 %
Synthetische Zeitreihe, Mittelwert (30 x 20a)	387.347	356.677	30.670	7,93 %
Referenzzeitreihe Freiburg (2a)	457.061	413.706	43.355	9,49 %
DWD-Station mittlerer Entfernung Elzach (2a)	969.264	911.594	57.670	5,95 %
<b>ungleichmäßige Überregnung</b>				
Referenzzeitreihe RS Freiburg + 8 RS bnNETZE (2a)	803.279	759.497	43.782	5,45 %
Synthetische Zeitreihe, Mittelwert (30 x 2a)	307.783	290.684	17.099	5,56 %

Abbildung 7.22 Übersicht des Entlastungsverhaltens

#### 7.5.4.5.2 Hydrodynamische Nachweisführung

Die aufgestellte Regelbasis kann zur Beurteilung der Veränderung des Überstauverhaltens aufgrund von Steuerungseingriffen ins Kanalnetz verwendet werden. Die Nachweisführung erfolgt mittels Seriensimulation maßgeblicher Ereignisse anhand der gekoppelten Simulation des hydrodynamischen Kanalnetzmodells und Control für das ungesteuerte und gesteuerte Modell.

Da die Stauziele des Systems und die maximalen Weiterleitungsmengen aus den gesteuerten Systembereichen durch die Steuerungseingriffe nicht verändert werden, ist keine Verschlechterung des Überstauverhaltens durch die Maßnahmen zu erwarten.

#### 7.5.4.6 Fazit

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich synthetische Niederschläge im Rahmen dieser Bearbeitung als steuerungswürdig zeigen. So wird durch die gezielte Bewirtschaftung der Systembereiche eine Reduzierung des mittleren jährlichen Gesamtentlastungsvolumens sowie die Beibehaltung bzw. Verbesserung des Überstauverhaltens nachgewiesen (prozentuale Verbesserung des Gesamtentlastungsvolumens bezogen auf den ungesteuerten Zustand: gleichmäßig: 7,9 Prozent und ungleichmäßig: 5,5 Prozent).

Die Ergebnisse auf Grundlage der synthetischen Zeitreihen für den Lastfall gleichmäßige Überregnung zeigen ein ähnliches Verhalten bezüglich der Jahresentlastungsmenge und dem Steuerungserfolg. Es ist zu schließen, dass die synthetischen Zeitreihen eine geeignete Grundlage zur Abschätzung des Steuerungspotenzials sind.

Die Ergebnisse für den Lastfall ungleichmäßige Überregnung zeigen hinsichtlich der Volumina ein von der Referenz abweichendes Entlastungsverhalten; der Steuerungserfolg bewegt sich jedoch in gleicher Größenordnung.

Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zum hydraulischen Überstaunachweis und zur Schmutzfrachtberechnung sowie aufgrund der begrenzten Validierbarkeit (zwei Jahre Referenzbeobachtung) kann eine Nutzung der synthetischen Regendaten für den Lastfall ungleichmäßige Überregnung nicht empfohlen werden.