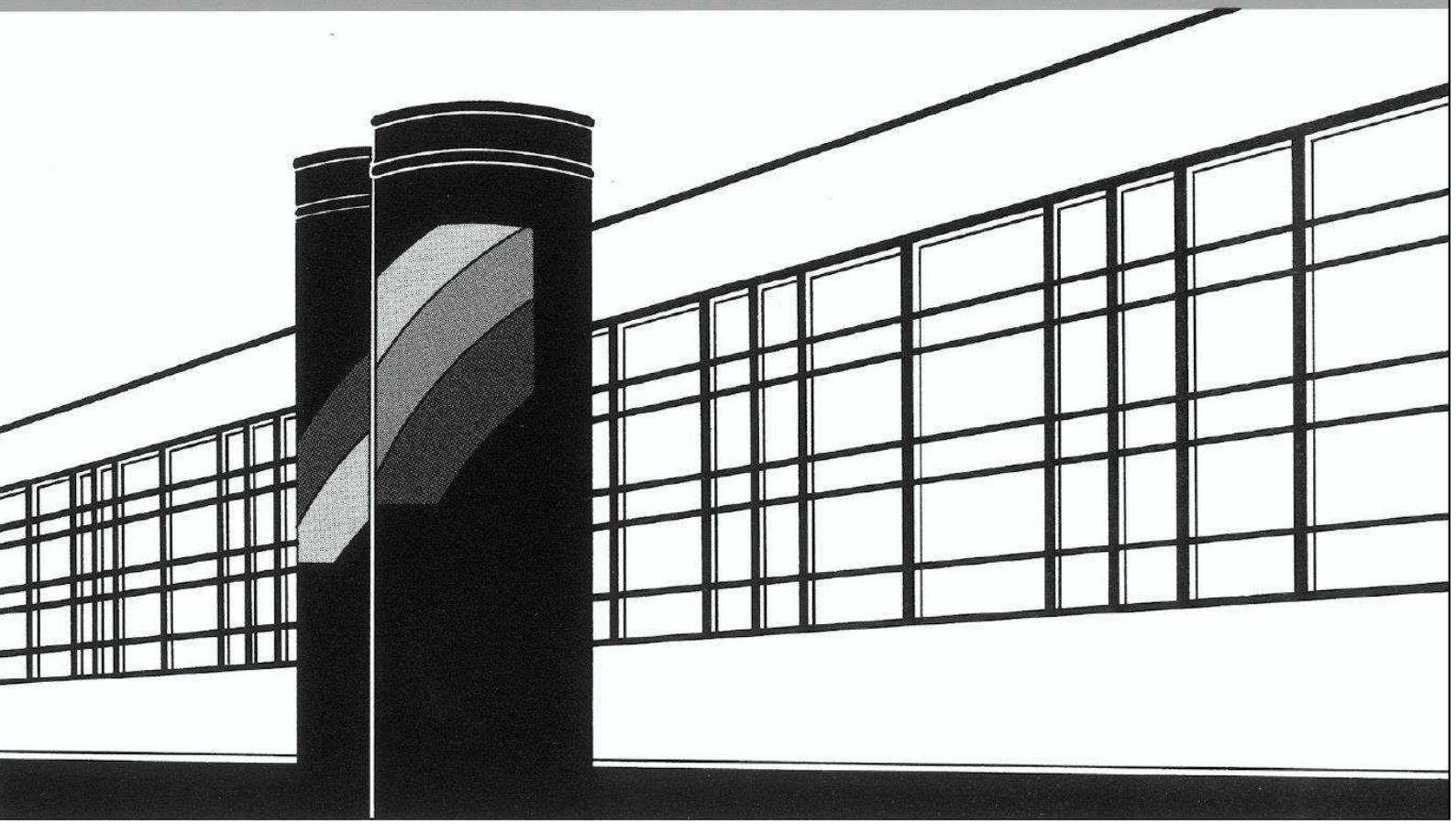
Universität Stuttgart

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Mitteilungen



Heft 255

Thomas Müller, Tobias Mosthaf,
Sarah Gunzenhauser, Jochen Seidel,
András Bárdossy

Grundlagenbericht
Niederschlags-Simulator (NiedSim3)

Heft 255

Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3)

von
Dipl.-Ing. Thomas Müller
Dipl.-Ing. Tobias Mosthaf
B.Sc. Sarah Gunzenhauser
Dr. Jochen Seidel
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
der Universität Stuttgart

D93 Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://www.d-nb.de abrufbar

Thomas Müller, Tobias Mosthaf, Sarah Gunzenhauser, Jochen Seidel, András Bárdossy:
Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3), Universität Stuttgart. - Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, 2017

(Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart: H. 255)

ISBN 978-3-942036-59-7

NE: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung <Stuttgart>: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2017 vom Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystem-modellierung

Druck: Document Center S. Kästl, Ostfildern

Universität Stuttgart

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - IWS
Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Grundlagenbericht

Niederschlags-Simulator (NiedSim)

Version 3.0

Verfasser:

Dipl.-Ing. Thomas Müller
Dipl.-Ing. Tobias Mosthaf
B.Sc. Sarah Gunzenhauser
Dr. Jochen Seidel
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Stuttgart, 25.10.2017

Pfaffenwaldring 61
D-70550 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711/685-69102
Fax: +49 (0)711/685-64681
thomas.mueller@iws.uni-stuttgart.de
http://www.iws.uni-stuttgart.de

I. INHALT

I. INHALT ... 3
II. KURZBESCHREIBUNG NIEDSIM3 ... 5
1 EINLEITUNG ... 8
2 ÜBERBLICK PROGRAMMSYSTEM NIEDSIM3 ... 10
3 EINGANGSDATEN ... 11
3.1 Niederschlag ... 11
3.2 Höhenmodell und Rasterkoordinaten ... 11
3.3 KOSTRA-Starkregenauswertung ... 11
4 DATENBANK ... 12
4.1 Datenaufbereitung ... 12
4.1.1 Homogenisierung ... 12
4.1.2 Filter für hochaufgelöste Zeitreihen ... 13
4.1.3 Definition Jahreszeiten ... 16
4.2 Regionalisierungsverfahren ... 16
4.2.1 Richtungsabhängige Glättung eines Höhenmodells ... 18
4.3 Parameter der Initialzeitreihe ... 20
4.3.1 Stündliche Verteilungsfunktion ... 20
4.3.2 Jahressummen ... 24
4.3.3 Poisson Parameter ... 24
4.4 Parameter der stündlichen Optimierungsfunktion ... 28
4.4.1 Monatliche Niederschlagssummen ... 29
4.4.2 Überschreitungswahrscheinlichkeiten (täglich) ... 29
4.4.3 Autokorrelation ... 30
4.4.4 Häufigkeitsverteilung der Länge der Niederschlagsintervalle ... 32
4.5 Parameter der Disaggregierung ... 32
4.5.1 Autokorrelation ... 32
4.5.2 Skalierungsparameter ... 33
4.6 Parameter der Anpassung nach KOSTRA ... 35
4.6.1 Bemessungsniederschläge aus dem KOSTRA-Atlas ... 35
5 SIMULATION DER SYNTHETISCHEN NIEDERSCHLAGSZEITREIHEN ... 36
5.1 Generierung der stündlichen Niederschlagsreihen ... 36
5.1.1 Generieren einer Initialzeitreihe ... 36
5.1.2 Erstellen einer Zielfunktion ... 41
5.1.3 Optimierung durch Simulated Annealing ... 42
5.2 Disaggregierung ... 46
5.2.1 Erzeugen einer Reihe von Fünf-Minuten-Werten ... 46
5.2.2 Aufstellen der Zielfunktion ... 46
5.2.3 Optimierung durch Simulated Annealing ... 46
5.3 Anpassung an Kostra ... 49
5.3.1 Überblick ... 49
5.3.2 Ablauf ... 50

6 VERSIONSÜBERSICHT 54
NiedSim 54
NiedSim 2.x 54
NiedSim3 (Version 3.0) 54
7 LITERATURVERZEICHNIS 55
A) ANHANG 56

II. KURZBESCHREIBUNG NIEDSIM3

Das Programmsystem NiedSim3 (Niederschlags-Simulation) ist ein stochastischer Generator, mit dem für einen beliebigen, frei wählbaren Punkt in einer Modellregion Niederschlagszeitreihen erzeugt werden können, deren statistische Eigenschaften denen des natürlichen Niederschlags an diesem Ort entsprechen. NiedSim3 wird mit einer grafischen Benutzeroberfläche bedient, die mit der Programmiersprache Python erstellt ist. Die Zeitreihen werden durch Python- und Fortran-Programme generiert. Das Grundschema der Generierung ist hier kurz zusammengefasst.

DIE DATENBASIS

Das Programmsystem NiedSim3 enthält für alle Rasterpunkte in einer Auflösung von 1 km x 1 km die für die stochastische Generierung von Niederschlägen erforderlichen statistischen Parameter.

Diese Parameter werden aus Messreihen an vorhandenen Messstationen bestimmt und mit Hilfe von External-Drift-Kriging bzw. Ordinary-Kriging auf das Raster übertragen. Einige Parameter werden zur Erzeugung einer Ausgangszeitreihe benötigt (stündliche Verteilungsfunktion, Jahressummen, Poisson-Parameter zum Positionieren großer stündlicher Werte), während andere zur Optimierung der zeitlichen Struktur verwendet werden (Autokorrelationen (gewichtet, unterschiedliche Zeitversätze), Monatssummen, Tagesüberschreitungswahrscheinlichkeiten, Länge von Niederschlagsintervallen und Skalierungsparameter des 1. bis 3. Moments) oder zur nachträglichen Anpassung der Starkregenereignisse genutzt werden (Bemessungsniederschläge nach KOSTRA2000).

GENERIERUNG VON STUNDENWERTEN

Um für einen beliebigen Punkt eine Niederschlagsreihe mit stündlicher Auflösung zu generieren, werden zuerst die zu dem Punkt gehörigen statistischen Parameter aus der NiedSim3-Datenbasis ermittelt. Anschließend erfolgt die Simulation jahresweise in den folgenden Schritten:

1. Eine Zeitreihe für das Jahr in 1h-Auflösung wird erzeugt und alle Niederschlagswerte werden auf 0 mm gesetzt.
2. Mit der stündlichen Verteilungsfunktion (1h-Verteilung) werden so lange stündliche Niederschlagswerte erzeugt und zufällig in der Jahreszeitreihe platziert, bis die jährliche Niederschlagssumme (Jahressumme) erreicht ist.
3. Aus den größten n_{poiss}^{+} stündlichen Niederschlagswerten aller gezogenen stündlichen Werte werden n_{poiss} Niederschlagswerte zufällig ausgewählt und mittels eines Poisson-Prozesses in der Jahreszeitreihe platziert. In der unter 6. beschriebenen Optimierung sind diese n_{poiss} Werte vom Vertauschen der Stundenwerte ausgeschlossen.
4. Die statistischen Parameter der in den Schritten 1 – 3 beschriebenen Erstellung der Ausgangs-Stundenreihe werden berechnet.
5. Die Zielfunktion wird angesetzt, welche die Abweichungen der berechneten statistischen Parameter bzgl. den zu Beginn aus der NiedSim3-Datenbasis für den Punkt ermittelten Statistiken misst.
6. Optimierung der Zielfunktion, das heißt durch zufälliges Vertauschen der Stundenwerte im Rahmen einer Simulated Annealing Optimierung wird die Zielfunktion iterativ minimiert.

DISAGGREGIERUNG AUF FÜNF-MINUTEN-WERTE

Die Fünf-Minuten-Werte werden durch Disaggregierung aus der generierten Stundenreihe gewonnen. Dadurch ist die grundlegende zeitliche Struktur der Reihe bereits festgelegt und es erfolgt nur noch eine Optimierung der Niederschlagsintensitäten innerhalb den jeweiligen Stunden. Das Vorgehen entspricht ungefähr dem der stündlichen Optimierung und gliedert sich in die 5 folgenden Schritte, die jahresweise abgearbeitet werden:

1. Die statistischen Parameter der Fünf-Minuten-Werte werden aus der NiedSim3-Datenbasis ermittelt.
2. Die Werte jeder Stunde werden gleichmäßig auf die zugehörigen Fünf-Minuten-Werte verteilt.
3. Die statistischen Parameter der Fünf-Minuten-Reihe werden berechnet.
4. Die Zielfunktion wird angesetzt, die die Abweichungen der Zeitreihe von den geforderten statistischen Parametern misst.

5. Die Zielfunktion wird optimiert, d. h. die Fünf-Minuten-Werte werden innerhalb jeder Stunde durch Hinzufügen bzw. Abziehen kleiner Niederschlagsinkremente abgeändert und die Zielfunktion dabei durch Simulated Annealing iterativ minimiert.

ANPASSUNG AN KOSTRA

Nach der Disaggregierung werden alle Niederschlagswerte, die zur partiellen Serie unterschiedlicher Dauerstufen beitragen, an die KOSTRA-Starkregenauswertung angepasst. Um den Einfluss der Anpassung auf die zeitliche Struktur möglichst gering zu halten, erfolgt diese Anpassung über eine relative Änderung (Skalierung) einzelner Werte. Um die Jahressumme konstant zu halten, werden diese Änderungen durch Anpassung von Werten vor und nach dem Starkregenereignis ausgeglichen.

1 EINLEITUNG

Niederschlag ist zeitlich und räumlich sehr variabel. Niederschlagsbeobachtungen erfolgen meist an zu wenigen Orten und in zu geringer zeitlicher Auflösung, um diese Variabilität direkt mit Messungen abzubilden. Der Bedarf nach zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Niederschlags-Zeitreihen in der hydrologischen Praxis kann somit nicht durch bestehende Messungen gedeckt werden. Eine gängige Möglichkeit, Ersatz zu schaffen, ist die Nutzung repräsentativer Zeitreihen. Die Übertragbarkeit einer Zeitreihe auf andere Orte ist jedoch nicht immer gewährleistet und unsicher. Die statistischen Eigenschaften des Niederschlags sind hingegen weit weniger variabel als die Niederschlagswerte selbst und können vergleichsweise robust auf andere Orte übertragen werden. Die Nutzung von synthetisch generierten Zeitreihen, die mit Hilfe von interpolierten, statistischen Eigenschaften erzeugt werden, stellt somit eine Alternative zu repräsentativen Reihen dar. Der stochastische **Nieder-schlags-Simulator** (NiedSim) basiert auf einem an der Universität Stuttgart 1998 entwickelten Konzept (Bárdossy, 1998).

In NiedSim werden zunächst aus allen zur Verfügung stehenden Messwerten des Projektgebiets statistische Parameter berechnet und anschließend für das gesamte Projektgebiet regionalisiert, das heißt räumlich interpoliert. Anhand dieser Parameter kann dann für einen beliebigen Punkt innerhalb des Projektgebiets eine künstliche Zeitreihe erzeugt werden, die die Eigenschaften tatsächlich gefallenen Niederschlags möglichst genau nachbildet. Diese synthetische Zeitreihe liefert bei der Verwendung in Abflussmodellen vergleichbare Ergebnisse wie die Verwendung einer gemessenen Niederschlagszeitreihe.

Der Niederschlags-Simulator NiedSim wird seit 2000 in Baden-Württemberg, seit 2003 in Hessen und Rheinland-Pfalz und seit 2009 in Bayern für die stochastische Generierung von kontinuierlichen Niederschlagszeitreihen eingesetzt. Er ist in der Lage, für einen beliebigen Punkt im jeweiligen Bundesland Zeitreihen in einer fünfminütigen zeitlichen Auflösung zu erzeugen.

Im Jahr 2014/15 wurde NiedSim2.x an die vier Bundesländer übergeben. Bei diesem Update wurde die Datengrundlage mit neuen Daten aktualisiert. Außerdem wurde das Pro-

grammsystem zur Steuerung und Verwaltung von ArcView3 auf die Open-Source-Software Python umgestellt.

In den Jahren 2013 – 2016 liefen zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekte (SYNOPSE und SAMUWA), in denen die mit NiedSim generierten Punktzeitreihen weiterentwickelt und mit Kanalnetzsimulationen validiert worden sind (van der Heijden, et al., 2017). Im Rahmen dieser Projekte wurden zahlreiche Änderungen am ursprünglichen Algorithmus vorgenommen (Mosthaf, 2017; Müller, 2017). Die Verbesserungen sind in der aktuellen Version **NiedSim3** implementiert und stehen den Bundesländern in der operationellen Version seit 2017 zur Verfügung.

NiedSim3 basiert auf einer gemeinsamen Datengrundlage der vier Bundesländer. Hierdurch können einheitliche und vergleichbare synthetische Zeitreihen erzeugt werden. Außerdem können Probleme bei der räumlichen Interpolation an den Rändern des Gebiets minimiert werden.

NiedSim3 erzeugt Punktzeitreihen für ein Gitternetz mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km. Die verfügbaren Daten erlauben die Generierung von Zeitreihen zwischen 1961 und 2012[1], was einer maximalen Länge von 52 Jahren für jede Zeitreihe entspricht. Die zeitliche Auflösung ist fünfminütig. Zudem arbeitet NiedSim3 ausschließlich mit Kalenderjahren.

1) Für Rheinland-Pfalz beträgt der Zeitraum 1958 – 2013 und somit 56 Jahre. Im weiteren Verlauf des Berichts wird darauf nicht mehr explizit hingewiesen.

2 ÜBERBLICK PROGRAMMSYSTEM NIEDSIM3

NiedSim3 kann in zwei wesentliche Bereiche unterteilt werden. Diese sind zum einen die zugrunde liegende Datenbank mit den interpolierten Statistiken (Abschnitt **4**) und zum anderen die eigentlichen Generierungsprogramme (Abschnitt **5**). Als Schnittstelle zwischen diesen beiden Teilen und dem Anwender steht in NiedSim3 eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zur Verfügung. Sie übernimmt die Speicherung der Benutzereingaben, die Übergabe an die einzelnen Programmteile und deren Steuerung. Für weitere Informationen wird auf die Bedienungsanleitung verwiesen (Müller, et al., 2017).

Alle Programme bis auf die Optimierung sind in Python geschrieben, die Optimierung ist in Fortran programmiert. Das Programmpaket der operativen Version wurde für die Landesbehörden (Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz) entwickelt, umfasst alle Skripte für die Simulation der Zeitreihen und ist für das jeweilige Bundesland individualisiert. Das heißt, Zeitreihen anderer Bundesländer können nicht generiert werden.

Alle Skripte zur Aufbereitung, Homogenisierung, Zusammenführung und Plausibilisierung der Daten sowie zur Berechnung der Statistiken und deren Regionalisierung verbleiben bei der Universität Stuttgart. Ebenso werden keine Rohdaten an die Behörden weitergegeben, sondern nur regionalisierte (räumlich interpolierte) Statistiken. Über die jeweiligen Landesbehörden können die synthetischen Niederschlagszeitreihen bezogen werden.

3 EINGANGSDATEN

Für NiedSim werden nachfolgende Eingangsdaten benötigt:

3.1 NIEDERSCHLAG

NiedSim basiert auf Punktniederschlagsdaten von unterschiedlichen Messstationen innerhalb des Projektgebietes in verschiedener zeitlicher Auflösung. Um eine bestmögliche räumliche Abdeckung zu erzielen, werden zusätzlich zu den hochaufgelösten Messdaten auch Tagesstationswerte verwendet. Für Tagesstationen liegen in der Regel deutlich längere Reihen in einer höheren räumlichen Dichte vor. NiedSim basiert auf fünfminütigen, stündlichen und täglichen Messdaten, die je nach berechneter Statistik verwendet werden.

3.2 HÖHENMODELL UND RASTERKOORDINATEN

In der NiedSim3 Datenbasis sind alle Kennwerte auf einem quadratischen Raster abgelegt. Das Raster basiert auf einem digitalen Geländemodell der Erdoberfläche (SRTM-Daten), das mit dem Projektgebiet verschnitten wird. Die Rasterweite beträgt 1 km. Die Raumkoordinaten sind als Gauß-Krüger-Koordinaten im jeweiligen Meridianstreifen des Projektgebietes abgelegt (Rheinland-Pfalz GK-2, Baden-Württemberg und Hessen GK-3, Bayern GK-4). Die Einheit ist Meter. Höhenangaben beziehen sich auf Normal Null (NN).

3.3 KOSTRA-STARKREGENAUSWERTUNG

Der KOSTRA2000-Atlas (Malitz, 2005) stellt bundesweit Bemessungsniederschlagshöhen verschiedener Dauerstufen und Jährlichkeiten zur Verfügung. Er basiert auf einer Anpassung von Extremwert-Verteilungen. In NiedSim3 sind aus dem KOSTRA-Atlas ausgelesene Bemessungsniederschläge der Jährlichkeiten 1 Jahr und 100 Jahre in verschiedenen Dauerstufen abgelegt. Aus den hinterlegten Bemessungswerten lässt sich jeder weitere Wert, der im KOSTRA-Atlas gegeben ist, berechnen. In NiedSim3 gehen die KOSTRA-Werte nicht mehr direkt in die Optimierung mit ein. Stattdessen werden die KOSTRA-Werte für eine nachträgliche Anpassung der partiellen Serie der synthetischen Reihe verwendet (Abschnitt 4.6).

4 DATENBANK

Im Folgenden wird die statistische Datengrundlage für die Simulation beschrieben. Dies impliziert die Datenaufbereitung, die Grundlagen zur Berechnung der verwendeten Statistiken, sowie die unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren.

4.1 DATENAUFBEREITUNG

4.1.1 HOMOGENISIERUNG

Ein wesentlicher Aspekt bei der Generierung von Zeitreihen mit NiedSim ist eine homogene Datengrundlage. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Messgeräte die Berechnung der Statistiken wesentlich beeinflussen können (Müller, 2017). Dies betrifft vor allem Statistiken, bei deren Berechnung Reihen hoher zeitlicher Auflösung (fünf Minuten) verwendet werden (z. B. Autokorrelation und die Skalierungsparameter für die Disaggregierung). Aber auch die stündlichen P_0-Wahrscheinlichkeiten und die Nassintervalle werden beeinflusst.

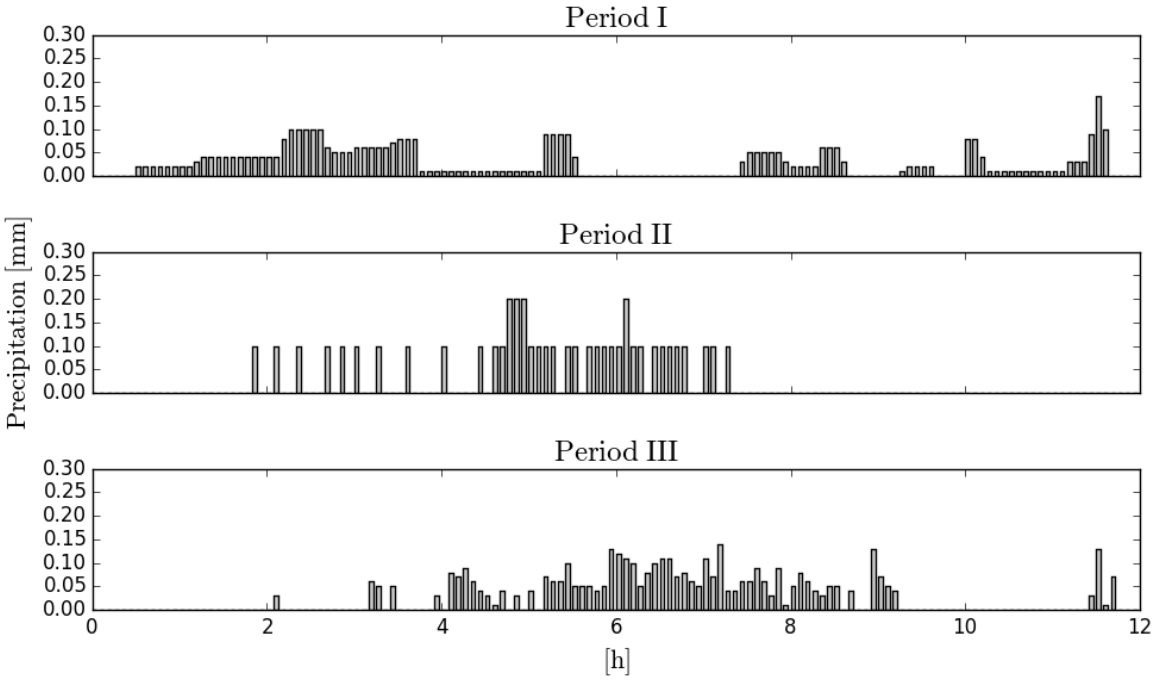


Abbildung 1: Drei Zeitreihen in fünfminütiger Auflösung für verschiedene Zeiträume mit unterschiedlichen Messgeräten. Alle drei Ereignisse zeigen ungefähr die gleiche absolute Niederschlagsmenge, jedoch unterschiedliche zeitliche Intensitätsverläufe (Müller, 2017).

Der NiedSim3 zu Grunde liegende Datensatz lässt sich in drei Zeiträume einteilen (Müller, 2017). Zeitraum I beschreibt einen relativ glatten Intensitätsverlauf, der für nachträglich digitalisierte Bandschreiber charakteristisch ist. Zeitraum II zeigt das typische Muster von Kippwaagen mit diskreten Impulsen von mindestens 0,1 mm. Zeitraum III zeigt den realistischsten Verlauf und spiegelt moderne digitale Waagen oder Tropfenzähler wider. Die systematischen Unterschiede bei der Berechnung einiger Statistiken für die drei Zeiträume können die anschließende Disaggregierung in NiedSim3 beeinflussen. Aus diesem Grund muss für betroffene Statistiken ein homogener Datensatz erstellt werden, der nur Zeitreihen enthält, die die Eigenschaften des Zeitraums III aufweisen.

4.1.2 Filter für hochaufgelöste Zeitreihen

Zeitreihen vor 1990 können in dem für NiedSim3 vorliegenden Datensatz generell digitalisierten Bandschreibern zugeordnet und somit für die Berechnung der Statistiken der Disaggregierung ausgeschlossen werden. Um die Reihen für Zeitreihen nach 1990 zu unterscheiden, wurden zwei verschiedene Filter verwendet.

Der erste Filter nutzt zwei Verfahren, um die Messgeräte zu unterscheiden. Zunächst wird die Eigenschaft verwendet, dass sich die Regenintensität einzelner fünfminütiger Werte zwischen Kipp-Waagen (Zeitraum II) und anderen Messgeräten (Zeitraum I und III) unterscheidet. Die Auflösung bei Kippwaagen beträgt 0,1 mm pro fünf Minuten, wohingegen die Auflösung im anderen Fall kleiner 0,03 mm pro fünf Minuten beträgt. Somit wird ein Monat Zeitraum II (Kipp-Waagen) zugeordnet, wenn weniger als 10 % aller nassen Niederschlagswerte kleiner als 0,1 mm sind.

Die Zeiträume I und III werden über die Länge der Nassintervalle ermittelt, die durch mindestens einen trockenen Fünf-Minuten-Wert getrennt sind. Zeitraum III weist im Vergleich zu Zeitraum I einen inhomogeneren Niederschlagsverlauf auf. Dies spiegelt sich in der Häufigkeitsverteilung der Nassintervalllängen wider (Abbildung 2). Im Zeitraum III kommen Niederschlagsintervalle mit einer Länge von fünf Minuten am häufigsten vor, längere Intervalle (größer zehn mal fünf Minuten) sind kaum vorhanden. Dahingegen treten im Zeitraum I Intervalle mit einer Länge größer als 50 Minuten häufiger auf als Intervalle mit einer Länge von fünf Minuten. Somit kann über einen Vergleich der Häufigkeit von Niederschlagsintervalllän-

gen von fünf Minuten einerseits und einer Länge größer gleich 50 Minuten andererseits die Niederschlagszeitreihe den Zeiträume I und III zugewiesen werden.

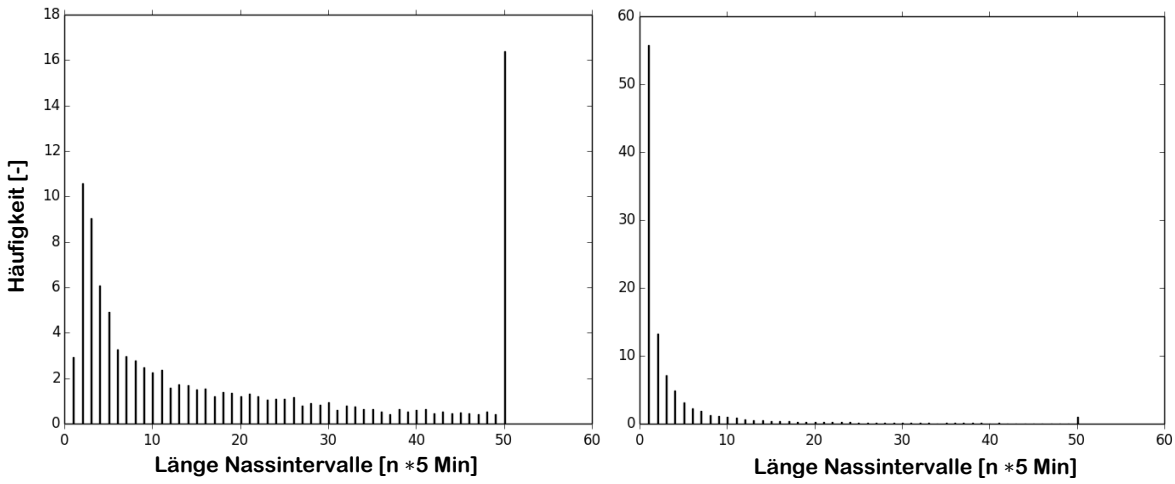


Abbildung 2: Histogramm der Nassintervalllängen einer Station beispielhaft für den Zeitraum I (links) und Zeitraum III (rechts).

Der zweite Filter ordnet die Daten über die Entropie einem Zeitraum zu. Die Entropie wird für jede nasse Stunde einer Station berechnet. Es gilt:

$$H = -\sum_{n=1}^{12}\left[\frac{h_n}{h_{sum}} * \log\left(\frac{h_n}{h_{sum}}\right)\right]$$

mit: H Entropie einer nassen Stunde [–]
h_n Niederschlag eines Fünf-Minuten-Intervalls [mm]
h_{sum} Niederschlag innerhalb der Stunde: $\sum_{n=1}^{12} h_n$ [mm]
n Fünf-Minuten-Intervall innerhalb einer Stunde

Ein Vergleich der Histogramme (relative Häufigkeit) der Entropie der unterschiedlichen Zeiträume zeigt, dass sich diese in den oberen und unteren Bereichen unterscheiden. Für die Zuordnung der Jahre zu den Zeiträumen eignen sich die unterste Klasse (H < 0,5) und die oberste (H > 4). Um Zeitraum II und III zu unterscheiden, werden zusätzlich zwei verschiedene Niederschlagsgrenzwerte verwendet. Das heißt, einerseits wird die Entropie mit allen Werten größer 0 mm (G_1) und andererseits mit allen Werten größer 0,1 mm (G_2) berechnet.

Somit gilt für die beiden betrachteten Entropieklassen:

$$R(0{,}5; G) = \frac{n_{H<0{,}5}}{n_{ges}} \text{ bzw. } R(4; G) = \frac{n_{H\geq 4}}{n_{ges}}$$

mit: R Relative Häufigkeit [–]
$n_{H<0{,}5}$ Anzahl aller Stunden mit H kleiner 0,5 [–]
$n_{H\geq 4}$ Anzahl aller Stunden mit $H \geq 4$ [–]
n_{ges} Anzahl aller Stunden mit H [–]
G Niederschlagsgrenzwert [mm]

Die Zuordnung erfolgt für jede Station jahresweise (siehe Abbildung 3). Mit Hilfe der beiden Grenzwerte und der beiden Entropieklassen werden die Messdaten in die in Tabelle 1 dargestellten Fälle eingeteilt. So können den Stationen und Jahren Zeiträume zugeordnet werden.

Für alle hochaufgelösten Statistiken werden letztendlich nur Zeitreihen verwendet, die mit beiden Filtern in den Zeitraum III eingeordnet werden können.

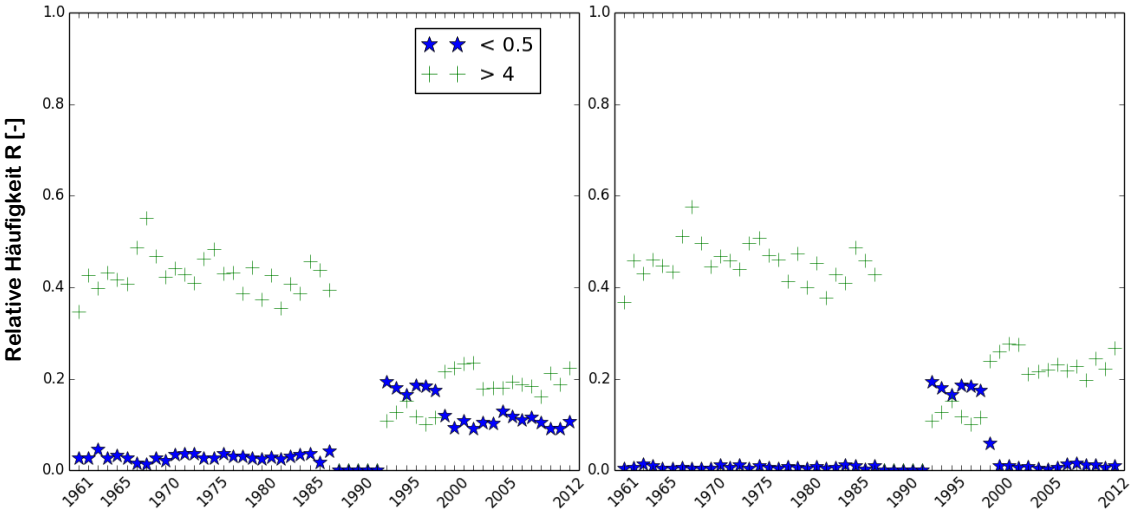


Abbildung 3: Relative Häufigkeiten *R* der Entropie für die Klasse H < 0,5 und H ≥ 4 beispielhaft für die Station Kempten bei einem Niederschlagsgrenzwert G = 0 mm (links) und G = 0.1 mm (rechts).

Tabelle 1 Fallunterscheidung Filter

Fall	Bedingung	Ergebnis
a	$R(0{,}5; 0) < 0{,}08$	Zeitraum I
b	$R(4; 0{,}1) < R(0{,}5; 0{,}1)$	Zeitraum II
c	$R(4; 0{,}1) > R(0{,}5; 0{,}1)$	Zeitraum III

4.1.3 Definition Jahreszeiten

Niederschlag zeigt charakteristische Unterschiede in den statistischen Eigenschaften zwischen Sommer- und Wintermonaten. Im Sommer treten häufiger Konvektivniederschläge auf, welche kurze Dauern und starke Intensitäten aufweisen. Winterniederschläge sind eher durch langanhaltende stratiforme Niederschlagsereignisse geringer Intensität geprägt. Diese Unterschiede werden sowohl bei der Berechnung der Skalierungsparameter als auch bei der stündlichen Verteilungsfunktion beachtet. Für die Skalierungsparameter der Disaggregierung wird in NiedSim3 die halbjährliche Definition aus der vorherigen NiedSim-Version weiterverwendet, d.h. Mai – Oktober und November – April. Bei der stündlichen Verteilungsfunktion wird, um die intensiven, stündlichen Sommerniederschläge besser zu erfassen, die Sommerperiode auf vier Monate verkürzt (Mai bis August). Als Winter werden die anderen acht Monate von September bis April bezeichnet. Um die beiden Verteilungen im Simulated-Annealing der stündlichen Optimierung nicht zu mischen, wird letztere Definition auch hierfür verwendet.

4.2 Regionalisierungsverfahren

Für die Regionalisierung der statistischen Parameter in NiedSim3 werden zwei Regionalisierungsverfahren verwendet, Ordinary-Kriging und External-Drift-Kriging. Wesentliche Erläuterungen zu diesen Verfahren finden sich in Schafmeister (1999), Cressie (1993) und Kitanidis (1997). Der Begriff Regionalisierung bezeichnet die räumliche Interpolation der Parameter von den Messpunkten auf das 1km x 1km NiedSim3-Raster. Bei den Messpunkten handelt es sich um die Orte der Niederschlagsmessstationen.

Eine Grundlage der beiden Kriging-Verfahren ist das sogenannte Variogramm, welches den räumlichen Zusammenhang des jeweils untersuchten Parameters beschreibt. Das empirische Variogramm wird wie folgt aus den Werten des untersuchten Parameters berechnet:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

Dabei steht *h* für ein Distanzintervall (z.B. 2 - 4 km), *n(h)* für die Anzahl an Messstationspaaren, die einen Abstand von *h* aufweisen, x_i für die Position der Station *i* und *z* für den Wert

des zu regionalisierenden Parameters für die Station *i*. An jedes empirische Variogramm wird ein theoretisches Modell angepasst mit dem anschließend das Kriging-Verfahren durchgeführt wird. Die empirischen Variogramme werden dabei für jeden Parameter und jedes Bundesland separat berechnet, da sich die räumlichen Zusammenhänge der Parameter der einzelnen Bundesländer unterscheiden. In Abbildung 4 sind beispielhaft das empirische und theoretische Variogramm der jährlichen Niederschlagssummen in Baden-Württemberg abgebildet. Es zeigt deutlich, dass das Variogramm für zunehmende Distanzen (*h*) höhere Werte aufweist. Dies bedeutet, dass sich die Jahressummen mit zunehmendem Abstand zwischen den Stationen immer weniger ähnlich sind. Bei der Verwendung dieses Variogramms ergeben sich die in Abbildung 5 abgebildeten interpolierten jährlichen Niederschlagssummen beispielhaft für die Jahre 2000 und 2003.

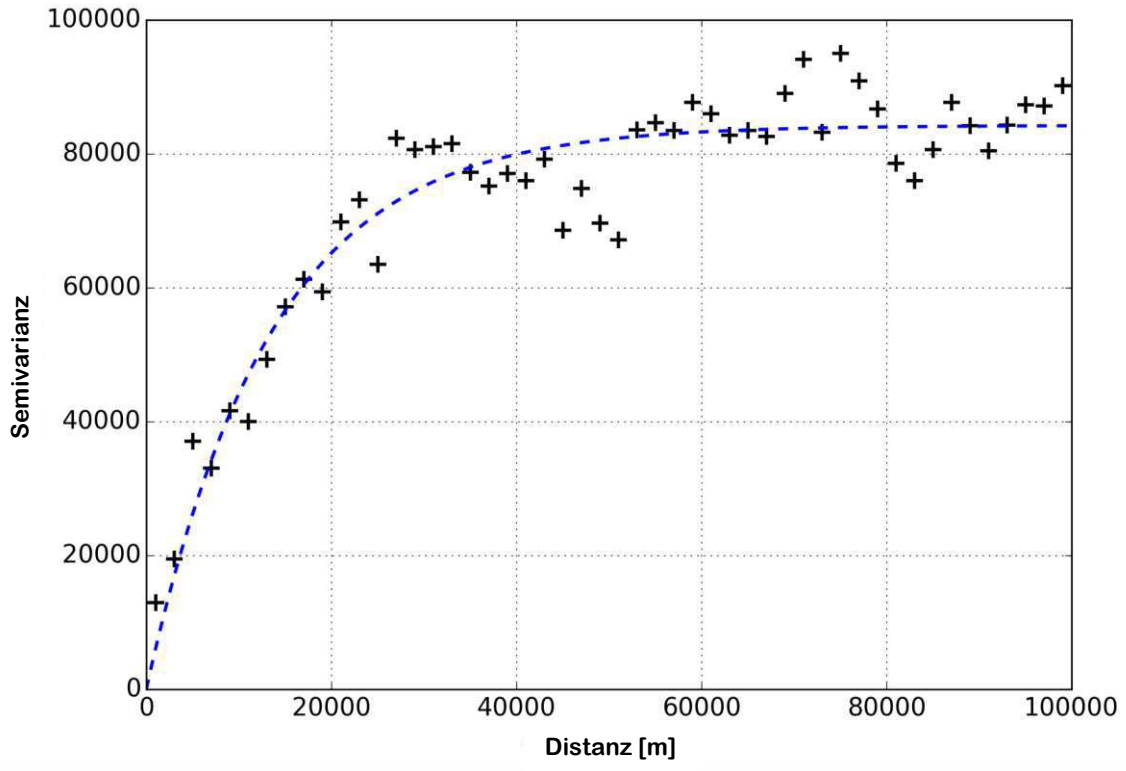


Abbildung 4: Empirisches (+) und theoretisches (--) Variogramm der jährlichen Niederschlagssummen in Baden-Württemberg.

Bei der Verwendung von External-Drift-Kriging werden in NiedSim3 als Drift nicht wie in NiedSim2.x die absoluten Höhen über NN oder deren Wurzel verwendet, sondern ein richtungsgeglättetes Höhenmodell, welches nachfolgend genauer beschrieben wird.

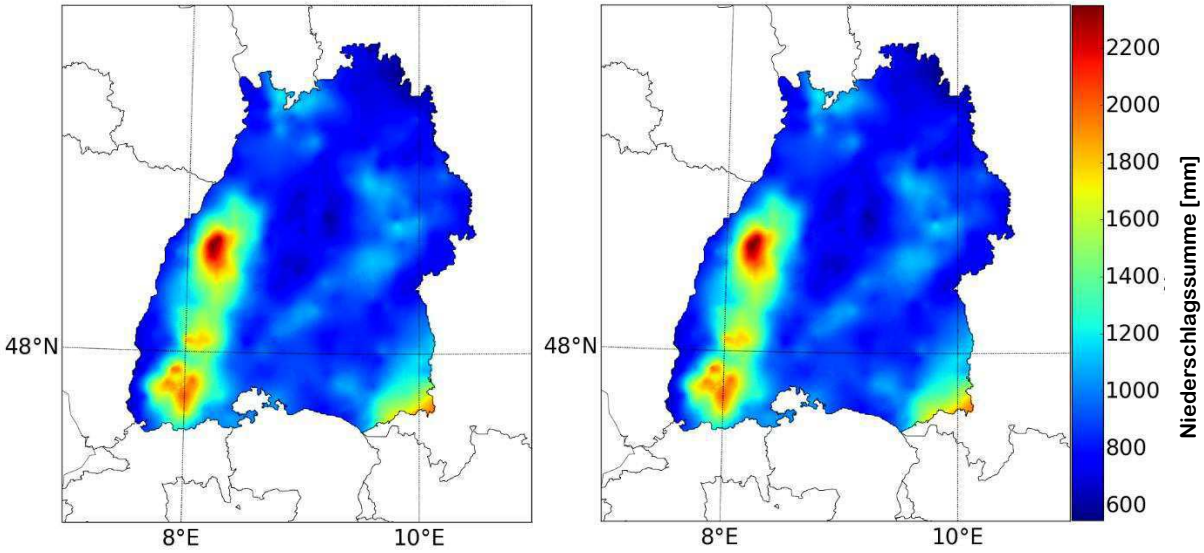


Abbildung 5: Interpolierte jährliche Niederschlagssummen in Baden-Württemberg für die Jahre 2000 (links) und 2003 (rechts).

4.2.1 Richtungsabhängige Glättung eines Höhenmodells

Die Verwendung von absoluten Höhen beim External-Drift-Kriging führt zu einer räumlich sehr fein strukturierten Abbildung des interpolierten Parameters, die der Höhenstruktur sehr ähnlich ist. Dies führt zu kleinräumigen Unterschieden des Parameters, die für Niederschlagsstatistiken nicht realistisch sind. Daher werden in NiedSim3 nur geglättete Höhenmodelle verwendet. Diese verhindern kleinskalige Unterschiede und können zusätzlich den Einfluss der Windrichtung auf den jeweiligen Parameter mitberücksichtigen. Die absolute Höhe *a(x)* wird mit der folgenden Formel zur Höhe $a_s(x)$ geglättet:

$$a_s(x) = \sum_{g=1}^{G} w(x - x_g) \cdot a(x_g)$$

$a_s(x)$	Geglättete Höhe für die Position x [m]
$a(x_g)$	Höhe der umgebenden Gitterpunkte des Höhenmodells [m]
G	Anzahl der Gitterpunkte [–]
w	Gewicht [–]

mit

$$w(x - x_g) = \begin{cases} 0, & wenn\ |x - x_g| > h_s\ \ oder\ \langle v, (x - x_g)\rangle < 0 \\ c_W \cdot \left(1 - \frac{|x - x_g|}{h_s}\right), & andernfalls \end{cases}$$

Wobei x_g die Gitterpunkte des Höhenmodells repräsentiert und G die Anzahl an Gitterpunkten. v repräsentiert einen zweidimensionalen Vektor mit einer Nord-Süd- und Ost-West-Komponente und h_s steht für den Glättungsradius. Die Konstante c_w wird so ausgewählt, dass:

$$\sum_{g=1}^{G} w(x - x_g) = 1$$

Um die optimale Kombination des Vektors v und des Glättungsradius h_s zu finden, wird die Korrelation zwischen der resultierenden geglätteten Höhe und dem untersuchten statistischen Parameter für verschiedene Vektor-Radius-Kombinationen berechnet. Die Kombination mit der höchsten Korrelation bestimmt anschließend das geglättete Höhenmodell, das als Drift für das External-Drift-Kriging verwendet wird. Dabei wird die Vektor-Radius-Kombination jeweils separat für jeden Parameter und jedes Bundesland bestimmt. In Abbildung 6 sind beispielhafte geglättete Höhen für Baden-Württemberg abgebildet.

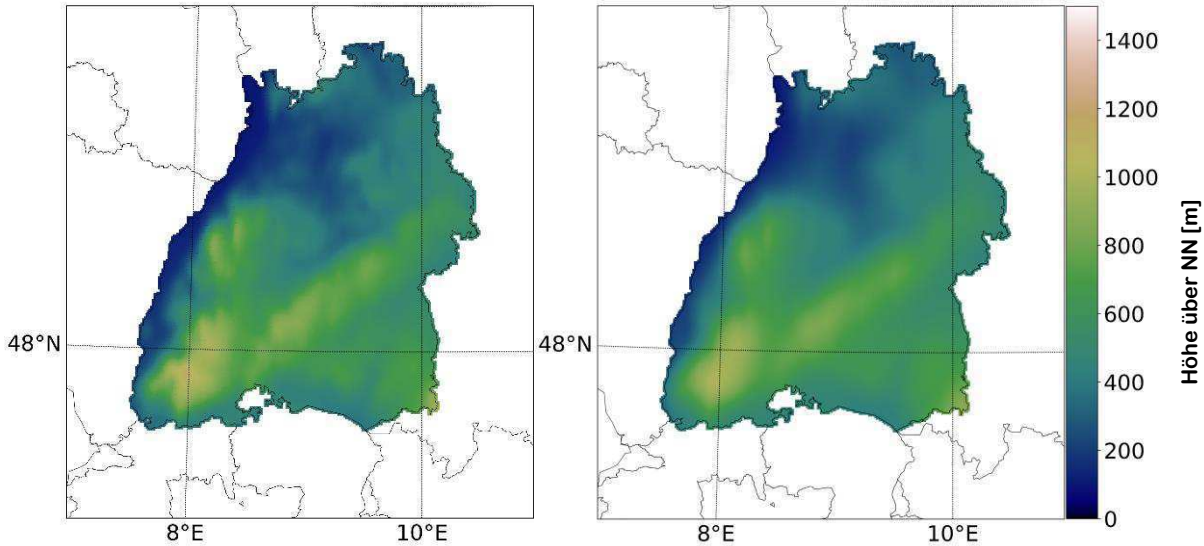


Abbildung 6: Richtungsgeglättete Höhenmodelle für Baden-Württemberg. Der Glättungsvektor zeigt in beiden Fällen in den Westen und der Glättungsradius beträgt 10 km (links) und 20 km (rechts).

4.3 PARAMETER DER INITIALZEITREIHE

4.3.1 STÜNDLICHE VERTEILUNGSFUNKTION

Die Verteilungsfunktion von stündlichen Niederschlagsdaten bildet die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der verschiedenen Niederschlagsintensitäten (mm/h) an einer Messstation ab. Um eine Extrapolation über gemessene Niederschlagsintensitäten zu ermöglichen und diese Verteilungsfunktionen räumlich interpolieren zu können, muss zunächst ein theoretisches Modell an die empirischen Verteilungsfunktionen angepasst werden. Bei der Anpassung des theoretischen Modells werden nur Niederschlagsintensitäten berücksichtigt, die eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Perzentil) von mindestens 95 % aufweisen, also die größeren Niederschlagsintensitäten, die in 5 % der Stunden auftreten. Dies hat zwei Gründe: Erstens sind diese hohen Niederschlagswerte für einen Großteil des Niederschlagsvolumens verantwortlich (z.B. in Baden-Württemberg im Mittel für ca. 85 % des Niederschlagsvolumens). Zweitens weisen geringe Niederschlagshöhen sehr hohe relative Messfehler auf und stören die Anpassung eines theoretischen Modells erheblich. Die Niederschlagswerte zwischen dem 95 % Perzentil und dem Perzentil für 0 mm Niederschlag (P_0) werden durch eine zwischeninterpolierte Exponentialverteilung abgebildet.

4.3.1.1 > 95 % PERZENTIL

Zweck: Die Verteilungsfunktion für Niederschlagsintensitäten mit einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von mind. 95 % wird für das Erzeugen der Initialzeitreihe verwendet. Diese Werte stellen den wichtigsten Teil der stündlichen Niederschlagsverteilung dar.

Berechnung: Als theoretisches Modell für die Anpassung an die empirische Verteilung von stündlichen Niederschlagsintensitäten wird ein nicht-parametrischer Ansatz verwendet. Der verwendete nicht-parametrische Ansatz bietet den Vorteil, dass keine theoretische Verteilung vorher ausgewählt werden muss. Es muss nur eine Kerndichtefunktion gewählt und deren Kernbreite bestimmt werden. Daher werden nicht-parametrische Verteilungsfunktionen als flexibler im Vergleich zu parametrischen Verteilungsfunktionen (z.B. der Gamma-Verteilung) angesehen. Eine Kerndichtefunktion ist selbst eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (kurz: Dichtefunktion), die über jedem Messwert platziert wird und deren Varianz

von der Kernbreite bestimmt wird (Bowman, et al., 1997). Die Dichtefunktion zu Niederschlagsintensitäten einer Messstation wird anschließend durch lineare Superposition dieser einzelnen Kerndichtefunktionen bestimmt (Peel, et al., 2008):

$$f(z) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K(x - x_i; h)$$

Dabei ist *n* die Anzahl der Messwerte pro Station, *K* die Kerndichtefunktion, *h* die Kernbreite, *x* sind die Stützstellen und x_i die gemessenen stündlichen Niederschlagswerte. Um aus der Dichtefunktion eine kumulative Verteilungsfunktion zu erstellen, wird die Dichtefunktion numerisch integriert. Um dem rechtsschiefen Charakter von Verteilungen stündlicher Niederschlagsintensitäten Rechnung zu tragen, werden die Niederschlagswerte zunächst logarithmiert. Anschließend wird ein Gauß-Kern verwendet, um die Dichtefunktion zu bestimmen.

Für die räumliche Interpolation der nicht-parametrischen Verteilungen wurde eine neue Regionalisierungsmethode entwickelt (Mosthaf, et al., 2017), da nicht-parametrische Verteilungen im Gegensatz zu parametrischen Verteilungen keine Parameter aufweisen, die direkt regionalisiert werden können. Vereinfacht lässt sich diese Regionalisierungsmethode als Ordinary-Kriging mit ausschließlich positiven Interpolationsgewichten beschreiben. Zusätzlich zu stündlichen Niederschlagsintensitäten an Messstationen, die hochaufgelöste Niederschlagsdaten aufweisen, werden tageswertskalierte stündliche Niederschlagsintensitäten an Tagesstationen verwendet. Dazu werden die stündlichen Niederschlagswerte der nächstgelegenen hochauflösenden Nachbarstation auf die Tagesstation übertragen und mit den täglichen Niederschlagssummen so tagesweise skaliert (mit einer Konstante *r* multipliziert), dass die tägliche Niederschlagssumme am betreffenden Ort eingehalten wird (Mosthaf, et al., 2017). Dieses Skalierungsverfahren ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

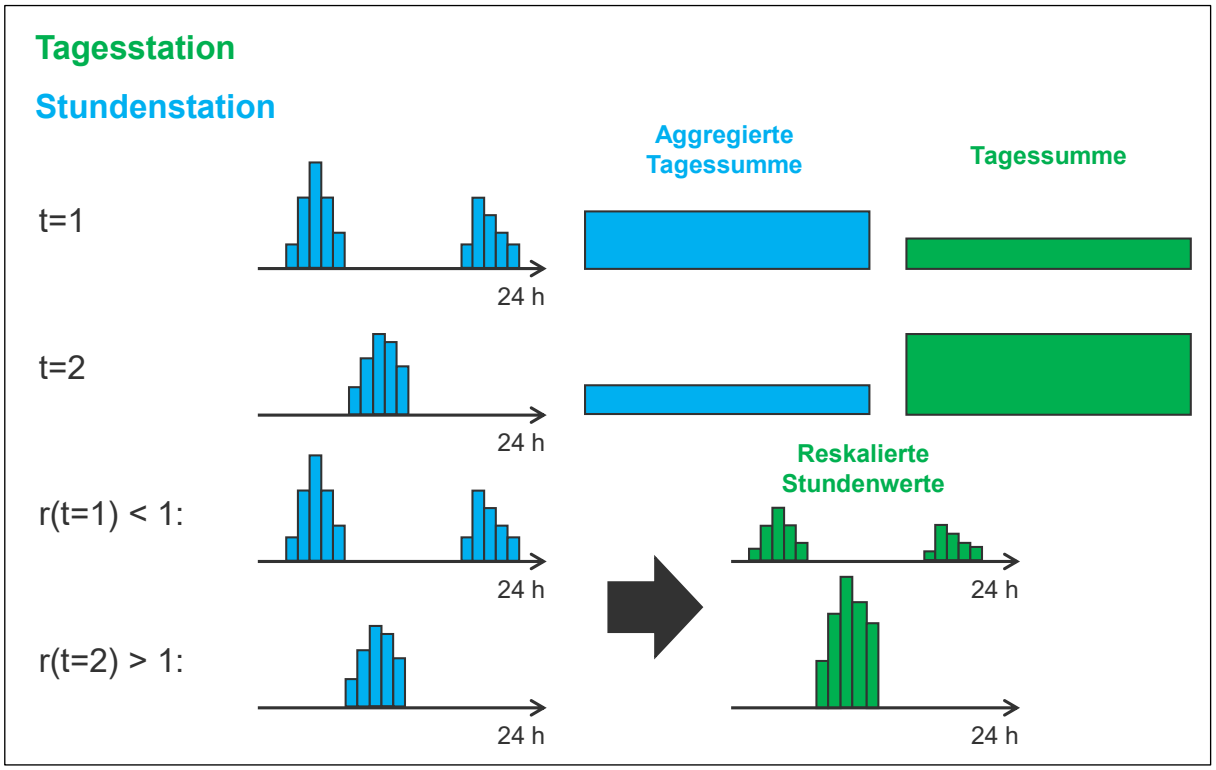


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Übertragung und Skalierung von Stundenzeitreihen auf nächstgelegene Tagesstationen. Beispielhaft werden zwei Tage dargestellt, bei der die Stundenzeitreihe für t = 1 verkleinert (r < 1) bzw. für t = 2 vergrößert (r > 1) wird.

Die Anpassung einer nicht-parametrischen Verteilung an stündliche Niederschlagsintensitäten und deren räumliche Interpolation wird zudem für Winter (September bis April) und Sommer (Mai bis August) getrennt durchgeführt. Es werden dabei nur Messstationen berücksichtigt, die für die beiden Jahreszeiten mindestens 7 Jahre an Messdaten unabhängig vom Zeitraum aufweisen.

4.3.1.2 P_0-Wahrscheinlichkeit

Zweck: Notwendiger Wert, um die stündliche Verteilungsfunktion vollständig abzubilden.

Berechnung: P_0 beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Stunde kein Niederschlag auftritt. Sie wird mit folgender empirischer Häufigkeit abgeschätzt:

$$P_0 = \frac{n_{H=0}}{n_H}$$

Mit: P_0 Wahrscheinlichkeit einer trockenen Stunde [–]
$n_{H=0}$ Anzahl stündlicher Werte *H* gleich Null [–]
n_H Anzahl stündlicher Werte *H* [–]

P_0 wird über den kompletten Zeitraum berechnet (nicht monatlich oder jährlich). Für die Berechnung werden nur Reihen des neuen Zeitraums III (siehe Kapitel 4.1.2) verwendet, da unterschiedliche Zeiträume die P_0-Wahrscheinlichkeit beeinflussen. P_0 wird für Sommer und Winter getrennt berechnet. Es werden nur Monate mit einbezogen, in denen weniger als 10 % Fehlwerte auftreten. Sollten in diesen Monaten weitere Fehlwerte vorhanden sein, werden diese für die Berechnung ausgeschlossen. Die Interpolation erfolgt mit Ordinary-Kriging.

4.3.1.3 > P_0 UND < 95 % PERZENTIL

Zweck: Notwendiger Wert, um die stündliche Verteilungsfunktion vollständig abzubilden.

Berechnung: An die Verteilung stündlicher Niederschlagsintensitäten mit einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit zwischen P_0 und 95 % wird kein theoretisches Modell angepasst. Die Verteilung wird direkt für den jeweiligen Gitterpunkt aus dem interpolierten P_0 und der interpolierten stündlichen Niederschlagsintensität N_{95} für das 95 % Perzentil (die von Gitterpunkt zu Gitterpunkt unterschiedlich ist) berechnet. Bei Verwendung der Exponentialverteilung ergibt sich für den Parameter λ der Exponentialverteilung der folgende Wert:

$$\lambda = \frac{-\ln(1 + P_0 - 0.95)}{N_{95}}$$

Der in die folgende Verteilungsfunktion eingesetzt wird,

$$F(x) = P_0 + (1 - \exp(\lambda * N_{95}))$$

um stündliche Niederschlagsintensitäten zwischen P_0 und dem 95 % Perzentil abzubilden. In Abbildung 8 ist die gesamte Verteilung stündlicher Niederschlagsintensitäten (3 Teile: [P_0] + [> P_0 und < 95 % Perzentil] + [> 95 % Perzentil]) an einem Gitterpunkt abgebildet, die beispielhaft bei der Erstellung einer Initialzeitreihe erzeugt wurde.

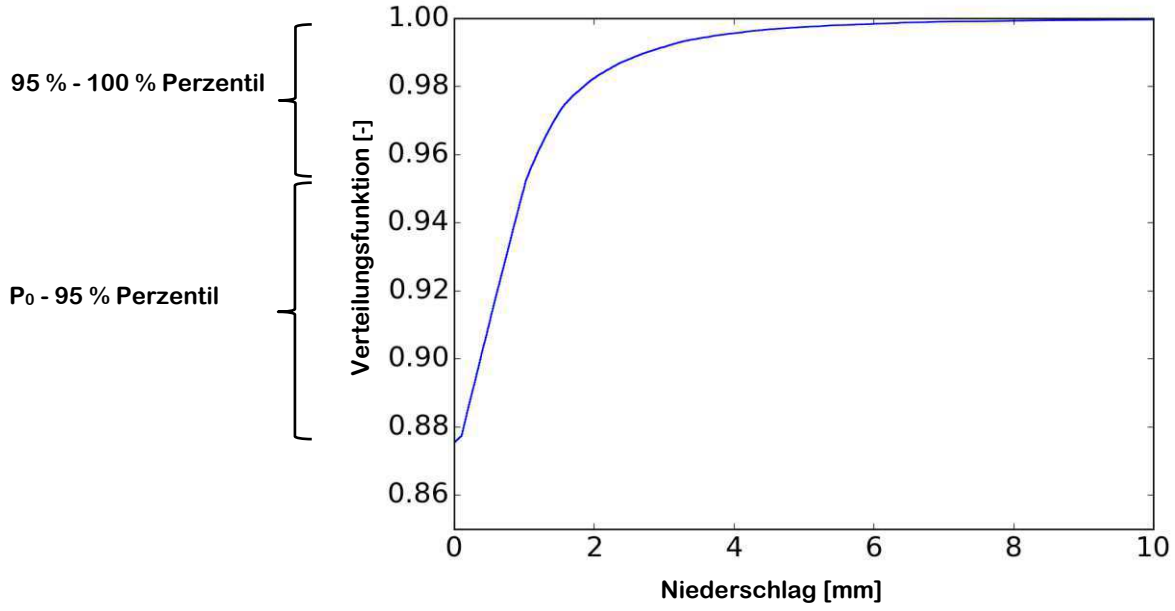


Abbildung 8: Verteilung stündlicher Niederschlagsintensitäten

4.3.2 JAHRESSUMMEN

Zweck: Die Jahressummen (jährliche Niederschlagssummen) werden für das Erzeugen der Initialzeitreihe verwendet, um die jährliche Niederschlagsmenge abzubilden. Die Jahressummen bestimmen, wie viel Niederschlagsvolumen für die Zeitreihe innerhalb eines Jahres zur Verfügung steht.

Berechnung: Die Jahressummen könnten aus den Monatssummen, die in die stündliche Optimierung eingehen, berechnet werden. Allerdings ist eine Regionalisierung der Jahressummen deutlich robuster als die Summe der regionalisierten Einzelmonate. Die Jahressummen werden jahresweise aus den Tagesstationsdaten des kompletten Zeitraums berechnet. Die Regionalisierung erfolgt mit External-Drift-Kriging und einem geglätteten Höhenmodell, das für jedes Bundesland angepasst wird.

4.3.3 POISSON PARAMETER

Zweck: Große stündliche Niederschlagswerte werden vor der Optimierung der Zeitreihe fest in dieser mit Hilfe eines Poisson-Prozesses positioniert. Dies verhindert ein Zusammenballen großer Werte in der Optimierung. Außerdem spiegelt er das verstärkte Auftreten konvektiver Starkregenereignisse im Sommer wider.

Berechnung: Es zeigt sich, dass die größten stündlichen Niederschlagswerte nicht zufällig im Jahr auftreten, sondern vor allem in den Sommermonaten bedingt durch konvektive Regenereignisse. Diese Auftrittswahrscheinlichkeit wird in NiedSim3 mit einem Poisson-Prozess beschrieben (Müller, 2017). Ein Poisson-Prozess beschreibt einen Zufallsprozess bei dem die Anzahl an Ereignissen innerhalb eines Zeitraums Poisson-verteilt und deren Zwischenzeiten exponentialverteilt sind.

Der Poisson-Prozess ist in NiedSim3 so implementiert, dass in jeden Monat eine mittlere Anzahl an großen Werten n_{poiss} fest in der Zeitreihe gesetzt wird (siehe Abschnitt 5.1.1), wobei die Abhängigkeit von der Jahreszeit und von den monatlichen Niederschlagssummen berücksichtigt wird. Letzteres trägt dem Rechnung, dass in trockenen Monaten weniger Niederschlagswerte als in nassen Monaten gesetzt werden, da die Auftrittswahrscheinlichkeit von großen stündlichen Niederschlägen von der Monatssumme abhängt. Außerdem kann dadurch verhindert werden, dass in Monaten mit sehr geringen Niederschlagsmengen große stündliche Werte platziert werden.

Um diesen Zusammenhang darzustellen, wird folgendermaßen vorgegangen: Für jede Station und jedes Jahr wird das monatliche Auftreten der größten Stundenniederschlagswerte pro Jahr gezählt (absolute Häufigkeit pro Monat n_{poiss}) und diese Häufigkeit gegenüber dem jeweiligen Monatsniederschlag H_m aufgetragen. Die Anzahl n_{poiss} wird dabei indirekt über die Niederschlagssumme definiert. In NiedSim3 werden alle Werte größer als 4 mm verwendet, was im Schnitt $n_{poiss} \approx 23$ größte Werte pro Jahr entspricht. Abbildung 9 zeigt diesen empirischen Zusammenhang aller stündlichen Daten der Messstationen der vier Bundesländer. Hierbei wurden nur Stationen mit mindestens 5 Jahren und höchstens 3 % Fehlwerten pro Jahr verwendet. Eine Zunahme der Anzahl großer Werte pro Monat mit steigender Monatssumme sowie in den Sommermonaten ist in Abbildung 9 deutlich erkennbar.

Dieser Zusammenhang ist unabhängig von der Höhe und weist keine räumliche Korrelation auf (Müller, 2017). Eine Regionalisierung wird in NiedSim3 daher nicht vorgenommen, sondern der vollständige Datensatz aller vier Bundesländer für die nachfolgend beschriebene Anpassung verwendet, um eine möglichst robuste Parameterschätzung durchzuführen.

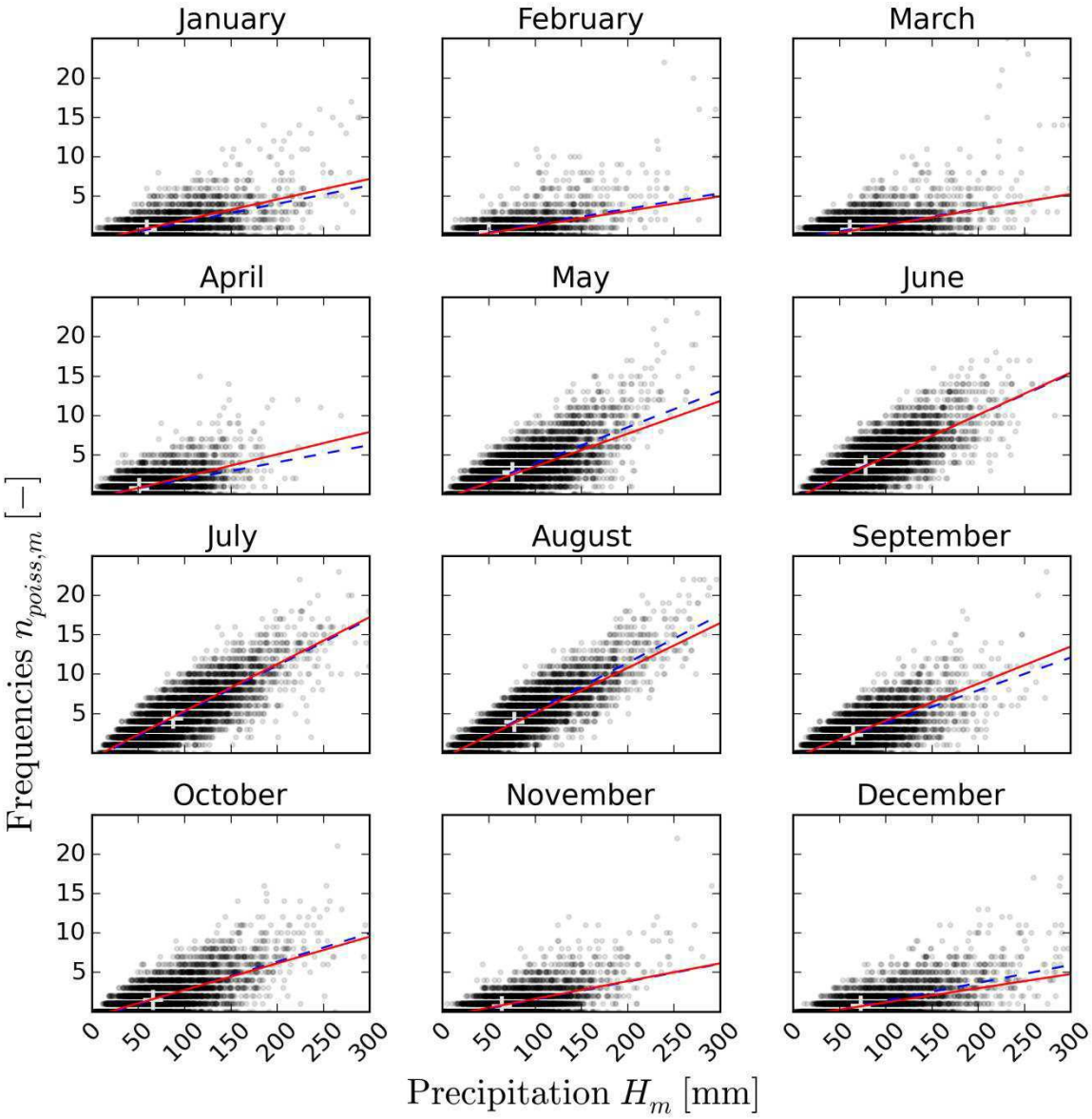


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Auftrittshäufigkeit für Niederschlagswerte > 4 mm pro Monat ($n_{poiss,m}$) und monatlicher Niederschlagssumme (H_m). Die blau gestrichelten Geraden entsprechen den linearen Regressionsgeraden der Messdaten. Die roten, durchgezogenen Linien stellen die final angepassten Geraden mit einem mittleren monatlichem Y-Achsenabschnitt und einer sich im Jahresverlauf sinusförmig ändernden Steigung dar. Bildquelle: (Müller, 2017).

Um diesen Zusammenhang in der Niederschlagsgenerierung abzubilden, wird für jeden Monat eine lineare Regressionsgerade zwischen Häufigkeiten ($n_{poiss,m}$) und Monatssumme (H_m) angepasst:

$$\lambda_m = n_{poiss,m} = a_m + b_m * H_m$$

Mit: a_m Achsenabschnitt des Monats m [–]
b_m Steigung des Monats m [–]
λ_m Parameter des Poisson-Prozesses des Monats m [–]

Um die diskreten monatlichen Sprünge in den Geraden zu reduzieren, wird eine Sinus-Kurve an den jahreszeitlichen Verlauf für die Steigung der Geraden $b(t_i)$ entsprechend folgender Gleichung angepasst:

$$b(t_i) = a * sin(b(t_i - c)) + d$$

Mit: a, b, c, d Parameter der allgemeinen Sinusfunktion [–]
t_i Zeitpunkt innerhalb eines Jahres in stündlicher Auflösung [–]

Für den Y-Achsenabschnitt wird der mittlere Achsenabschnitt $\bar{a}$ aller Monate verwendet.

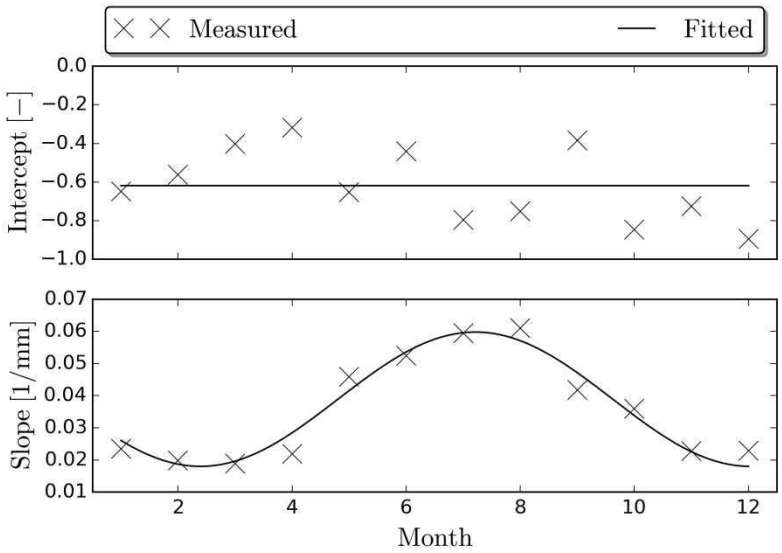


Abbildung 10: Steigung a_m (Slope) und Y-Achsenabschnitt b_m (Intercept) der linearen Regression von Messdaten sowie die angepasste Sinuskurve für die kontinuierliche Repräsentation der Steigung $b(t_i)$. Bildquelle: (Müller, 2017).

Mit Hilfe der über die Parameter der Sinusfunktion berechneten Steigung $b(t_i)$ sowie des mittleren Y-Achsenabschnitts $\bar{a}$ kann der für den Poisson-Prozess benötigte Parameter $\lambda(t_i)$ für jeden Zeitpunkt im Jahr in Abhängigkeit von der Monatssumme H_m nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\lambda(t_i) = \bar{a} + b(t_i) * H_m$$

Da sich die mittleren Zwischenzeiten in Zeiträumen von einigen Tagen bewegen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Stundenwerte innerhalb eines Ereignisses auftreten, sehr gering. In den gemessenen Zeiträumen kommt dies jedoch häufiger vor, wodurch Starkregenereignisse auf höheren Aggregierungen in den synthetischen Zeitreihen unterschätzt würden. Aus diesem Grund wird der beschriebene Poisson-Prozess dahingegen abgeändert, dass die Anzahl der gesetzten Werte n_{poiss} und somit der Parameter λ sowie die Positionen innerhalb der Zeitreihe gleich bleiben, die gesetzten Werte jedoch nicht mehr die größten sein müssen. Hierfür werden zu den größten Stundenwerten einige nächst größere hinzugefügt und aus diesem vergrößerten Datensatz n^{+}_{poiss} zufällig n_{poiss} Werte gezogen. Diese werden letztendlich in der Reihe positioniert (Müller, 2017).

$$n^{+}_{poiss} = n_{poiss} + n_{poiss}(1 - P_I)$$

Der Faktor P_I, um den der potentielle Datensatz vergrößert wird, wird empirisch über den Anteil an Niederschlagsereignissen bestimmt, in denen mehr als ein größter Stundenwert auftritt.

Die notwendigen Parameter für die Erstellung der Ausgangszeitreihe, d. h. die Parameter der Sinusfunktion (a, b, c, b), und die Wahrscheinlichkeit unabhängiger Werte (P_I) sind in der Datei *Poisson_Parameter.dat* abgelegt.

4.4 Parameter der stündlichen Optimierungsfunktion

Die nachfolgenden Parameter werden zur Herstellung einer realistischen zeitlichen Struktur der Stundenwerte verwendet und in der Optimierung zeitgleich optimiert.

4.4.1 Monatliche Niederschlagssummen

Zweck: Die monatlichen Niederschlagssummen dienen dazu, die jährliche Niederschlagssumme realistisch auf die einzelnen Monate zu verteilen. Hierbei wird ein natürlicher Jahresgang erzeugt und unrealistisch große Niederschlagssummen innerhalb eines Monats verhindert.

Berechnung: Für die Grundlage der Monatssummen werden Tagesdaten verwendet, da diese die beste räumliche Abdeckung aufweisen. An jeder Tagesmessstation werden die monatlichen Niederschlagssummen durch Aufsummieren für den kompletten Zeitraum von 1961 bis 2012 berechnet. Fehlwerte werden als Null interpretiert. Die Regionalisierung erfolgt durch External-Drift-Kriging mit einem geglätteten Höhenmodell.

Auf Grund der Interpolation müssen die Summen der einzelnen Monate nicht der interpolierten Jahressumme (Abschnitt 4.3.2) entsprechen. Um eine Konsistenz in der Optimierung zu gewährleisten, werden die Monatssummen vor der Optimierung skaliert, sodass ihre Summen mit den interpolierten Jahressummen übereinstimmen.

4.4.2 Überschreitungswahrscheinlichkeiten (täglich)

Zweck: Der Parameter Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0 mm/Tag verhindert Tage mit sehr geringen Niederschlagssummen (synthetisches Nieseln). Die Niederschlagshöhen 1 mm und 5 mm geben eine grobe Verteilung der Tageswerte vor, d. h. Rahmenbedingungen für die zeitliche Struktur der hochaufgelösten Zeitreihe.

Berechnung: Für die Niederschlagshöhen von 0 mm, 1 mm und 5 mm werden aus der Zeitreihe aller Tagestationswerte die empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet. Fehlwerte werden aus der Berechnung herausgenommen. Es werden nur Jahre verwendet, in denen mindestens 50% aller Werte vorhanden sind. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten werden mit Ordinary-Kriging und External-Drift-Kriging je nach Niederschlagshöhe und Bundesland regionalisiert.

4.4.3 AUTOKORRELATION

Zweck: Die Autokorrelation beschreibt den Zusammenhang aufeinanderfolgender Werte unterschiedlicher Aggregierungen. Sie ist ein wesentlicher Bestandteil zur Beschreibung der hochaufgelösten zeitlichen Struktur in NiedSim3.

Berechnung: Aus den stündlichen Niederschlagsdaten wird für die Aggregierungsstufen 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h die jährliche Autokorrelation berechnet. Die Autokorrelation beschreibt die Korrelation einer Zeitreihe mit sich selbst unter Berücksichtigung eines zeitlichen Abstands. Diese Korrelation kann nicht nur zum jeweils nächsten Wert berechnet werden, sondern auch zum übernächsten Wert oder zu Werten mit Abstand *k* in der Zeitreihe. Den Abstand zwischen den Werten bezeichnet man als *Lag.* Für die Generierung in NiedSim3 wird nur das Lag *k* = 1 verwendet.

Um den schwächeren Zusammenhang im Sommer (größere Anzahl konvektiver Ereignisse) und den stärkeren Zusammengang im Winter (eher durch stratiforme Ereignisse geprägt) widerzuspiegeln, wird ergänzend für jedes Jahr die gewichtete Autokorrelation bestimmt. Die Autokorrelation und die gewichtete Autokorrelation berechnen sich nach der folgenden Gleichung:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{n-k}\big(w(i) * (x_i - \bar{x})\big)\big(w(i+k) * (x_{i+k} - \bar{x})\big)}{\sum_{i=1}^{n} w(i) * (x_i - \bar{x})}$$

Mit: k Lag [h]
$w(i)$ Gewichtsfunktion, w(i) = 1 ergibt die Autokorrelation ohne Gewichtung [–]

In NiedSim3 geht die Autokorrelation sowohl mit als auch ohne Gewichtung ein. Als Gewicht wird eine jahresperiodische Sinus-Funktion gewählt, die den Wintermonaten ein höheres und den Sommermonaten ein niedrigeres Gewicht zuordnet. Abbildung 12 zeigt den Verlauf dieser Funktion, beschrieben wird sie durch die folgende Gleichung:

$$w(i) = 1 + \sin\left(\left(\frac{i}{I} + \frac{1}{6}\right) \cdot 2\pi\right)$$

Mit: i Index des Fünf-Minuten-Wertes im Jahr [–]
I Gesamtzahl der Werte pro Jahr [–]

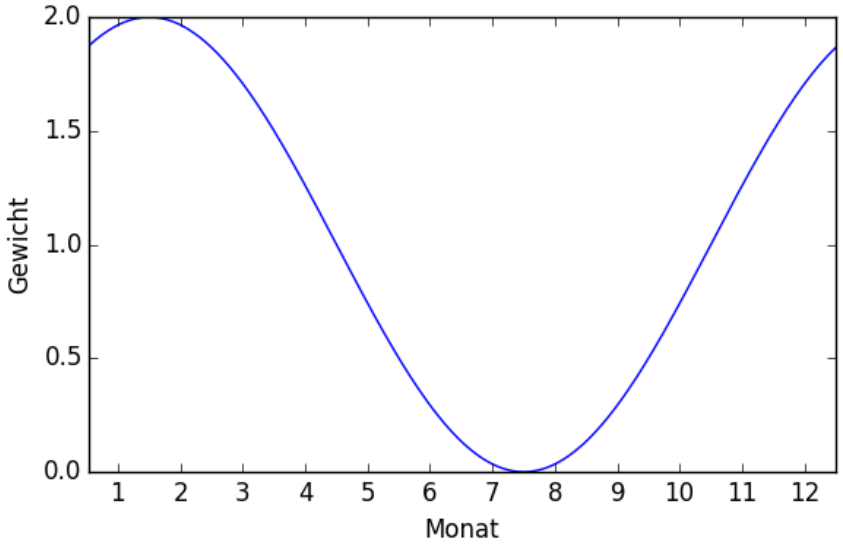


Abbildung 11: Gewichte der Autokorrelation bei der Disaggregierung in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Wird die gewichtete Autokorrelation entsprechend der obigen Sinusfunktion berechnet, sind die Korrelationswerte im Vergleich zu den Autokorrelationswerten ohne Gewichtung größer. Würde die Sinusfunktion um eine viertel Periodenlänge verschoben, das heißt, lägen die größeren Gewichte im Sommer, wären die gewichteten Autokorrelationswerte kleiner als ohne Gewichtung. Es zeigt sich, dass die Korrelationen in der stündlichen Optimierung besser optimiert werden können, wenn die gewichtete Autokorrelation größer ist und die Gewichtung somit auf dem Winter liegt.

Bei der Berechnung der Autokorrelation und der gewichteten Autokorrelation werden nur Stationen mit einer Länge von mindestens 5 Jahren berücksichtigt, wobei eine Datenverfügbarkeit von mindestens drei Monaten im Jahr mit mindestens 90 % an gültigen Werten Voraussetzung ist. Darüber hinaus vorhandene Fehlwerte werden als Null interpretiert.

Autokorrelation und gewichtete Autokorrelation werden nicht jahresweise regionalisiert, da die Stationsdichte in manchen Jahren sehr gering ist. Stattdessen werden die Mittelwerte und Standardabweichungen aller Jahre stationsweise berechnet und anschließend mit Ordinary-Kriging regionalisiert.

4.4.4 Häufigkeitsverteilung der Länge der Niederschlagsintervalle

Zweck: Um das Verhältnis zwischen kurzen und langen Niederschlagsereignissen abzubilden, wird die Häufigkeitsverteilung der Länge der Niederschlagsintervalle optimiert. Ohne diese zusätzliche Optimierung entstehen zu viele kurze und zu wenig lange Ereignisse.

Berechnung: Für die Optimierung der Ereignislängen muss zunächst ein Niederschlagsereignis definiert werden. Dies ist jedoch weder trivial noch eindeutig in der Literatur definiert (Dunkerley, 2008). In NiedSim3 werden Niederschlagsintervalle auf stündlicher Basis festgelegt. Als Intervall werden alle aufeinanderfolgenden Niederschlagswerte größer Null bezeichnet, die durch mindestens eine trockene Stunde getrennt sind. Anschließend wird die mittlere Häufigkeit der Intervalllänge pro Jahr berechnet. Hierfür werden die diskreten Klassen [1, 2, …, 24 h] verwendet. Alle Intervalllängen größer als 24 h werden in die letzte Klasse aufgenommen.

Für die Berechnung der Verteilung werden stündliche Messdaten verwendet. Diese werden aus den hochaufgelösten Messstationen des neuen Zeitraums (Filter, siehe Abschnitt 4.1.2) aggregiert, da Zeitreihen von analogen Messgeräten, die nachträglich digitalisiert wurden, die stündlichen Intervalllängen systematisch beeinflussen. Weiterhin werden nur Stationen mit mindestens fünf Jahren an Daten sowie weniger als 10 % Fehlwerten genutzt. Ist diese Bedingung erfüllt, werden zusätzliche Fehlwerte als Null interpretiert. Die mittleren jährlichen absoluten Häufigkeiten pro Station werden in relative Häufigkeiten umgerechnet. Für die Häufigkeitsverteilungen wird lediglich der Mittelwert pro Klasse über alle Stationen berechnet, da eine Interpolation kaum Verbesserungen bringt, jedoch eine relativ große Unsicherheit aufweist.

4.5 Parameter der Disaggregierung

4.5.1 Autokorrelation

Zweck: Wie in der stündlichen Optimierung dient die Autokorrelation einer realistischen Abbildung der Struktur von aufeinanderfolgenden Niederschlagswerten.

Berechnung: Für die Disaggregierung wird nur die gewichtete Autokorrelation mit den Aggregierungen 5, 10, 15, 30, 45, 60 min für die Lags k = 1 und k = 2 verwendet. Im Gegensatz zur stündlichen Optimierung wird die Autokorrelation in der Disaggregierung besser optimiert, wenn das Gewicht auf den Sommermonaten liegt (Abbildung 11):

$$w(i) = 1 + \sin\left(\left(\frac{i}{I} + \frac{1}{6}\right) \cdot 2\pi + \pi\right)$$

Mit: i Index des Stundenwertes im Jahr [–]
I Gesamtzahl der Werte pro Jahr [–]

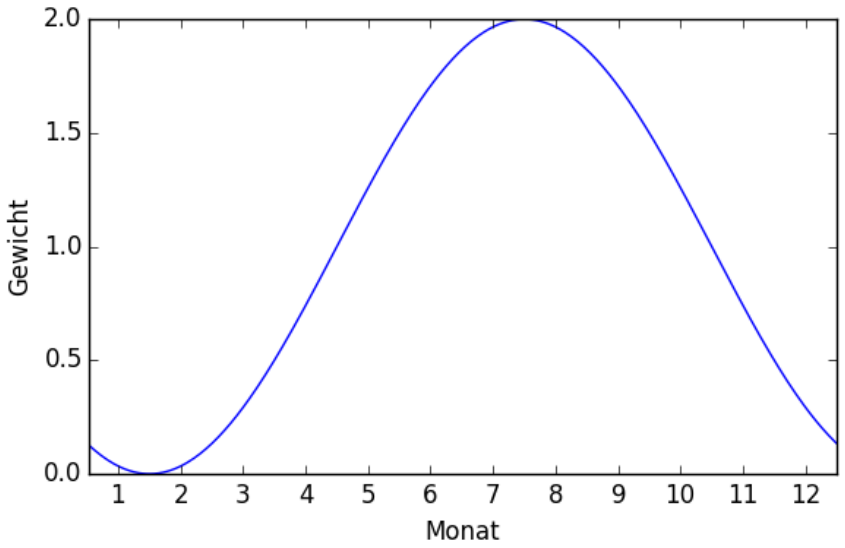


Abbildung 12: Gewichte der Autokorrelation bei der Optimierung in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Für die Berechnung werden nur Fünf-Minuten-Messdaten verwendet, die mit Hilfe des Filters (Abschnitt 4.1.2) ausgewählt werden. Fehlwerte sind zu Null gesetzt. Es werden nur Jahre mit mindestens 90% verfügbarer Werte verwendet, wobei insgesamt mindestens 5 Jahre an Daten verfügbar sein müssen. Die Regionalisierung erfolgt mit Ordinary-Kriging.

4.5.2 Skalierungsparameter

Zweck: Die Skalierungsparameter dienen dazu, die Niederschlagsstruktur über verschiedene Aggregierungen hinweg abzubilden. Sie beschreiben das Verhältnis der Niederschlagsverteilungen in Form von statistischen Momenten über verschiedene Aggregierungen hinweg.

Berechnung: Die Skalierungsparameter werden für das 1., 2. und 3. Moment über verschiedene Aggregierungsstufen der „nassen Reihe“ (nur Werte > 0 werden betrachtet) berechnet. Das k-te empirische Moment ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$m_k = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h(t)^k$$

Mit: m_k k-tes Moment
$h(t)$ Fünfminütige Messreihe
T Anzahl der Fünf-Minuten-Werte der Zeitreihe

Das 1. – 3. Moment wird mit den Aggregierungsstufen {5, 10, 20, 30 min, 1, 2, 4, 6, 12, 24 h} berechnet. Es wird angenommen, dass sich der Zusammenhang zwischen Aggregierungsstufe und Moment durch eine Potenzfunktion beschreiben lässt, wie sie in der folgenden Gleichung gegeben ist.

$$m_k = a \cdot S^b$$

Mit: a, b Parameter
S Aggregierungsstufe

Da es um den Zusammenhang der Momente untereinander geht, ist nur der Exponent b von Bedeutung, der als Skalierungsparameter verwendet wird. Wird die gezeigte Gleichung logarithmiert, so kann der Exponent durch eine lineare Regression zwischen den jeweils berechneten Momenten und Aggregierungsstufen bestimmt werden.

Die Skalierungsparameter, insbesondere von höheren Momenten, hängen stark von den größten Einzelwerten ab. Da die Skalierungsparameter jedoch nicht nur die Struktur sehr großer Werte widergeben sollen und zusätzlich sehr große Unsicherheiten aufweisen können, gehen die größten zehn Werte nicht in die Berechnung mit ein, sondern werden vor der Berechnung als Fehlwerte markiert.

Für die Berechnung der Skalierungsparameter werden nur Fünf-Minuten-Messdaten verwendet, die mit Hilfe des Filters (Abschnitt 4.1.2) ausgewählt werden und nur Stationen, bei denen in mindestens fünf Jahren mehr als 90% aller Werte zur Verfügung stehen. Um saisonale Schwankungen berücksichtigen zu können, werden Winter- (Sept. – April) und Sommermonate (Mai – August) jeweils einzeln berechnet. Die Skalierungsparameter werden mit Ordinary-Kriging regionalisiert.

4.6 PARAMETER DER ANPASSUNG NACH KOSTRA

4.6.1 BEMESSUNGSNIEDERSCHLÄGE AUS DEM KOSTRA-ATLAS

Zweck: Abbildung von Starkregenereignissen entsprechend den Bemessungsniederschlägen von KOSTRA, um eine Vergleichbarkeit mit der bisherigen Ingenieurspraxis zu erhalten.

Berechnung: Für die Abbildung der Bemessungsniederschläge nach KOSTRA werden die Stützstellen des KOSTRA-Atlas verwendet. Diese sind die Dauerstufen 5, 15, 60, 720 und 1440 min mit den Jährlichkeiten 1 und 100 Jahre.

Die Werte im KOSTRA-Atlas sind für quadratische Rasterfelder der Kantenlänge 8,45 km angegeben. KOSTRA gibt keine Einzelwerte an, sondern einen Wertebereich. Für NiedSim3 wird der Klassenmittelwert jedes Bereichs verwendet. Die obersten und untersten Klassen sind offen. Bei der untersten Klasse wird der Mittelwert zwischen Null und der Obergrenze und bei der obersten Klasse die Untergrenze als Wert verwendet.

Die Regionalisierung erfolgt, indem zunächst die so ermittelten Werte auf ihre jeweiligen Rasterfeldmittelpunkte des KOSTRA-Rasters zugeordnet werden und anschließend auf das 1 km-Raster von NiedSim mit Ordinary-Kriging interpoliert werden.

5 SIMULATION DER SYNTHETISCHEN NIEDERSCHLAGSZEITREIHEN

Die Generierung einer fünfminütigen Niederschlagsreihe in NiedSim3 erfolgt für die jeweils ausgewählte NiedSim3-Zelle jahresweise in vier Schritten. Zuerst wird eine stündliche Niederschlagsreihe unter Einhaltung der zu Grunde liegenden Verteilungen zufällig erzeugt (Initialzeitreihe). Dann wird die zeitliche Abfolge der stündlichen Werte in einer Optimierung solange durch das Tauschen von Werten stochastisch verändert, bis die Eigenschaften der erzeugten Reihe den vorgegebenen Eigenschaften möglichst ähnlich sind. In einem dritten Schritt wird die so erzeugte Stundenreihe auf Fünf-Minuten-Werte disaggregiert. Im letzten Schritt werden große Niederschlagswerte (partielle Serien) so angepasst, dass sie den Werten des KOSTRA-Atlas entsprechen.

5.1 GENERIERUNG DER STÜNDLICHEN NIEDERSCHLAGSREIHEN

Die stündliche Generierung der Zeitreihe erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird zufällig eine Initialzeitreihe bestimmt, bei der die stündliche Niederschlagsverteilung bereits der örtlichen Verteilung entspricht, die zeitliche Abfolge der Werte jedoch zufällig ist. In einem nachfolgenden Schritt wird die zeitliche Struktur optimiert. Die Zeitreihe wird jahresweise generiert.

5.1.1 GENERIEREN EINER INITIALZEITREIHE

Die Generierung der Initialzeitreihe ist nochmals in zwei Teilschritte untergliedert: Das Ziehen der Werte aus der stündlichen Verteilung und das feste Positionieren von großen Niederschlagswerten in der Zeitreihe.

5.1.1.1 GENERIEREN VON WERTEN AUS DER 1H-VERTEILUNG

Im ersten Schritt der Erzeugung einer 1h-Initialzeitreihe werden jahresweise Niederschlagswerte mit den regionalisierten 1h-Verteilungen für Winter und Sommer (s. Abschnitt 4.3.1) generiert. Das Vorgehen dazu ist in Abbildung 13 in einem Flussdiagramm dargestellt. Es werden dabei so viele Niederschlagswerte aus der 1h-Verteilung im Sommer und der 1h-Verteilung im Winter gezogen, bis die Summe der generierten 1h-Niederschlagswerte der regionalisierten jährlichen Niederschlagssumme des betreffenden Jahres entspricht.

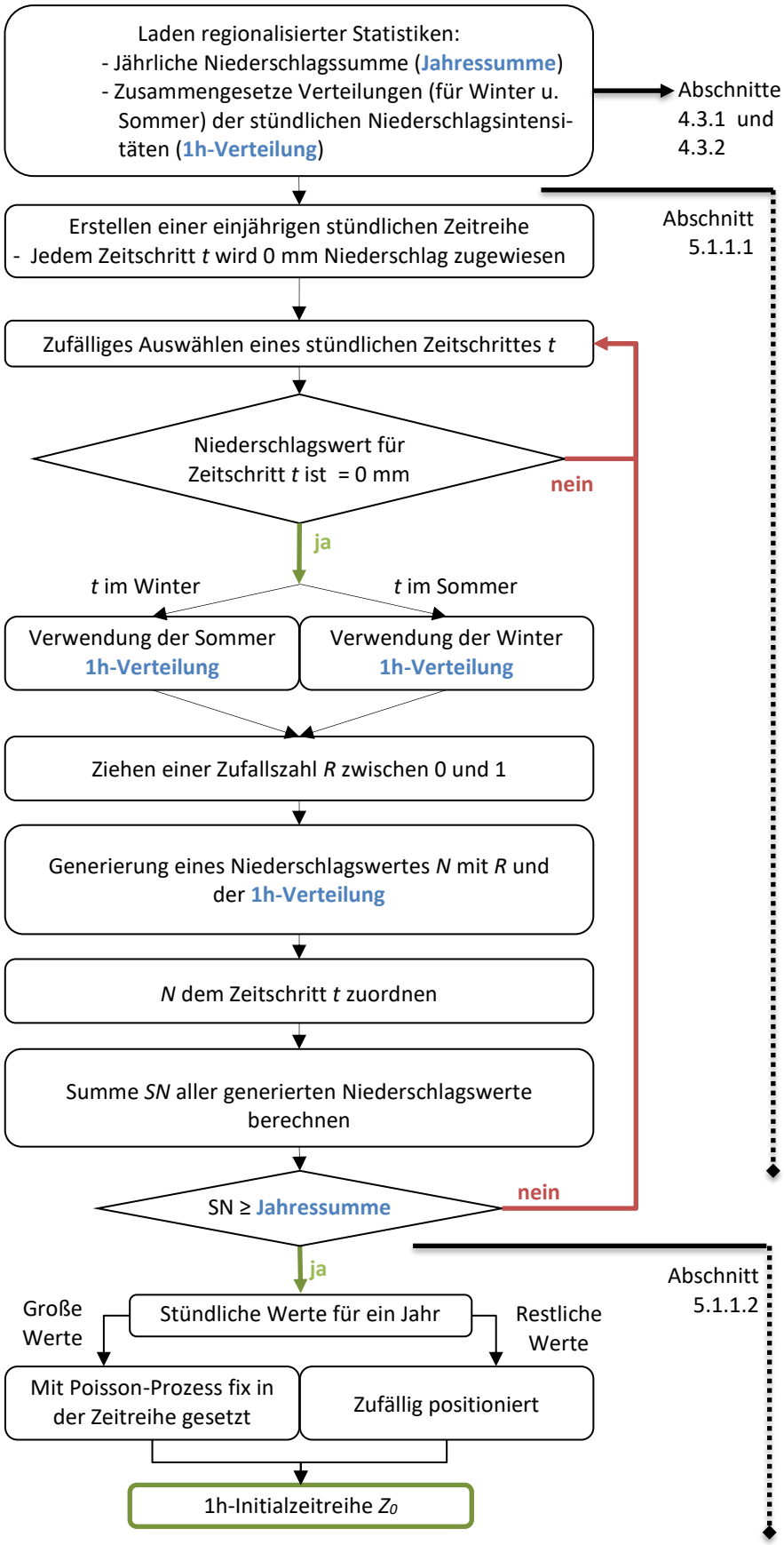


Abbildung 13: Schema der Generierung der zufälligen Ausgangszeitreihe Z_0

5.1.1.2 Setzen von großen Werten mit einem Poisson-Prozess

Ein Teil der größten stündlichen Niederschlagswerte wird nicht völlig zufällig in der Zeitreihe platziert, sondern mit einem Poisson-Prozess fest in der Zeitreihe gesetzt. Diese Position wird in der anschließenden Optimierung nicht mehr verändert. Hierzu werden zunächst die Indizes (Zeitpunkte innerhalb des Jahres) des Poisson-Prozesses bestimmt (siehe Abbildung 14) und danach den Indizes die Niederschlagswerte zugeordnet. Im Folgenden werden beide Schritte nochmals eingehender erläutert.

Bestimmung der Poisson-Indizes

Die Indizes werden über die Wartezeit Δt zwischen zwei zu setzenden Werten berechnet. Diese sind in einem Poisson-Prozess exponentialverteilt:

$$F(\Delta t) = 1 - e^{-\frac{1}{\lambda}\Delta t}, \Delta t \geq 0$$

Über die Inverse der Exponentialverteilung kann eine zufällige Wartezeit Δt bestimmt werden, die nur vom Parameter λ abhängt. In einem Poisson-Prozess entspricht der Parameter λ der mittleren Anzahl an Ereignissen (hier: Poisson-Werte) innerhalb eines Zeitraums (hier: Monat). Wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, ist λ abhängig vom Zeitpunkt innerhalb des Jahres t_i und von der monatlichen Niederschlagssumme H_m.

Für die Festlegung der Indizes werden zwei Poisson-Prozesse in der Mitte des Jahres gestartet, wobei einer in Richtung Jahresende läuft und der andere in Richtung Jahresanfang. Der Grund hierfür liegt an der kürzeren mittleren Wartezeit zwischen zwei Poisson-Werten im Sommer. Bei einem Prozessbeginn im Sommer werden komplette Monate seltener vollständig übersprungen. Da dies jedoch insbesondere bei trockenen Monaten trotzdem vorkommen kann, wird bei einer Wartezeit größer als 30 Tage der Poisson-Prozess abgebrochen und im nächsten Monat neu gestartet.

Im Regelfall wird zunächst abhängig von der Position innerhalb des Jahres über die Parameter der Sinusfunktion die Steigung der linearen Regression berechnet. Zusammen mit dem mittleren y-Achsenabschnitt $\bar{a}$ kann anschließend in Abhängigkeit von der Monatssumme der Parameter $\lambda(t_i)$ (= mittlere Anzahl an Poisson-Werten) berechnet werden. Über die inverse Exponentialfunktion kann nun die Zeit bis zum nächsten Poisson-Wert sowie dessen

Index t_i^* bestimmt werden. Dies wird so lange durchgeführt, bis beide Poisson-Prozesse außerhalb des gültigen Index-Bereichs des aktuellen Jahres liegen. Die Anzahl an gefundenen Poisson-Indizes aus beiden Teilprozessen bestimmt die Gesamtanzahl an zu setzenden Werten n_{poiss}.

Zuordnung der Niederschlagswerte

Die Zuordnung der Niederschlagswerte erfolgt nach Sommer und Winter getrennt. Für jede Jahreszeit wird zunächst bestimmt, welche Werte auf die Poisson-Indizes fest positioniert werden. Hierzu wird zunächst die Anzahl an größten Niederschlagswerten n_{poiss} auf n_{poiss}^{+}vergrößert (siehe Abschnitt 4.3.3). Aus den größten n_{poiss}^{+}Werten aller gezogenen stündlichen Werte (siehe 5.1.1.1) werden n_{poiss} Niederschlagswerte zufällig ausgewählt. Diese werden nun zufällig auf die Positionen der Poisson-Indizes verteilt.

Anschließend werden alle übrigen stündlichen Niederschlagswerte zufällig in der Zeitreihe platziert. Hierbei wird die Verteilung (Sommer/Winter), aus der die Werte gezogen wurden, beachtet, das heißt die Werte in ihrer jeweiligen Jahreszeit positioniert.

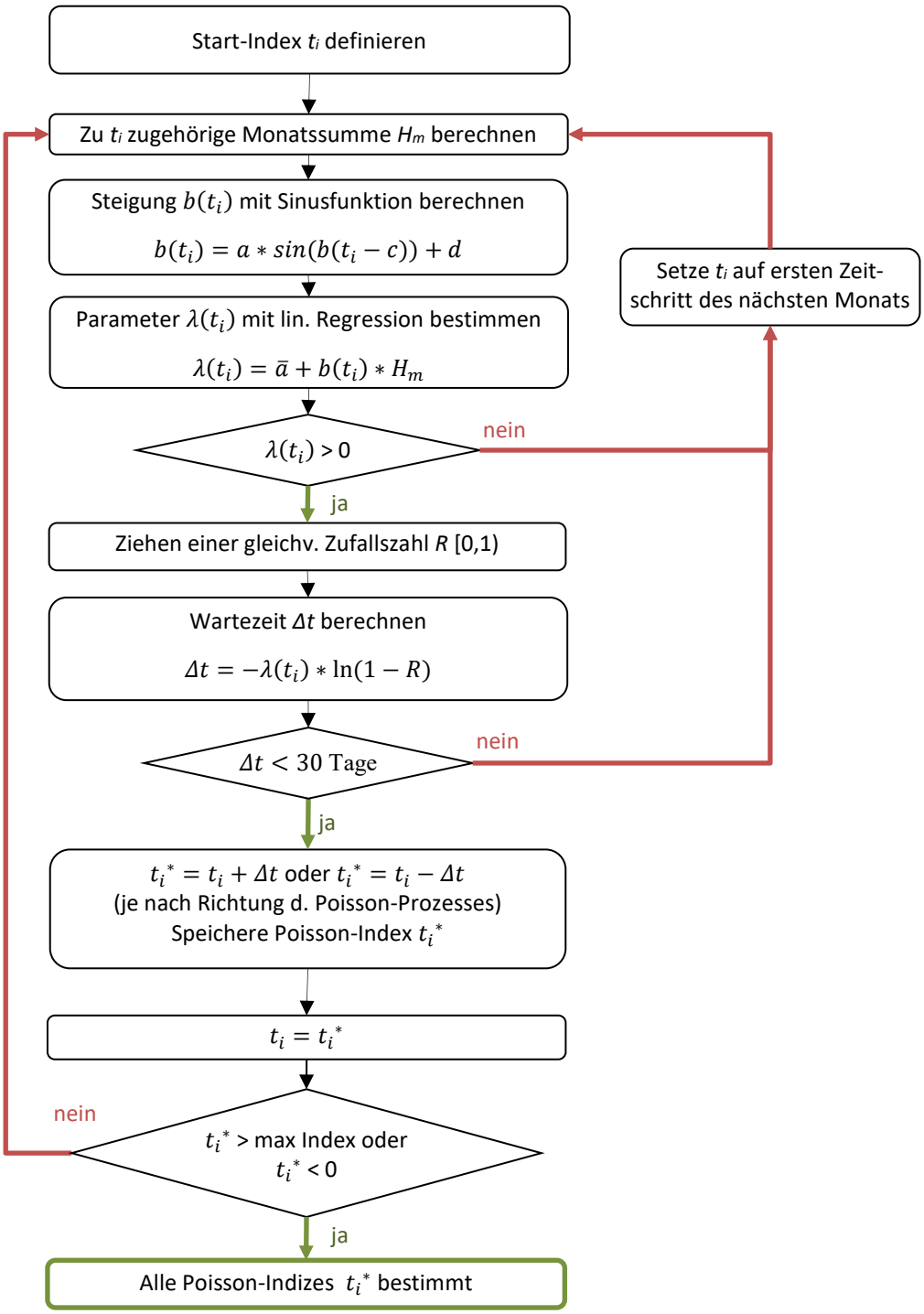


Abbildung 14: Schema zur Berechnung der Poisson-Indizes

5.1.2 Erstellen einer Zielfunktion

Die Zielfunktion ist ein Maß für den Unterschied zwischen den vorhandenen und gewünschten Eigenschaften der Zeitreihe. Ziel der Optimierung ist es, die Zielfunktion zu minimieren, also den Unterschied zwischen den tatsächlichen statistischen Eigenschaften der zu generierenden Niederschlagsreihe $X_{i,akt}$ und den Vorgaben aus den regionalisierten statistischen Parametern $X_{i,ziel}$ so klein wie möglich werden zu lassen. Allgemein formuliert lautet die Gleichung der Zielfunktion:

$$O = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{(X_{i,syn} - X_{i,ziel})^2}{X_{i,init}} \right)^{w_i} \Rightarrow min$$

Mit: O Zielfunktion der Reihe *Z*
n Anzahl der zu berücksichtigenden statistischen Eigenschaften
w_i Gewicht der Eigenschaft *i*
$X_{i,syn}$ Statistische Eigenschaft *i* der synthetischen Reihe *Z*
$X_{i,ziel}$ Statistische Eigenschaft *i* der geforderten Zeitreihe
$X_{i,init}$ Statistische Eigenschaft *i* der Initialzeitreihe Z_0

Die Zielfunktion kann minimal den Wert Null annehmen, in dem Fall wäre das Optimum erreicht. Die statistischen Eigenschaften weisen unterschiedliche absolute Skalen auf. Um diese in der Optimierungsfunktion besser vergleichen zu können, werden alle statistischen Eigenschaften mit ihrem Ausgangswert der Initialzeitreihe $X_{i,init}$ normiert. Zusätzlich werden die Eigenschaften gewichtet, um bei konkurrierenden Statistiken, die nicht gleichzeitig optimiert werden können, bestimmte Eigenschaften zu begünstigen.

In die Zielfunktion der Generierung der stündlichen Zeitreihe gehen die in Tabelle 1 aufgeführten Parameter ein.

Tabelle 1: Parameter der stündlichen Optimierung

Parameter	Bezugszeitraum	Aggregierung (min)
Autokorrelation *k* = 1	jahresweise	60, 120, 180, 360, 720, 1440
Gewichtete Autokorrelation *k* = 1		
Monatssummen	monatsweise	-
Überschreitungswahrscheinlichkeiten 0, 1, 5 mm/Tag	jahresweise	1440
Länge der Niederschlagsintervalle	kompletter Zeitraum	60

Im Laufe der Optimierung sind all diese Eigenschaften in jedem Schritt, das heißt nach jeder Veränderung der synthetischen Reihe, neu zu bestimmen. Um die Rechenzeit zu begrenzen, wird hierbei eine Methode angewendet, bei der nur die Veränderung der Zielfunktion durch eine Veränderung der Reihe *Z* berechnet wird, ohne dass die Eigenschaften für die gesamte Zeitreihe neu ermittelt werden müssen (Bárdossy, 1998). Wie Tabelle 1 zeigt, gehen manche Parameter über den kompletten Zeitraum, andere jahresweise oder monatlich in die Optimierung ein. Bei Parametern, die über den kompletten Zeitraum ermittelt werden, wird für die Optimierung der verschiedenen Jahre jeweils der gleiche Wert bei der Zielfunktion berücksichtigt.

5.1.3 Optimierung durch Simulated Annealing

Nachdem eine zufällige Initialzeitreihe Z_0 vorliegt, sind die Eigenschaften dieser Reihe dahingehend zu verändern, dass sie von den regionalisierten statistischen Vorgaben praktisch nicht mehr abweichen, d. h. die Zielfunktion ist zu minimieren. Hierzu wird ein Simulated-Annealing-Algorithmus verwendet, der zu den Monte-Carlo-Markov-Ketten Verfahren gehört (Chib, et al., 1995).

Simulated Annealing ist ein stochastischer Optimierungsalgorithmus. Durch zufälliges Verändern der Eingangsdaten wird versucht, den Wert der Zielfunktion in die gewünschte Richtung zu verbessern. Eine Verschlechterung der Zielfunktion in einem Optimierungsschritt wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit trotzdem angenommen, um ein lokales Minimum wieder verlassen zu können. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verschlechterung angenommen wird, wird in Abhängigkeit von einer sogenannten „Temperatur“ *T* bestimmt, die sich im Laufe der Optimierung immer weiter verringert.

Zu Beginn der Optimierung wird der Wert der Zielfunktion für die Ausgangsreihe *Z* bestimmt. Im ersten Schritt wird die Ausgangszeitreihe *Z* gleich der Initialzeitreihe Z_0 gesetzt. Nun werden zwei Zufallszahlen gezogen. Diese stehen für zwei Positionen in der Zeitreihe *Z*, deren Werte ausgetauscht werden. Es ergibt sich die geänderte Zeitreihe *Z’*. Hierbei wird darauf geachtet, dass Werte nur innerhalb der jeweiligen Jahreszeit getauscht werden können. Andernfalls würden die unterschiedlichen stündlichen Verteilungen für Sommer und Winter gemischt. Für die modifizierte Reihe *Z’* wird der Wert der Zielfunktion *O(Z’)* berechnet. Ist

dieser kleiner als der Wert der Ausgangsreihe, wird die Zeitreihe also durch den Austausch verbessert, so wird der Austausch der Werte angenommen und die Reihe *Z'* anstelle der Reihe *Z* gesetzt. Hat die Zielfunktion der veränderten Reihe einen größeren Wert als die der Ausgangsreihe, tritt also eine Verschlechterung ein, so wird eine von der Verschlechterung abhängige Wahrscheinlichkeit *P* berechnet:

$$P = e^{\frac{O(Z)-O(Z')}{T}}$$

P wird umso kleiner, je mehr die Optimierungsfunktion *O* durch den Austausch verschlechtert wird und je kleiner die Annealingtemperatur *T* ist. Dann wird eine weitere Zufallszahl *R* gezogen und mit der Wahrscheinlichkeit *P* verglichen. Ist *P* größer als *R*, so wird der Austausch trotz Anstieg des Funktionswerts der Zielfunktion angenommen und die veränderte Reihe als Ausgangsreihe gesetzt. Andernfalls wird der Austausch abgelehnt und die Reihe bleibt unverändert.

Dieser Austausch wird K_{iter}-mal wiederholt. Dann wird die Temperatur *T* reduziert und es folgen wieder K_{iter} Wiederholungen mit der reduzierten Temperatur. Insgesamt wird die Temperatur in K_{max} Schritten reduziert, so dass sich der Gesamtumfang der versuchten Austausche aus dem Produkt $K_{iter} \cdot K_{max}$ ergibt. In NiedSim3 wird K_{iter} = 4500 und K_{max} = 140 gewählt.

Mit sinkender Temperatur wird es immer unwahrscheinlicher, dass Verschlechterungen der Zielfunktion *O* angenommen werden. Die Temperatur hat die Aufgabe zu verhindern, dass die Optimierung in einem lokalen Minimum endet. Zu Beginn, bei hoher Temperatur, können alle möglichen Kombinationen praktisch ungehindert durchgespielt werden. Indem Verschlechterungen zugelassen werden, kann die Optimierung lokale Minima immer wieder verlassen. Erst gegen Ende der Simulation, bei niedriger Temperatur *T,* wenn man dem Optimum schon nahe ist, werden praktisch nur noch Verbesserungen akzeptiert.

Anschließend wird mit der optimierten Zeitreihe erneut eine Simulated-Annealing-Optimierung durchgeführt, wobei als Initialzeitreihe Z_0 die optimierte Zeitreihe der ersten Optimierung verwendet wird. Hierbei wird die Temperatur T_0 deutlich abgesenkt (halbiert), um die bereits optimierte Zeitreihe nicht wieder vollständig zu mischen. Diese zusätzliche

Optimierung dient der weiteren Verbesserung der Zeitreihen und wird K_{tot} = 3-mal durchgeführt. Abbildung 15 zeigt ein Ablaufdiagramm des Optimierungsalgorithmus.

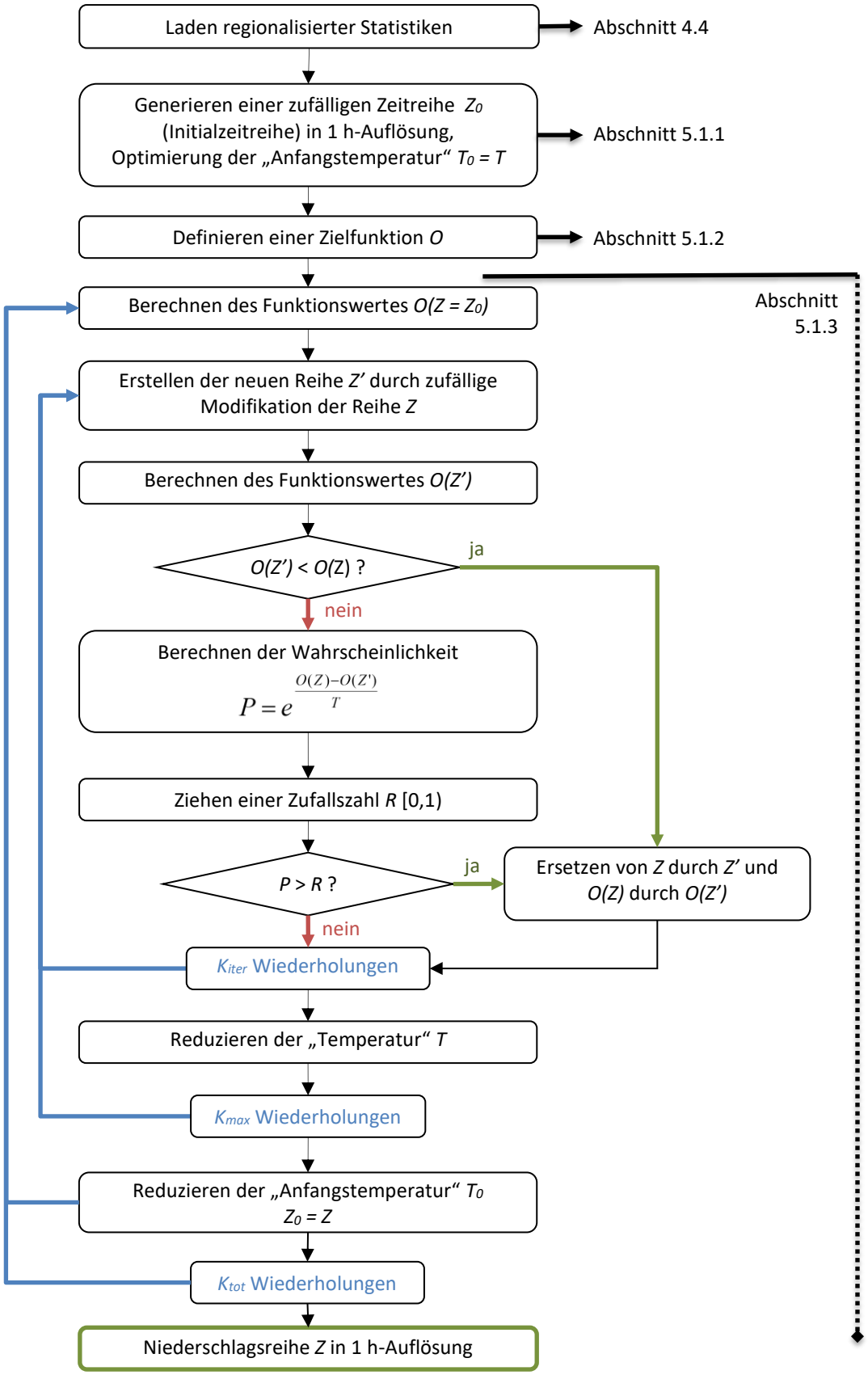


Abbildung 15: Schema der Generierung einer 1h Niederschlagszeitreihe mit Simulated Annealing

5.2 DISAGGREGIERUNG

Die Disaggregierung der Stundenreihe zu einer Fünf-Minuten-Reihe verläuft analog zur Generierung der Stundenwerte über eine Optimierung durch Simulated Annealing. Zunächst wird aus der Zeitreihe der 1h-Werte eine Anfangsreihe erzeugt, die wiederum solange modifiziert wird, bis ihre Eigenschaften den gewünschten Eigenschaften nahezu entsprechen.

Im Folgenden werden nur die wesentlichen Unterschiede zur Generierung der Stundenwerte erläutert. Abbildung 16 zeigt das zugehörige Flussdiagramm.

5.2.1 ERZEUGEN EINER REIHE VON FÜNF-MINUTEN-WERTEN

Über die Stundenreihe ist die Stundensumme des Niederschlags für jede Stunde des Jahres vorgegeben. Diese Stundensummen werden gleichmäßig auf die jeweils 12 zugehörigen Fünf-Minuten-Intervalle verteilt (Blockregen). Diese Reihe ist nun die Ausgangreihe für die folgende Optimierung.

5.2.2 AUFSTELLEN DER ZIELFUNKTION

Die Zusammenhänge der höheren Aggregierungen werden bei der Generierung der Stundenwerte bereits berücksichtigt, so dass sie in der Zielfunktion der Disaggregierung nicht mehr zu beachten sind. Die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter gehen in die Erstellung der Zielfunktion für die Disaggregierung mit ein.

Tabelle 2: Parameter der Disaggregierung

Parameter	Bezugszeitraum	Aggregierung (min)
Gewichtete Autokorrelation $k = 1$	Kompletter Zeitraum	5, 10, 15, 30, 45, 60
Skalierungsparameter 1., 2., 3. Moment	Kompletter Zeitraum, Winter/ Sommer	-

5.2.3 OPTIMIERUNG DURCH SIMULATED ANNEALING

Würden hier wie bei der Generierung der Stundenreihe zwei Werte innerhalb der Zeitreihe zufällig getauscht, so würden die stündlichen Niederschlagssummen und die Struktur der Zeitreihe auf der Stundenskala verändert werden. Ein Tausch müsste somit innerhalb der

Stundenintervalle erfolgen, um die Stundensumme zu erhalten. Unter dieser Bedingung würde das Vertauschen allerdings die Eigenschaften der Reihe nicht verändern, da bei der Initialisierung der Reihe der Niederschlag innerhalb jedes Stundenintervalls gleichverteilt würde, d.h. es würden gleiche Niederschlagshöhen ausgetauscht werden.

Deshalb wird bei der Disaggregierung zunächst zufällig eine Stunde ausgewählt, in dieser Stunde wiederum zufällig zwei Fünf-Minuten-Werte. Nun wird ein Niederschlagsinkrement Δh der Reihe von dem einen in das andere Intervall verschoben, d.h. es wird ein sehr geringes Niederschlagsvolumen von dem einen Wert abgezogen und zum anderen Wert hinzuaddiert. Hierbei wird sichergestellt, dass kein Wert kleiner Null werden kann.

Dieses „Verschieben“ von Niederschlagsvolumina innerhalb der einzelnen Stundenintervalle wird von der Zielfunktion bewertet und mit Hilfe von Simulated Annealing optimiert. Hierbei werden K_{iter} = 105 x K_{max} = 7000 Durchläufe durchgeführt, bevor Δh verändert wird und die Optimierung erneut beginnt. Die Niederschlagsinkremente Δh werden zu Beginn relativ groß gewählt und schrittweise reduziert, sodass anfangs größere Änderungen möglich sind als gegen Ende der Optimierung. In NiedSim3 werden die Niederschlagsinkremente K_{tot} = 3-mal reduziert (Δh = 0,1; 0,05; 0,01 mm).

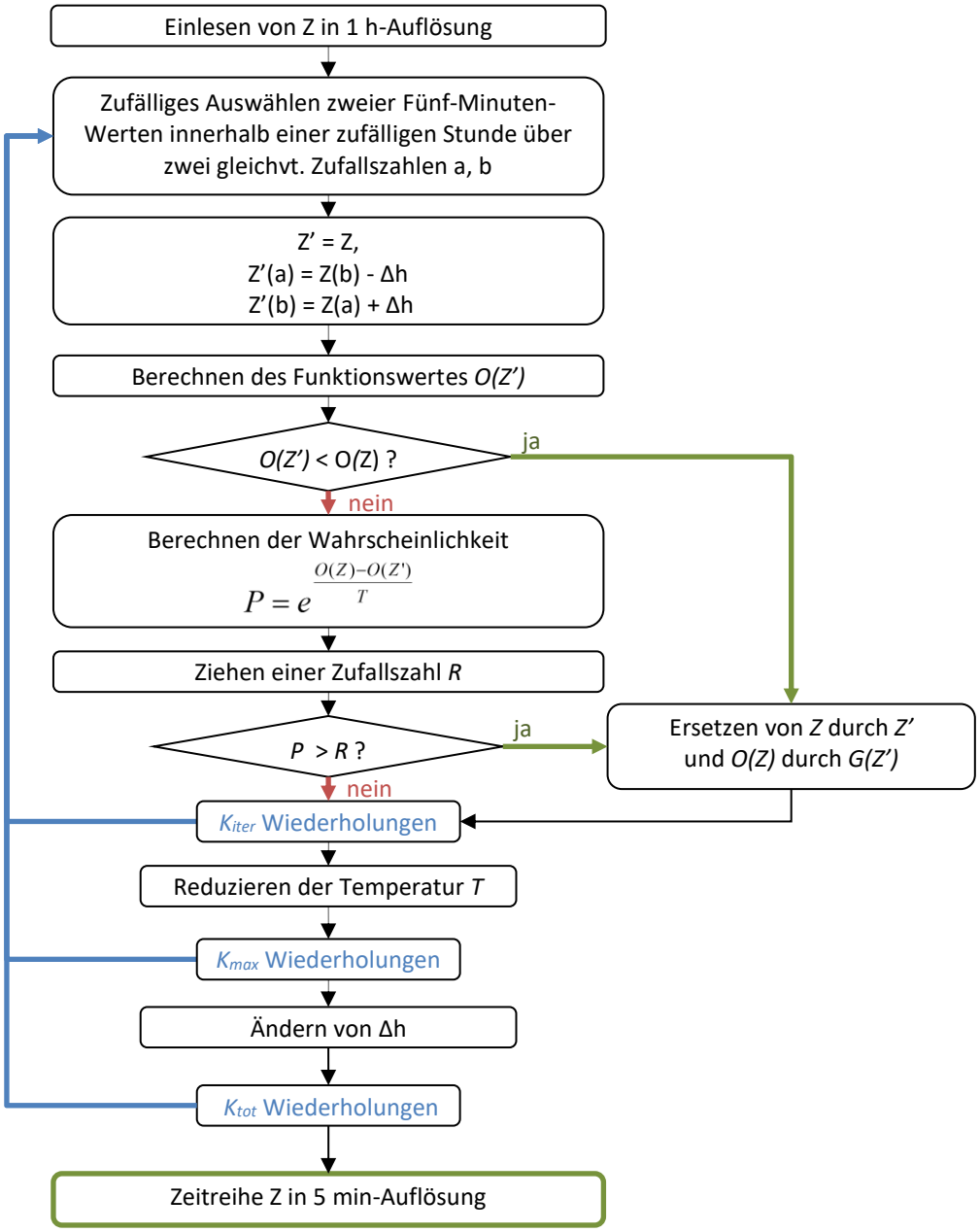


Abbildung 16: Schema der Disaggregierung mit Simulated Annealing

5.3 ANPASSUNG AN KOSTRA

5.3.1 ÜBERBLICK

Die disaggregierte Zeitreihe erfüllt nun alle Zielvorgaben der Optimierungsfunktion und spiegelt somit die gemessenen Eigenschaften des Niederschlagkontinuums wider. Im Gegensatz zu früheren NiedSim-Versionen gehen keine Extremniederschlagswerte direkt in die Optimierung ein. Begründet wird dies dadurch, dass sehr große Niederschlagswerte die Optimierung erheblich beeinflussen können. Da diese Werte in der Regel jedoch mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind, wird die Optimierung insgesamt weniger robust. Das Ziel für die operationelle Version von NiedSim sollte jedoch eine möglichst robuste, vergleichbare Niederschlagszeitreihe sein, die die langjährigen örtlichen, insbesondere kontinuierlichen Charakteristiken widerspiegelt, und nicht von einzelnen Extremwerten übermäßig beeinflusst wird. Andererseits sind gerade Starkregenereignisse für die Bemessung von Kanalnetzen wesentlich und können nicht vernachlässigt werden.

Aus diesem Grund wird in NiedSim3 folgender Ansatz angewandt. Zunächst wird eine kontinuierliche fünfminütige Zeitreihe erzeugt, ohne Extremwerte explizit zu betrachten. In einem nachfolgenden Schritt werden die Niederschlagswerte, die zur partiellen Serie, d. h. zu Starkregenereignissen, beitragen, optimiert. Die bereits in der Generierung und Disaggregierung optimierten statistischen Eigenschaften werden dabei unwesentlich verändert, da nur ein sehr geringer Prozentsatz aller Werte überhaupt angepasst wird. Auf einer Aggregierung von fünf Minuten sind es weniger als 0,05 % aller nassen Werte, selbst auf der täglichen Aggregierung nur ca. 1,3 % aller nassen Fünf-Minuten-Werte.

Die Anpassung der Werte erfolgt durch eine relative Skalierung bei Erhalt der Massenbilanz. Dabei wird die ursprüngliche Struktur des Niederschlags so wenig wie möglich geändert und die Jahressumme beibehalten. Die Anpassung erfolgt an die KOSTRA2000 Starkregenauswertung der Dauerstufen 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440 Minuten.

5.3.2 Ablauf

Beginnend von der niedrigsten Dauerstufe werden die Niederschlagswerte, die bei der partiellen Serie verwendet werden, abgeändert. Die Änderungen werden so gewählt, dass die Abweichungen zur KOSTRA-Tabelle möglichst gering ausfallen.

1) Berechnung der Stützstellen (plotting positions / x-Werte / Jährlichkeiten T) der L größten Niederschlagswerte der partiellen Serie (DWA-A531, 2012)

$$T_k = \left(\frac{(L\ +\ 0.2)}{(k\ -\ 0.4)} * \frac{M}{L}\right)$$

mit: M Anzahl der Jahre der Zeitreihe [–]

L Anzahl der Werte der partiellen Serie (*M x* Euler Zahl) [–]

k Laufindex 1, 2, …, L (k = 1: größter; k = L: kleinster Wert) [–]

2) Einlesen der KOSTRA-Tabelle und Interpolation dieser Werte für die errechneten Jährlichkeiten T_k und Dauerstufen D. Von der partiellen Serie des KOSTRA-Atlas müssen die Korrekturfaktoren kleiner Dauerstufen herausgerechnet werden (DWA-A531, 2012), da andernfalls die angepasste Zeitreihe bei der Auswertung nach KOSTRA erneut korrigiert würde. Die so berechnete partielle Serie wird absteigend sortiert und dient als Zielwert für die Anpassung: $X_{ziel}^{T,D}$.
3) Berechnung der partiellen Serie der synthetischen Reihe (DWA-A531, 2012). Auch hier werden keine Korrekturfaktoren verwendet. Diese Niederschlagswerte $X_{syn}^{T,D}$ werden im Folgenden als Ereignis bezeichnet.
4) <u>Ereigniskorrektur</u>: Beginnend mit der kleinsten Dauerstufe $D = 5$ min und dem größtem Niederschlagsereignis (Jährlichkeit T_1) werden alle Ereignisse $X_{syn}^{T,D}$ sukzessive angepasst:
    a. Berechnung der Abweichung $\Delta x = X_{ziel}^{T,D} - X_{syn}^{T,D}$. Diese kann positiv oder negativ sein.
    b. Suche alle Einzelwerte der synthetischen Reihe die zu $X_{syn}^{T,D}$ beitragen.
    c. Filtere alle Einzelwerte, die auf einer niedrigeren Dauerstufe bereits angepasst wurden, damit diese nicht mehr geändert werden.

d. Bestimmung der Korrekturfaktoren Δx_{rel} für die übriggebliebenen Einzelwerte, d. h. Δx wird prozentual auf die Einzelwerte aufgeteilt. Hierbei werden drei Fälle unterschieden.
    i. Standard: Alle Einzelniederschlagswerte werden mit Δx_{rel} multipliziert (skaliert).
    ii. Wenn alle übriggebliebenen Einzelwerte gleich Null sind und Δx positiv ist, dann werden die Einzelwerte nicht skaliert, sondern Δx stattdessen auf alle Null-Werte gleichverteilt.
    iii. Das Ereignis wird übersprungen, wenn das Ereignis verkleinert werden müsste, jedoch keine Einzelwerte mehr geändert werden können (da diese bereits auf früheren Dauerstufen geändert wurden) oder wenn die übrigen Einzelwerte zu klein sind.
e. Speichern der Position der geänderten Werte, um diese auf höheren Aggregierungen nicht mehr abzuändern.

5) <u>Massenbilanzkorrektur</u>: Die Änderung Δx wird hälftig vor und hinter dem geänderten Ereignis korrigiert. Hierbei können zwei Fälle (a, b) auftreten:
    a. Niederschlag muss hinzugefügt werden (Ereignis wurde verkleinert):
        i. Summe in Anteile aufteilen, die kleiner sind als das KOSTRA-Minimum der Dauerstufe (verhindert das Erzeugen neuer Extremwerte).
        ii. Intervall für jeden Anteil suchen, der folgende Bedingungen erfüllt:
            1. Das Intervall ist nicht trocken (Vermeidung von neuen Ereignissen).
            2. Die Niederschläge erzeugen kein Extrem auf einer niedrigeren Dauerstufe durch die Addition mit vorhandenem Niederschlag.
        iii. Einfügung des Niederschlags, wobei wieder skaliert wird, bzw. gleichverteilt, wenn kein Niederschlag vorhanden ist.
    b. Niederschlag muss abgezogen werden (Ereignis wurde vergrößert):
        i. Finde Intervalle, in denen ausreichend Niederschlag vorhanden ist.
        ii. Skaliere die Werte entsprechend der Änderung.

iii. Wenn Δx klein ist, wird nicht skaliert, da Rundungsprobleme auftreten. Stattdessen werden n Werte um 0,01 reduziert, wobei $\Delta x = n * 0{,}01$ der notwendigen Änderung entspricht.

6) Schritt 4) und 5) werden für alle Jährlichkeiten $\{T_2, \dots, T_k\}$ der kleinsten Dauerstufe wiederholt.
7) Schritt 4) bis 6) werden mit den Dauerstufen $D = \{15,\ 30,\ 60,\ 120,\ 360,\ 720,\ 1440\ min\}$ wiederholt.

Wenn ein Extremwert in Schritt 4) verkleinert wird, entspricht dieser Wert zwar einem KOSTRA-Wert, allerdings kann es vorkommen, dass der nächst kleinere Wert größer als der korrigierte Wert und somit größer als der KOSTRA-Zielwert ist. Insbesondere auf niedrigen Dauerstufen kommt dies häufiger vor. Eine Möglichkeit ist eine erneute Korrektur der bereits angepassten synthetischen Reihe. Für NiedSim3 werden zwei Iterationsschritte durchgeführt, da dies in der Regel ausreichend ist (Abbildung 17). Die Anzahl übersprungener Ereignisse (Schritt 4.d.iii) kann vernachlässigt werden, da dies nur bei sehr wenigen Ereignissen vorkommt.

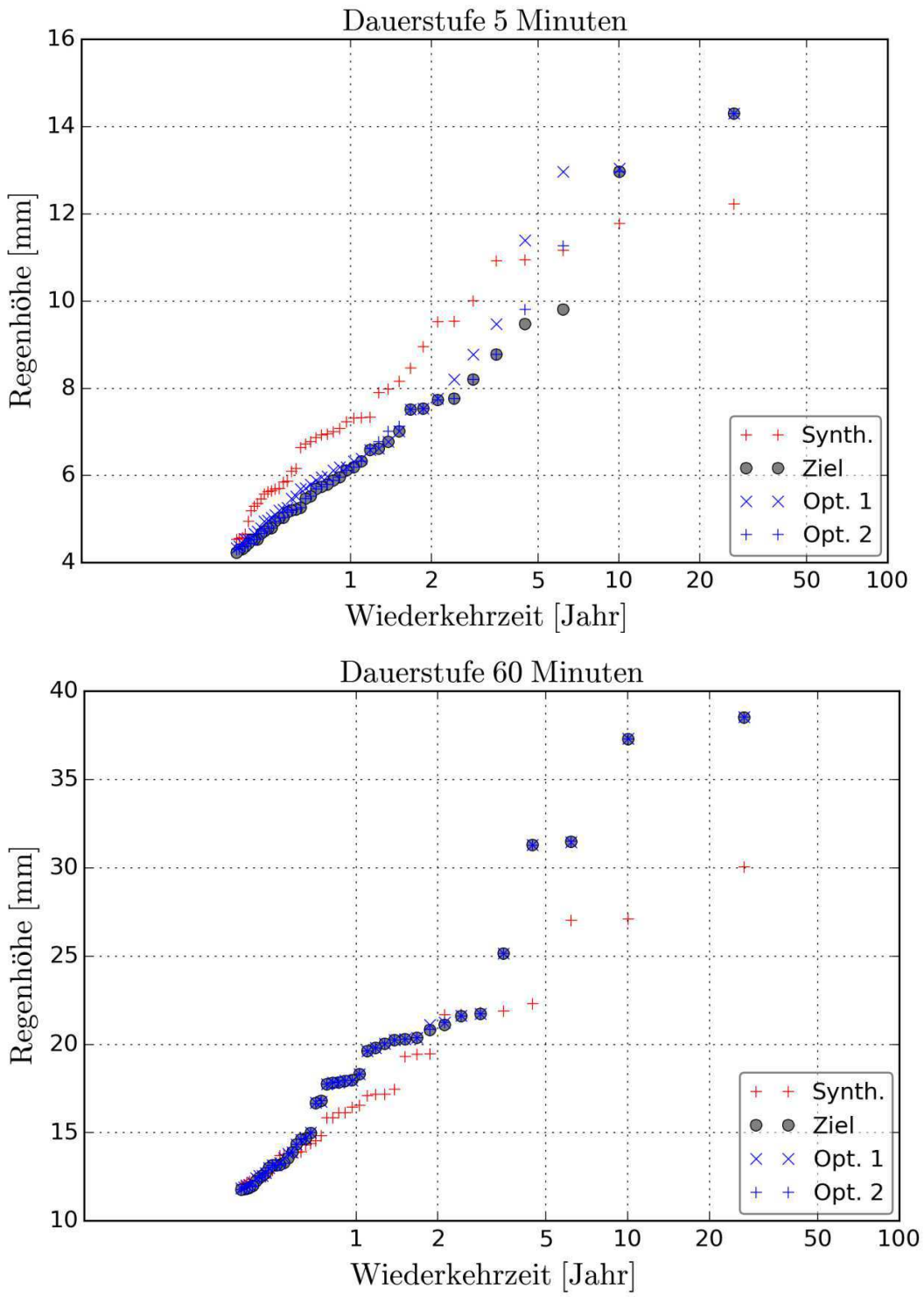


Abbildung 17: Partielle Serie für zwei Dauerstufen jeweils für die synthetische Zeitreihe vor der Starkregen-optimierung (Synth.) und nach der Optimierung nach dem ersten (Opt. 1) und zweiten (Opt. 2) Durchlauf. Außerdem sind die in die Optimierung eingehenden Zielwerte dargestellt.

6 VERSIONSÜBERSICHT

NIEDSIM

- Ab 1998: Entwicklung eines synthetischen Niederschlagsgenerators unter dem Namen NiedSim
- Zwischen 2000 und 2009: operationelle Umsetzung für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz

NIEDSIM 2.X

- 2014/2015: Neukonzeption von NiedSim basierend auf Python und FORTRAN
- Aktualisierung der Datenbasis
- Verschiedene kleine Änderungen, siehe Handbuch NiedSim2.6 (Bárdossy, et al., 2015)

NIEDSIM3 (VERSION 3.0)

- 2017: umfassende Neustrukturierung basierend auf den Ergebnissen in den BMBF-Projekten SAMUWA und SYNOPSE (van der Heijden, et al., 2017) und zweier Dissertationen (Mosthaf, 2017; Müller, 2017)

7 LITERATURVERZEICHNIS

Bárdossy, A. 1998. Generating precipitation time series using simulated annealing. *Water Resources Research 34 (7).* 1998, S. 1737-1744.

Bárdossy, András, et al. 2015. *Handbuch Niederschlags-Simulator 2.6.* Stuttgart : s.n., 2015.

Bowman, A.W. und Azzalini, A. 1997. *Applied smoothing techniques for data analysis : The kernel approach with S-Plus illustrations.* Oxford : OUP, 1997.

Chib, S. und Greenberg, E. 1995. Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm. *American Statistician, 49.* 1995, S. 327-335.

Dunkerley, David. 2008. Rain event properties in nature and in rainfall. *Hydrological Processes.* 2008, Nr. 22, S. S.4415-4435.

DWA-A531. 2012. *Arbeitsblatt DWA-A 531 Starkregen in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit und Dauer.* Hennef : DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2012. 978-3-942964-28-9.

Malitz, Gabriele. 2005. *KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland, Grundlagenbericht.* Offenbach : 97. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V, 2005.

Mosthaf, T. und Bárdossy, A. 2017. Regionalizing nonparametric models of precipitation amounts on different temporal scales. s.l. : Hydrology and Earth System Sciences, 2017. Bd. 21, 5, S. 1-39. doi:10.5194/hess-21-2463-2017.

Mosthaf, Tobias. 2017. *New Concepts for Regionalizing Temporal Distributions of Precipitation and for its Application in Spatial Rainfall Simulation.* University of Stuttgart. 2017. Ph.D. dissertation. submitted.

Müller, Thomas. 2017. *Generation of a Realistic Temporal Structure of Synthetic Precipitation Time Series for Sewer Applications.* University of Stuttgart. 2017. Ph.D. dissertation. submitted.

Müller, Thomas, et al. 2017. *Bedienungsanleitung Niederschlags-Simulator Version 3.0.* Stuttgart : s.n., 2017.

Peel, Syd und Wilson, Laurence. 2008. Modeling the distribution of precipitation forecasts from the Canadian ensemble prediction system using kernel density estimation. s.l. : Weather Forecasting, 2008. Bd. 23, 4.

van der Heijden, Sven, et al. 2017. Abschlussbericht für das INIS-Projekt SYNOPSE. *Förderkennzeichen 033W002B .* 2017.

A) ANHANG

Tabelle 2: Parameter der Ausgangszeitreihe

Parameter	Bezugszeitraum	Datenbank	Nieder-schlags-grenz-wert	NaN Hand-habung	Aggrega-tion (min)	Lag	Interpolation	Kommentar
Stündliche Verteilungsfunktion 1. > 0,95 Perzentil 2. < 0.95 Perzentil	Winter/Sommer Zeitraum I - III	stündlich und täglich, mind. 7 Jahre Daten pro Jahreszeit ohne NaN Werte zu berücksichtigen	P0	NaN Werte werden nicht verwendet	60	-	OK	> 0.95: nicht-parametrisch < 0.95: Exponentialverteilung (ohne Anpassung)
3. P0	Winter/Sommer Zeitraum III*	stündlich, NaN < 10 % pro Monat	-	NaN gelöscht				
Jahressummen	Zeitraum I - III	täglich, nur Jahre mit NaN < 1%	-	= 0	-	-	EDK (geglättete Höhe)	
Poisson-Parameter	Zeitraum I - III	stündlich, mind. 5 Jahre Daten, mind. 8500 Werte/ Jahr (NaN < 3 %)	nur große Werte [> 4.0 mm]	-	60	-	Kein Kriging, alle Daten von allen Stationen werden für lineare Regression genutzt	Abhängig von Jahreszeit und Monatssumme (lin. Regression)

*es werden nur gefilterte Daten des neuen Zeitraums genutzt

Tabelle 3: Parameter der 1h-Optimierung

Parameter	Bezugszeit-raum	Datenbank	Nieder-schlagsgrenz-wert	NaN Handha-bung	Aggregation (min)	Lag	Interpola-tion	Kommen-tar
Autokorrelation	Jahresweise, Zeitraum I - III	stündlich, < 10 % NaN im Monat, mind. 3 Monate Daten pro Jahr, mind. 10 Jahre Daten	-	= 0	60, 120, 180, 360, 720, 1440	1	OK	Mittelwert und Stan-dardabwei-chung der Jahre pro Station
Gewichtete Auto-korrelation								
Monatssummen	Monatsweise, Zeitraum I - III	täglich	-	= 0	-	-	EDK (geglätte-te Höhe)	-
Überschreitungs-wahrscheinlichkei-ten von 0 mm/Tag 1 mm/Tag 5 mm/Tag	Jahresweise, Zeitraum I - III	täglich, < 50 % NaN - Werte / Jahr	-	NaN ge-löscht	1440	-	OK + EDK (geglätte-te Höhe)	-
Länge der Nieder-schlagsintervalle	Zeitraum III*	stündlich, mind. 5 Jahre an Daten, nur Daten >1995 verwendet, < 800 NaN - Werte/Jahr (NaN < 9 %)	-	= 0	60	-	keine, mittl. rel. Häufig-keitsver-teilung	Trennzeit (lag) = 1 h

*es werden nur gefilterte Daten des neuen Zeitraums genutzt

Tabelle 4: Parameter der 5min-Disaggregierung

Parameter	Bezugszeit-raum	Datenbank	Niederschlags-grenzwert	NaN Hand-habung	Aggregation (min)	Lag	Interpolation	Kommentar
Gewichtete Auto-korrelation	Zeitraum III*	5-min, < 10 % Nan pro Jahr, mind. 5 Jahre Daten	-	= 0	5, 10, 15, 30, 45, 60	1, 2	OK	
Skalierungsparameter 1. Moment 2. Moment 3. Moment	Winter/ Som-mer, Zeitraum III*	5-min, < 10 % Nan pro Jahr, mind. 5 Jahre Daten	Nur nasse Werte werden verwendet [> 0 mm und nicht NaN]	10 höchste Werte auf NaN gesetzt (nicht ge-nutzt)	5, 10, 20, 30, 60	-	OK	

*es werden nur gefilterte Daten des neuen Zeitraums genutzt

Tabelle 5: Parameter der KOSTRA-Anpassung

Parameter	Bezugszeitraum	Datenbank	Niederschlags-grenzwert	NaN Hand-habung	Aggregation (min)	Lag	Interpolation	Kommentar
KOSTRA - Parameter	Kostra2000	Kostra2000	-	-	5, 15, 60, 720, 1440	-	OK	Wiederkehrzeit 1 und 100 Jahre

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 64717/64749/64752/64679
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681
E-Mail: iws@iws.uni-stuttgart.de
http://www.iws.uni-stuttgart.de

Direktoren
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak

Vorstand *(Stand 1.3.2017)*
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht
Prof. Dr. J.A. Sander Huisman
Jürgen Braun, PhD
apl. Prof. Dr.-Ing. H. Class
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
Dr.-Ing. M. Noack
Prof. Dr.-Ing. W. Nowak
Dr. rer. nat. J. Seidel
Dr.-Ing. K. Terheiden
Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

Emeriti
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Stellv.: Dr.-Ing. Kristina Terheiden
Versuchsanstalt für Wasserbau
Leiter: Dr.-Ing. Markus Noack

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie
Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Stellv.: Dr. rer. nat. Jochen Seidel
Hydrogeophysik der Vadosen Zone
(mit Forschungszentrum Jülich)
Leiter: Prof. Dr. J.A. Sander Huisman

Lehrstuhl für Stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak
Stellv.: Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

***VEGAS,* Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung**
Leitung: Jürgen Braun, PhD, AD
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

Verzeichnis der Mitteilungshefte

1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und
Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963

2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964

3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentrag-werke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Rand-wert- und Lastwertmatrizen*, 1965

4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und
Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht*, und
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gestehungskosten und jeweilige Vorteile*, sowie
Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber*, 1967

6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschiffahrt an diesem Wert*, 1967

7 *Sonderheft anläßlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von* Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967

8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse*, 1968

9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund*, 1968

10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften*, 1968

11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem*, 1969

12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität*, 1969

13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle*, 1969

14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion*, 1970

15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper*, 1970

16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit*, 1970

17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken*, 1970

18 Gàl, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, <u>*vergriffen*</u>

19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, <u>*vergriffen*</u>

20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971

21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von* Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972

22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972

23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972

24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, <u>*vergriffen*</u>

25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, <u>*vergriffen*</u>

26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972

27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972

28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschiffahrt durch Schwimmerhebewerke*, 1973

29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973

30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973

31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973

32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974

33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974

34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975

35 *Sonderheft anläßlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von*: Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975

36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975

37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976

38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976

39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6

40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X

41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, *vergriffen*

42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6

43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4

44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2

45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0

46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9

47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7

48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5

49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, *vergriffen*

50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen

51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5

52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen

53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen

54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X

55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen

56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6

57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen

58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangsbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2

59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen

60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen

61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2

62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebenen Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0

63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9

64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7

65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5

66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3

67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1

68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen

69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen

70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1

71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X

72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*,1991, ISBN 3-921694-72-8

73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit übeströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6

74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen

75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2

76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0

77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen

78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7

79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen

80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen

81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern,* 1993, ISBN 3-921694-81-7

82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5

83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen

84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1

85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen

86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen

87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6

88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4

89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen

90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen

91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4, vergriffen

92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien,* 1997, ISBN 3-921694-92-2

93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen

94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen 1997*, ISBN 3-921694-94-9

95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen

96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5

97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, SBN 3-921694-97-3

98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen

99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden,* 2000, ISBN 3-933761-02-2

100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4

101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen

102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0

103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9

104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7

105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien,* 2001, ISBN 3-933761-08-5

106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3

107 Josef, Reinhold:, *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7

108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5

109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3

110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instätionärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1

111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X

112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten,* 2002, ISBN 3-933761-15-8, vergriffen

113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation,* 2002, ISBN 3-933761-16-6

114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung,* 2002, ISBN 3-933761-17-4

115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen,* 2003, ISBN 3-933761-18-2

116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung,* 2003, ISBN 3-933761-19-0

117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water,* 2003, ISBN 3-933761-20-4

118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2

119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0

120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9

121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7

122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -,* 2003, ISBN 3-933761-25-5

123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance,* 2003, ISBN 3-933761-26-3

124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003,* 2003, ISBN 3-933761-27-1

125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip,* 2003, ISBN 3-933761-28-0

126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8

127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1

128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X

129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flussstauhaltungen,* 2004, ISBN 3-933761-32-8

130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Up-scaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution,* 2004, ISBN 3-933761-33-6

131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004,* Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4

132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2

133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers,* 2004, ISBN 3-933761-36-0

134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface,* 2005, ISBN 3-933761-37-9

135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7

136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers,* 2005, ISBN: 3-933761-39-5

137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments,* 2005, ISBN 3-933761-40-9

138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7

139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5

140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media,* 2005, ISBN 3-933761-43-3

141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen,* 2005, ISBN 3-933761-44-1

142 Hundecha, Hirpa Yeshewatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X

143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser,* 2005, ISBN 3-933761-46-8

144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, ISBN 3-933761-47-6

145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden,* Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4

146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes,* 2006, ISBN 3-933761-49-2

147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebeckensystemen,* 2006, ISBN 3-933761-50-6

148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4

149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2

150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhrmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006,* Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0

151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9

152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden,* 2006, ISBN 3-933761-55-7

153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5

154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models,* 2006, ISBN 3-33761-57-3

155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO_2 sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1

156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3

157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation,* 2007, ISBN 3-933761-61-1

158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines,* 2007, ISBN 3-933761-62-X

159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8

160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage, 2007,* ISBN 3-933761-64-6

161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4

162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2

163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0

164 Götzinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9

165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhrmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007,* Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7

166 Freeman, Beau: *Modernization Criteria Assessment for Water Resources Planning; Klamath Irrigation Project, U.S.*, 2008, ISBN 3-933761-70-0

167 Dreher, Thomas: *Selektive Sedimentation von Feinstschwebstoffen in Wechselwirkung mit wandnahen turbulenten Strömungsbedingungen*, 2008, ISBN 3-933761-71-9

168 Yang, Wei: *Discrete-Continuous Downscaling Model for Generating Daily Precipitation Time Series*, 2008, ISBN 3-933761-72-7

169 Kopecki, Ianina: *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling,* 2008*,* ISBN 3-933761-73-5

170 Brommundt, Jürgen: *Stochastische Generierung räumlich zusammenhängender Niederschlagszeitreihen*, 2008, ISBN 3-933761-74-3

171 Papafotiou, *Alexandros: Numerical Investigations of the Role of Hysteresis in Heterogeneous Two-Phase Flow Systems*, 2008, ISBN 3-933761-75-1

172 He, Yi: *Application of a Non-Parametric Classification Scheme to Catchment Hydrology*, 2008, ISBN 978-3-933761-76-7

173 Wagner, Sven: *Water Balance in a Poorly Gauged Basin in West Africa Using Atmospheric Modelling and Remote Sensing Information*, 2008, ISBN 978-3-933761-77-4

174 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhrmann, Matthias; Schrenk, Volker: *VEGAS-Kolloquium 2008 Ressource Fläche III*, Tagungsband zur Veranstaltung am 01. Oktober 2008 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2008, ISBN 978-3-933761-78-1

175 Patil, Sachin: *Regionalization of an Event Based Nash Cascade Model for Flood Predictions in Ungauged Basins*, 2008, ISBN 978-3-933761-79-8

176 Assteerawatt, Anongnart: *Flow and Transport Modelling of Fractured Aquifers based on a Geostatistical Approach,* 2008, ISBN 978-3-933761-80-4

177 Karnahl, Joachim Alexander: *2D numerische Modellierung von multifraktionalem Schwebstoff- und Schadstofftransport in Flüssen*, 2008, ISBN 978-3-933761-81-1

178 Hiester, Uwe: *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen,* 2009, ISBN 978-3-933761-82-8

179 Laux, Patrick: *Statistical Modeling of Precipitation for Agricultural Planning in the Volta Basin of West Africa,* 2009, ISBN 978-3-933761-83-5

180 Ehsan, Saqib: *Evaluation of Life Safety Risks Related to Severe Flooding,* 2009, ISBN 978-3-933761-84-2

181 Prohaska, Sandra: *Development and Application of a 1D Multi-Strip Fine Sediment Transport Model for Regulated Rivers,* 2009, ISBN 978-3-933761-85-9

182 Kopp, Andreas: *Evaluation of CO_2 Injection Processes in Geological Formations for Site Screening,* 2009, ISBN 978-3-933761-86-6

183 Ebigbo, Anozie: *Modelling of biofilm growth and its influence on CO_2 and water (two-phase) flow in porous media,* 2009, ISBN 978-3-933761-87-3

184 Freiboth, Sandra: *A phenomenological model for the numerical simulation of multiphase multicomponent processes considering structural alterations of porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-88-0

185 Zöllner, Frank: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, 2009, ISBN 978-3-933761-89-7

186 Vasin, Milos: *Influence of the soil structure and property contrast on flow and transport in the unsaturated zone*, 2010, ISBN 978-3-933761-90-3

187 Li, Jing: *Application of Copulas as a New Geostatistical Tool*, 2010, ISBN 978-3-933761-91-0

188 AghaKouchak, Amir: *Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copulas*, 2010, ISBN 978-3-933761-92-7

189 Thapa, Pawan Kumar: *Physically-based spatially distributed rainfall runoff modelling for soil erosion estimation*, 2010, ISBN 978-3-933761-93-4

190 Wurms, Sven: *Numerische Modellierung der Sedimentationsprozesse in Retentionsanlagen zur Steuerung von Stoffströmen bei extremen Hochwasserabflussereignissen*, 2011, ISBN 978-3-933761-94-1

191 Merkel, Uwe: *Unsicherheitsanalyse hydraulischer Einwirkungen auf Hochwasserschutzdeiche und Steigerung der Leistungsfähigkeit durch adaptive Strömungsmodellierung*, 2011, ISBN 978-3-933761-95-8

192 Fritz, Jochen: *A Decoupled Model for Compositional Non-Isothermal Multiphase Flow in Porous Media and Multiphysics Approaches for Two-Phase Flow*, 2010, ISBN 978-3-933761-96-5

193 Weber, Karolin (Hrsg.): *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 2010, ISBN 978-3-933761-97-2

194 Bliefernicht, Jan-Geert: *Probability Forecasts of Daily Areal Precipitation for Small River Basins,* 2011, ISBN 978-3-933761-98-9

195 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2010 In-situ-Sanierung - Stand und Entwicklung Nano und ISCO -,* Tagungsband zur Veranstaltung am 07. Oktober 2010 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2010, ISBN 978-3-933761-99-6

196 Gafurov, Abror: *Water Balance Modeling Using Remote Sensing Information - Focus on Central Asia,* 2010, ISBN 978-3-942036-00-9

197 Mackenberg, Sylvia: *Die Quellstärke in der Sickerwasserprognose: Möglichkeiten und Grenzen von Labor- und Freilanduntersuchungen,* 2010, ISBN 978-3-942036-01-6

198 Singh, Shailesh Kumar: *Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins,* 2010, ISBN 978-3-942036-02-3

199 Doğan, Mehmet Onur: *Coupling of porous media flow with pipe flow,* 2011, ISBN 978-3-942036-03-0

200 Liu, Min: *Study of Topographic Effects on Hydrological Patterns and the Implication on Hydrological Modeling and Data Interpolation,* 2011, ISBN 978-3-942036-04-7

201 Geleta, Habtamu Itefa: *Watershed Sediment Yield Modeling for Data Scarce Areas,* 2011, ISBN 978-3-942036-05-4

202 Franke, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen,* 2011, ISBN 978-3-942036-06-1

203 Bakimchandra, Oinam: *Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks,* 2011, ISBN 978-3-942036-07-8

204 Alam, Muhammad Mahboob: *Statistical Downscaling of Extremes of Precipitation in Mesoscale Catchments from Different RCMs and Their Effects on Local Hydrology,* 2011, ISBN 978-3-942036-08-5

205 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2011 Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken,* Tagungsband zur Veranstaltung am 06. Oktober 2011 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2011, ISBN 978-3-933761-09-2

206 Haslauer, Claus: *Analysis of Real-World Spatial Dependence of Subsurface Hydraulic Properties Using Copulas with a Focus on Solute Transport Behaviour,* 2011, ISBN 978-3-942036-10-8

207 Dung, Nguyen Viet: *Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models – development of the concept and an application in the Mekong Delta,* 2011, ISBN 978-3-942036-11-5

208 Hung, Nguyen Nghia: *Sediment dynamics in the floodplain of the Mekong Delta, Vietnam,* 2011, ISBN 978-3-942036-12-2

209 Kuhlmann, Anna: *Influence of soil structure and root water uptake on flow in the unsaturated zone,* 2012, ISBN 978-3-942036-13-9

210 Tuhtan, Jeffrey Andrew: *Including the Second Law Inequality in Aquatic Ecodynamics: A Modeling Approach for Alpine Rivers Impacted by Hydropeaking,* 2012, ISBN 978-3-942036-14-6

211 Tolossa, Habtamu: *Sediment Transport Computation Using a Data-Driven Adaptive Neuro-Fuzzy Modelling Approach,* 2012, ISBN 978-3-942036-15-3

212 Tatomir, Alexandru-Bodgan: *From Discrete to Continuum Concepts of Flow in Fractured Porous Media,* 2012, ISBN 978-3-942036-16-0

213 Erbertseder, Karin: *A Multi-Scale Model for Describing Cancer-Therapeutic Transport in the Human Lung,* 2012, ISBN 978-3-942036-17-7

214 Noack, Markus: *Modelling Approach for Interstitial Sediment Dynamics and Reproduction of Gravel Spawning Fish,* 2012, ISBN 978-3-942036-18-4

215 De Boer, Cjestmir Volkert: *Transport of Nano Sized Zero Valent Iron Colloids during Injection into the Subsurface*, 2012, ISBN 978-3-942036-19-1

216 Pfaff, Thomas: *Processing and Analysis of Weather Radar Data for Use in Hydrology*, 2013, ISBN 978-3-942036-20-7

217 Lebrenz, Hans-Henning: *Addressing the Input Uncertainty for Hydrological Modeling by a New Geostatistical Method*, 2013, ISBN 978-3-942036-21-4

218 Darcis, Melanie Yvonne: *Coupling Models of Different Complexity for the Simulation of CO_2 Storage in Deep Saline Aquifers*, 2013, ISBN 978-3-942036-22-1

219 Beck, Ferdinand: *Generation of Spatially Correlated Synthetic Rainfall Time Series in High Temporal Resolution - A Data Driven Approach*, 2013, ISBN 978-3-942036-23-8

220 Guthke, Philipp: *Non-multi-Gaussian spatial structures: Process-driven natural genesis, manifestation, modeling approaches, and influences on dependent processes*, 2013, ISBN 978-3-942036-24-5

221 Walter, Lena: *Uncertainty studies and risk assessment for CO_2 storage in geological formations*, 2013, ISBN 978-3-942036-25-2

222 Wolff, Markus: *Multi-scale modeling of two-phase flow in porous media including capillary pressure effects,* 2013, ISBN 978-3-942036-26-9

223 Mosthaf, Klaus Roland: *Modeling and analysis of coupled porous-medium and free flow with application to evaporation processes,* 2014, ISBN 978-3-942036-27-6

224 Leube, Philipp Christoph: *Methods for Physically-Based Model Reduction in Time: Analysis, Comparison of Methods and Application*, 2013, ISBN 978-3-942036-28-3

225 Rodríguez Fernández, Jhan Ignacio: *High Order Interactions among environmental variables: Diagnostics and initial steps towards modeling*, 2013, ISBN 978-3-942036-29-0

226 Eder, Maria Magdalena: *Climate Sensitivity of a Large Lake*, 2013, ISBN 978-3-942036-30-6

227 Greiner, Philipp: *Alkoholinjektion zur In-situ-Sanierung von CKW Schadensherden in Grundwasserleitern: Charakterisierung der relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen*, 2014, ISBN 978-3-942036-31-3

228 Lauser, Andreas: *Theory and Numerical Applications of Compositional Multi-Phase Flow in Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-32-0

229 Enzenhöfer, Rainer: *Risk Quantification and Management in Water Production and Supply Systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-33-7

230 Faigle, Benjamin: *Adaptive modelling of compositional multi-phase flow with capillary pressure*, 2014, ISBN 978-3-942036-34-4

231 Oladyshkin, Sergey: *Efficient modeling of environmental systems in the face of complexity and uncertainty*, 2014, ISBN 978-3-942036-35-1

232 Sugimoto, Takayuki: *Copula based Stochastic Analysis of Discharge Time Series*, 2014, ISBN 978-3-942036-36-8

233 Koch, Jonas: *Simulation, Identification and Characterization of Contaminant Source Architectures in the Subsurface*, 2014, ISBN 978-3-942036-37-5

234 Zhang, Jin: *Investigations on Urban River Regulation and Ecological Rehabilitation Measures, Case of Shenzhen in China*, 2014, ISBN 978-3-942036-38-2

235 Siebel, Rüdiger: *Experimentelle Untersuchungen zur hydrodynamischen Belastung und Standsicherheit von Deckwerken an überströmbaren Erddämmen,* 2014, ISBN 978-3-942036-39-9

236 Baber, Katherina: *Coupling free flow and flow in porous media in biological and technical applications: From a simple to a complex interface description,* 2014, ISBN 978-3-942036-40-5

237 Nuske, Klaus Philipp: *Beyond Local Equilibrium — Relaxing local equilibrium assumptions in multiphase flow in porous media,* 2014, ISBN 978-3-942036-41-2

238 Geiges, Andreas: *Efficient concepts for optimal experimental design in nonlinear environmental systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-42-9

239 Schwenck, Nicolas: *An XFEM-Based Model for Fluid Flow in Fractured Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-43-6

240 Chamorro Chávez, Alejandro: *Stochastic and hydrological modelling for climate change prediction in the Lima region, Peru*, 2015, ISBN 978-3-942036-44-3

241 Yulizar: *Investigation of Changes in Hydro-Meteorological Time Series Using a Depth-Based Approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-45-0

242 Kretschmer, Nicole: *Impacts of the existing water allocation scheme on the Limarí watershed – Chile, an integrative approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-46-7

243 Kramer, Matthias: *Luftbedarf von Freistrahlturbinen im Gegendruckbetrieb*, 2015, ISBN 978-3-942036-47-4

244 Hommel, Johannes: *Modeling biogeochemical and mass transport processes in the subsurface: Investigation of microbially induced calcite precipitation*, 2016, ISBN 978-3-942036-48-1

245 Germer, Kai: *Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität*, 2016, ISBN 978-3-942036-49-8

246 Hörning, Sebastian: *Process-oriented modeling of spatial random fields using copulas*, 2016, ISBN 978-3-942036-50-4

247 Jambhekar, Vishal: *Numerical modeling and analysis of evaporative salinization in a coupled free-flow porous-media system,* 2016, ISBN 978-3-942036-51-1

248 Huang, Yingchun: *Study on the spatial and temporal transferability of conceptual hydrological models*, 2016, ISBN 978-3-942036-52-8

249 Kleinknecht, Simon Matthias: *Migration and retention of a heavy NAPL vapor and remediation of the unsaturated zone*, 2016, ISBN 978-3-942036-53-5

250 Kwakye, Stephen Oppong: *Study on the effects of climate change on the hydrology of the West African sub-region*, 2016, ISBN 978-3-942036-54-2

251 Kissinger, Alexander: *Basin-Scale Site Screening and Investigation of Possible Impacts of CO_2 Storage on Subsurface Hydrosystems*, 2016, ISBN 978-3-942036-55-9

252 Michael Sinsbeck: *Uncertainty Quantification for Expensive Simulations - Optimal Surrogate Modeling under Time Constraints*, 2017, ISBN 978-3-942036-56-6

253 Grüninger, Christoph: *Numerical Coupling of Navier-Stokes and Darcy Flow for Soil-Water Evaporation*, 2017, ISBN 978-3-942036-57-3

254 Suroso: *Asymmetric Dependence Based Spatial Copula Models: Empirical Investigations and Consequences on Precipitation Fields*, 2017, ISBN 978-3-942036-58-0

255 Thomas Müller, Tobias Mosthaf, Sarah Gunzenhauser, Jochen Seidel, András Bárdossy: *Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3)*, 2017, ISBN 978-3-942036-59-7

Die Mitteilungshefte ab der Nr. 134 (Jg. 2005) stehen als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: www.iws.uni-stuttgart.de zur Verfügung.