

# Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation

 NIEDSIM

The logo for NIEDSIM, featuring a stylized black silhouette of a bear.

Baden-Württemberg

**BEARBEITUNG** LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg  
Postfach 100163, 76231 Karlsruhe,  
[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

Referat 41 – Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz  
Dr. Joachim Ruf, Winfried Matt

**STAND** Dezember 2008

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>1 VERANLASSUNG UND ZIEL</b>	<b>5</b>
<b>2 EIGNUNG VON NIEDERSCHLAGSREIHEN FÜR DIE LANGZEITSIMULATION</b>	<b>6</b>
2.1 Messwerte	6
2.2 Ersatzbelastungen	6
2.3 Regionalisierung	6
2.4 Synthetische Niederschlagsreihen	7
<b>3 MODELL NIEDSIM</b>	<b>9</b>
3.1 Eigenschaften der erzeugten Reihen	9
3.2 Verwendete Daten	9
3.3 Skalierungseigenschaften	10
3.4 Allgemeines zur Regionalisierung unter Anwendung von Kriging-Methoden	10
3.5 Durchführung der Parameter-Regionalisierung	11
3.6 Synthese der Niederschlagsreihen	13
3.7 Vergleich mit Messwerten	14
<b>4 VERFÜGBARKEIT DER SYNTHETISCHEN NIEDERSCHLAGSREIHEN</b>	<b>15</b>
<b>5 HINWEIS ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER UNGLEICHMÄSSIGEN ÜBERREGNUNG</b>	<b>15</b>
<b>6 BEZUGSQUELLE UND KOSTEN</b>	<b>16</b>
<b>7 LITERATUR</b>	<b>17</b>

# Zusammenfassung

Die Siedlungswasserwirtschaft befasst sich unter anderem mit Anlagen zur Ableitung, Speicherung und Behandlung von Abwasser und Regenwasser. Diese Anlagen werden zu immer komplexeren Systemen kombiniert. Die geforderte Leistungsfähigkeit wird üblicherweise als maximal zulässige Versagenswahrscheinlichkeit definiert. Zur Planung sind Langzeitsimulationsmodelle das Mittel der Wahl. Diese Modelle benötigen lange, zeitlich hochaufgelöste und lückenlose Zeitreihen des Niederschlages. Solche Reihen stehen als Messreihen im Regelfall nicht zur Verfügung. Für Planungszwecke können jedoch synthetische Reihen verwendet werden, die mit dem Programmsystem NIEDSIM erzeugt werden können.

# 1 Veranlassung und Ziel

Mit der Bereitstellung von Niederschlagsreihen sollen die Möglichkeiten zum Einsatz von Langzeitsimulationsmodellen in der Siedlungswasserwirtschaft verbessert werden. Diese Modelle haben zunehmend an Bedeutung für die Planung und Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen gewonnen.

Dies hat zwei Gründe:

- Die Anlagen zur Ableitung, Speicherung und Behandlung von Abwasser und Regenwasser werden zunehmend zu komplexen Gesamtsystemen kombiniert. In solchen Systemen entstehen vielfältige und zeitlich veränderliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Anlagen, die i. A. nur mit Langzeitsimulationsmodellen berücksichtigt werden können.
- Das Ziel von Maßnahmen wird häufig in Form von statistischen Werten angegeben (Jahresschmutzfrachten, Überstauhäufigkeiten etc.). Langzeitsimulationsmodelle berechnen aus Zeitreihen der Systembeaufschlagung (insbes. Niederschlag) Zeitreihen der Reaktion des Systems (z.B. Wasserstände im Kanal). Diese berechneten Zeitreihen der Systemreaktion werden statistisch ausgewertet. Mit dieser Auswertung wird der Nachweis erbracht, dass die Zielvorgaben eingehalten werden.

Langzeitsimulationsmodellen können allerdings nur eingesetzt werden, wenn Zeitreihen von Niederschlagswerten

- für den gesuchten Standort
- mit einer zeitlichen Auflösung von 5 bis 10 Minuten
- und in ausreichender Länge zur Verfügung stehen.

Je länger die Zeitspanne ist, über die sich die Niederschlagsreihe und damit die Modellrechnung erstreckt, desto sicherer sind die daraus abgeleiteten Aussagen. Für absolute Aussagen sollte sich der Berechnungszeitraum auf 20 bis 30 Jahre erstrecken, für den Vergleich verschiedener Planungsvarianten dürfte ein Berechnungszeitraum von 10 bis 20 Jahren ausreichen.

# 2 Eignung von Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation

## 2.1 MESSWERTE

Die Verwendung von Messwerten scheint auf den ersten Blick das Verfahren der Wahl. In vielen Fällen stellt sich aber heraus, dass die Messreihen

- nicht am richtigen Ort gemessen wurden
- nicht lang genug sind
- Lücken aufweisen
- mit versteckten Messfehlern behaftet sind.

Daher scheidet bei der Langzeitsimulation die Verwendung von gemessenen Reihen i. d. R. aus.

## 2.2 ERSATZBELASTUNGEN

Unter Ersatzbelastungen werden kurze Regenreihen verstanden, die durch Kombination und/oder Zerlegung von gemessenen Starkregen erzeugt werden. Sie werden als Modellregen bzw. Modellregenserien bezeichnet. Ihre Verwendung führt aber zu Simulationsergebnissen, die in ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit nicht einschätzbar sind. Ebenso wenig können solche Simulationsergebnisse zu Jahresmittelwerten oder dergl. zusammengefasst werden. Somit stellen Ersatzbelastungen keine geeigneten Randbedingungen für die Langzeitsimulation dar.

## 2.3 REGIONALISIERUNG

Bei der Regionalisierung von zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsreihen ( $< 6$  h) entsteht folgendes Problem:

- die Extremwerte gehen verloren
- das zeitliche Verhalten wird verfälscht

Daher ist es nicht möglich, Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation durch Regionalisierung von Messreihen zu gewinnen. Allerdings lassen sich die statistischen Parameter von Messreihen, wie

- Häufigkeitsverteilungen incl. Extremwerte
- Auto- und Kreuzkorrelationskoeffizienten

besser regionalisieren. Dies wird bei der Erzeugung von synthetischen Niederschlagsreihen ausgenutzt.



## 2.4 SYNTHETISCHE NIEDERSCHLAGSREIHEN

Synthetische Niederschlags-Reihen werden von Computerprogrammen erzeugt. Diese Programme werden als

- Niederschlagsgenerator oder
  - Stochastisches Simulationsmodell für Niederschlagsreihen
- bezeichnet.

Dabei kann die gute Regionalisierbarkeit der statistischen Parametern von Niederschlagsreihen ausgenutzt werden.

Die Entwicklung und Anwendung eines stochastischen Niederschlagsmodells kann in drei Grundschritte aufgeteilt werden:

1. Vorhandene Messreihen werden zerlegt in
  - funktionale Abhängigkeiten
  - Zufallsanteile
2. Für die Zufallsanteile können beliebig lange Reihen
  - mit der richtigen Verteilung
  - mit dem richtigen zeitlichen Verhaltenerzeugt werden.
3. Neue (synthetische) Reihen werden durch Synthese
  - der funktionalen Abhängigkeiten
  - mit den Zufallsreihenerzeugt.

Es werden also nicht die Reihen erzeugt, die tatsächlich aufgetreten sind, sondern solche, die mit der gleichen Wahrscheinlichkeit hätten auftreten können.

Die Reihen sind somit geeignet für alle Rechnungen

- zur Bemessung neuer Systeme
- zur Beurteilung bestehender Systeme

Sie sind nicht geeignet, um abgelaufene Ereignisse nachzurechnen (Vergleich gemessen-gerechnet).

Zur Erläuterung werden diese drei Grundschritte am Beispiel eines einfachen stochastischen Niederschlagsmodell dargestellt:

Beispiel: Erzeugung einer „15-Jahre-langen“ Reihe von Niederschlag-Tagessummen

#### 1. Schritt

- Messreihe (zu kurz und mit Lücken) zeigt: Im Mittel ist jeder 37. Tag ein erster Regentag.
- Wir ziehen mit einer Roulettemaschine 5.475 Zahlen.
- Die Zahlen werden in der Originalreihenfolge durchgesehen.
- Jede Zahl gilt für einen Tag der zu erzeugenden Reihe.
- Bei „Null“ wird es ein erster Regentag, ansonsten nicht.

#### 2. Schritt

- Messreihe zeigt: An 50% der Tage, die auf einen Regentag folgen, regnet es noch einmal.
- Wir ziehen für jeden Tag nach einem Regentag eine Zufalls-Zahl.
- Gerade -> nochmals Regen; ungerade -> kein Folge – Regentag.

#### 3. Schritt

- Annahme einer funktionalen Abhängigkeit für die Regenhöhe:

Höhe (Tag X) = Höhe (Tag x-1); dazu kommt: + „Zufallsanteil“

- Anhand der Messreihe wird die Häufigkeitsverteilung der Zufallsanteile bestimmt.
- Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung wird an die Häufigkeitsverteilung angepasst.
- Computer kann Zufallszahlen mit der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung erzeugen.

Für jeden Regentag wird eine Zufallszahl gezogen und in obige Formel eingesetzt.

Ein solches Einfach-Modell kann eine beliebig lange und lückenlose Niederschlagsreihe erzeugen und dabei folgende statistische Parameter der (ggf. zu kurzen und mit Lücken behafteten) Messreihe wiedergeben:

- Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von ersten und folgenden Regentagen
- Verteilung der Niederschlagshöhen
- Angenähert: zeitliches Verhalten

Die Folge von Regentagen wird aus Folgen unabhängiger Zufallszahlen erzeugt (Schritt 1 und Schritt 2). Daher können (richtigerweise) in der erzeugten Reihe auch längere Trocken-/Nassperioden auftreten, als in der Messreihe zu beobachten waren. Zur Erzeugung der Zufallsanteile in Schritt 3 wird die beobachtete diskrete Häufigkeitsverteilung durch eine entsprechend angepasste stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Wertebereich von "minus unendlich" bis "plus unendlich" ersetzt. Daher können (ebenfalls richtigerweise) in der erzeugten Reihe auch größere Niederschlagshöhen auftreten, als in der zugrundeliegenden Messreihe.

Dennoch wären die statistischen Parameter des realen Niederschlagsverhaltens einer solchen - mit einfachen Mitteln erzeugten - Reihe nicht ausreichend wirklichkeitsgetreu, um für die Langzeitsimulation eingesetzt zu werden.

Des Weiteren müssten die statistischen Parameter

- Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von ersten und folgenden Regentagen
- Zufallsanteile nach Schritt 3

unter Berücksichtigung von weiteren Messreihen an anderen Standorten noch regionalisiert werden.

# 3 Modell NIEDSIM

In den letzten Jahren wurden im Bereich der stochastischen Simulation bemerkenswerte wissenschaftliche Fortschritte gemacht. Um diese Fortschritte für die Praxis verfügbar zu machen, wurde im Jahr 2000 im Rahmen einer Projektstudie im Auftrag der LfU (jetzt LUBW) vom

Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart - Prof. Bárdossy –

das stochastische Niederschlagsmodell NIEDSIM entwickelt.

## 3.1 EIGENSCHAFTEN DER ERZEUGTEN REIHEN

Die mit NIEDSIM erzeugten Reihen haben folgende Eigenschaften:

- Die Jahressummen sind realistisch.
- Das großräumige Wetterverhalten, insbesondere auch längere nasse oder trockene Perioden, werden durch die Einbeziehung von Großwetterlagen berücksichtigt.
- Der zeitliche Ablauf der Niederschlagsereignisse ist realistisch.

Dies bedeutet, dass die Autokorrelation der Niederschlagszeitreihen realistisch ist.

Die jahreszeitlichen Schwankungen der Niederschlagscharakteristika werden berücksichtigt.

Die Skalierungseigenschaften (siehe dazu Pkt. 3.2) der künstlich generierten Niederschlagsreihen entsprechen den realen. Dies bedeutet, dass die Statistiken in jeder Aggregationsstufe (von 5 Minuten bis zu mehreren Tagen) korrekt wiedergegeben werden.

- Die Extreme des Niederschlags stimmen mit den Ergebnissen der regionalen Niederschlags- Extremwertanalyse [KOSTRA] überein.
- Bei Betrachtung mehrerer Zeitreihen wird der räumliche Zusammenhang, ausgedrückt als Kreuzkorrelation der Reihen, realistisch nachgebildet.

## 3.2 VERWENDETE DATEN

In die Entwicklung des Modells sind folgende Daten eingeflossen:

- Niederschlagsmessungen in 5-Minuten Auflösung von 104 Messstationen im Bereich Baden-Württemberg.
- Niederschlagsmessungen in 30-Minuten Auflösung von 55 Messstationen im Bereich Baden-Württemberg.
- Niederschlagsmessungen in 10-Minuten Auflösung von 8 Messstationen im grenznahen Bereich der Schweiz. (Diese wurden hinzu genommen, da die anderen zeitlich hoch aufgelösten Daten im Süden von Baden-Württemberg eine große räumliche Lücke aufweisen.)
- Die tägliche Großwetterlagen-Klassifizierung des DWD für den Zeitraum ab 1881.
- Extrema der 1-Stunden Daten aus den Ergebnissen der regionalen Niederschlags-Extremwertanalyse des DWD [KOSTRA].
- Gemessene Tagesniederschläge von 477 Messstationen des DWD. Diese bilden ein dichtes und recht homogen verteiltes Netz im Bereich Baden-Württemberg. Einzelne Messreihen reichen dabei zeitlich bis 1881 zurück.
- Das digitale Geländemodell des Bundeslandes Baden-Württemberg in einer Rasterauflösung von 1 km.

### 3.3 SKALIERUNGSEIGENSCHAFTEN

Die Fraktaltheorie [Die fraktale Geometrie der Natur, MANDELBROT, 1982] kann auch als „Lehre von der Selbstähnlichkeit natürlicher Prozesse“ bezeichnet werden. Danach ändern sich bei einer Veränderung der Auflösung (Skale) die Prozessergebnisse systematisch.

Es liegen wissenschaftliche Erkenntnisse vor, die folgendes besagen:

Bei Niederschlagsreihen gilt:

- Eine Veränderung der Aggregationszeit (5 min – 30 min – 6 h – 1 d – usw.) führt zu einer systematischen Veränderung der statistischen Eigenschaften der Reihe (Erwartungswert, Varianz, Schiefe, Autokorrelation).
- Der funktionale Zusammenhang von Aggregationszeit und statistischen Parametern folgt einem Potenzgesetz.

Bei Kenntnis dieser Selbstähnlichkeitseigenschaften von Niederschlagsreihen können z.B. die statistischen Parameter der 5-Minuten-Reihen aus den Parametern der höheren Aggregationsstufen (30 min, Stunden, Tage, Monate) extrapoliert werden. Dies bedeutet, dass die statistischen Eigenschaften für die stochastische Erzeugung von Niederschlagsreihen in 5-Minuten-Auflösung abgeschätzt werden können, auch wenn keine oder nur wenige bzw. nur kurze Messreihen vorliegen.

### 3.4 ALLGEMEINES ZUR REGIONALISIERUNG UNTER ANWENDUNG VON KRIGING-METHODEN

#### Grundzüge

Wesentliche Vorteile der geostatistischen Methoden gegenüber herkömmlichen Verfahren (z.B. Thiessen-Polygone, Inverse Distanz usw.) sind die optimale Interpolation im Sinne einer minimalen Fehlervarianz und die explizite Berücksichtigung der räumlichen Variabilität des Parameters bei der Gewichtung [Clark, 1979; Journel und Huijbregts, 1978]. Hinzu kommt, bei den fortgeschrittenen geostatistischen Verfahren, eine Berücksichtigung der Gebietseigenschaften, die auch in qualitativer Form erfolgen kann.

Der Ansatz der Geostatistik ist dabei, die beobachtete Größe als eine Zufallsfunktion aufzufassen, deren beobachtete Verteilung eine zufällige Realisierung ist. Die räumlichen Verteilungseigenschaften können in Form eines Variogramms analysiert werden, das im Prinzip einem Punktepaar eine Varianz abhängig von der Distanz zwischen den Punkten zuordnet. Mit Hilfe des Variogramms lässt sich bei einem Interpolationsansatz, abhängig von den Gewichten für die einzelnen bekannten Punkte, eine Varianz der Interpolationsschätzung berechnen. Kriging basiert nun darauf, keine feste Struktur der Interpolationsgewichte vorzugeben, sondern die Schätzvarianz zu minimieren und daraus dann die Gewichte zu bestimmen. Wird dieses Verfahren mit der Annahme angewandt, dass die Verteilungsfunktion überall den gleichen Erwartungswert hat (Stationarität), und dass die Schätzung erwartungstreu erfolgen soll, so erhält man das Ordinary Kriging Verfahren (OK) [Matheron 1971].

#### Berücksichtigung von Zusatzinformation

Bei nicht stationären Zufallsfunktionen, bei denen es eine Hilfsvariable gibt, die linear mit dem Verlauf der zu schätzenden Variablen zusammenhängt, kann das External-Drift-Kriging (EDK) [Ahmed and de Marsily 1987] angewandt werden. Hierbei wird angenommen, dass es eine zweite Variable gibt, und dass sich der bedingte Erwartungswert der zu interpolierenden Größe als eine lineare Funktion dieser zweiten Variable ausdrücken lässt. Zusammen mit dem allgemeinen Kriging-Ansatz ergibt sich so ein verbesserter Schätzer für die zu interpolierende Größe. Die Hilfsvariable muss dazu an allen Orten bekannt sein.

Die Auswahl der Hilfsvariable spielt eine zentrale Rolle bei der Anwendung dieser Methode, es gibt eine große Anzahl von Möglichkeiten:

- ein korrelierter Parameter, der flächendeckend bekannt ist (z.B. Digitales Geländemodell)
- ein korrelierter Parameter, der an mehr Orten verfügbar ist (dieser muss zunächst selber interpoliert werden, z.B. Parameter des Tagesniederschlags).
- frühere für den Parameter berechnete Interpolationen, die auf einer besseren Datenlage beruhen (z.B. Daten 1971 -95 als Hilfsvariable für Daten aus dem 19. Jahrhundert).

Alle drei Anwendungssituationen treten in dieser Arbeit auf.

Die lineare Gleichung der Abhängigkeit der beiden Variablen muss nicht explizit ermittelt werden, sondern wird bei der Lösung des Kriging-Systems automatisch bestimmt. Falls die Hilfsvariable nicht mit den Beobachtungen korreliert ist, wird sie bei der Interpolation praktisch vernachlässigt.

### 3.5 DURCHFÜHRUNG DER PARAMETER-REGIONALISIERUNG

Die Regionalisierung der Parameter erfolgte mit dem External-Drift-Kriging. Dabei diente als Hilfsvariable häufig das digitale Geländemodell (DGM), da die Orographie eine wichtige Rolle für den Niederschlag spielt, ist dieses mit fast allen Parametern korreliert. In Fällen, in denen diese Korrelation nicht ausreichend ist, wurden bei dieser Untersuchung Hilfsvariablen (meist aus den Tagesdaten) ermittelt, deren Korrelation signifikant ist, diese selbst wiesen meist eine signifikante Korrelation zum DGM auf und wurden mit diesem als Hilfsvariable interpoliert.

Die folgenden Abschnitte gehen im einzelnen auf die Regionalisierung der verschiedenen Parameter ein, die für den Niederschlags - Generator benötigt werden.

#### Halbjahres-Summen

Da die Niederschlagssummen der Halbjahre aus allen vorliegenden Niederschlagsdaten berechnet werden können, ist die Datenbasis sehr gut. Tagesdaten sowie zeitlich hoch aufgelöste Daten können verwendet werden, Datenlücken wurden ggf. kompensiert. Bei genauer Betrachtung gilt dieses aber nur für die Jahre ab 1970, während sich die Anzahl der Messstationen davor deutlich reduziert. Um auch die frühen Jahre ab 1881 berechnen zu können, wurde eine Hilfskarte mit dem mittleren Tagesniederschlag jeweils für den Sommer und den Winter erstellt. Wenn möglich, wurde dieser Wert aus den Niederschlagsdaten 1971 bis 1995 berechnet. Mit der Auswahl eines festen längeren Zeitraums sollte erreicht werden, dass nicht eine zufällige Häufung von besonders nassen oder trockenen Jahren in der Messzeit einer Station das Ergebnis verfälscht. Bei Stationen, die in dem ausgewählten Zeitraum keine Daten aufweisen wurde stattdessen der mittlere Tagesniederschlag aus allen vorhanden Daten berechnet. Als externe Hilfsvariable für diese Grundkarten diente das DGM.

Mit diesen Hilfskarten wurden dann für alle Halbjahre vom Winter 1881 bis Sommer 1996 Karten der Halbjahres-Niederschlagssumme erstellt.

### **Großwetterlagen-abhängige Mittelwerte**

Ein wichtiges Element um die simulierten Zeitreihen an das reale Wetterverhalten des entsprechenden Zeitraumes anzupassen, ist die Berücksichtigung der Großwetterlagen. Sie weisen jedem Tag die statistischen Eigenschaften der jeweils herrschenden Wetterlage zu. Hierzu wurden die vom DWD entwickelte Einteilung in 29 Großwetterlagen [Hess & Brezowsky, 1969] benutzt, die nochmals in 4 statistisch signifikant unterschiedliche Gruppen zusammengefasst wurden. Basierend auf dieser Einteilung wurden die statistischen Kenngrößen Erwartungswert und Niederschlagswahrscheinlichkeit für die Tagesdaten ab 1971 für alle Messstation und Großwetterlagen-Gruppen, jeweils für Winter- und Sommerhalbjahr getrennt berechnet. Da es zu den charakteristischen Eigenschaften der Großwetterlagen gehört, dass ihre Eigenschaften langfristig konstant sind, sind diese Statistiken auch auf die Jahre vor 1971 übertragbar. Aus diesen Daten wurde dann für jede Großwetterlagen-Gruppe jeweils für Winter- und Sommerhalbjahr eine Karte für Erwartungswert und Wahrscheinlichkeit des Niederschlags berechnet. Die Interpolation erfolgte mit EDK, als externe Hilfsvariable diente das DGM.

### **Autokorrelation und Kreuzkorrelationen**

Für den Niederschlags - Generator werden Autokorrelationen in verschiedenen Aggregationsstufen und Schrittweiten benötigt. Zunächst wird für jede Schrittweite der Autokorrelation eine Karte der Tagesdaten berechnet, diese benutzt das DGM als externen Drift. Diese Karte wiederum dient als externer Drift für alle Karten mit kleinerer Datenaggregation. Diese Berechnung wird für eine Reihe repräsentativer Jahre (1984 – 89) jeweils separat durchgeführt, analog wird auch eine mit dem Jahresgang gewichtete saisonale Autokorrelation des Jahres berechnet und als Karte erstellt.

Für Jahre ohne zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten wird jeweils anhand der Korrelation zu anderen Parametern eine der repräsentativen Jahreskarten ausgewählt und als Parameter der Simulation und Disaggregation zugrunde gelegt.

Für die räumliche Korrelation der simulierten Daten wurde eine Referenzstation festgelegt, bei jeder Simulation wird die Kreuzkorrelation der beiden Reihen (neu simulierte Reihe zur Referenzstation) berücksichtigt. Hier wurde die Station „Holzgerlingen-Altdorf-Schnapseiche“ gewählt, da sie eine lange, fast lückenlose Datenreihe, eine optimale zentrale Lage und durchschnittliche Charakteristika hat.

Um die Simulation eines Punktes mit der Referenzstation zu korrelieren wird die Kreuzkorrelation für die 1-Stunden Daten und Tagesdaten benötigt. Diese werden analog zu den Autokorrelationen bestimmt: die Tageswerte werden mit Hilfe der Höhendaten berechnet und dienen wiederum als Hilfsvariable für die 1 Stunden Werte.

### **Gammaverteilung**

Für die Gammaverteilung des Stunden-Niederschlags werden 2 Parameter benötigt, diese werden jeweils mit Hilfe einer Karte der jeweiligen Tageswert-Verteilung berechnet. Diese Berechnung erfolgt aus allen verfügbaren Daten gemeinsam und wird dann für alle Jahre verwendet. Die Berechnung der Tageswerte erfolgt mit den Höhendaten als externem Drift.

### **Skalierungsfaktoren der Momente**

Weitere für die Simulation benötigte Eingangsgrößen sind die Exponenten der Skalierungsfaktoren der drei ersten Momente (Erwartungswert, Varianz und Schiefe) der Niederschlagsverteilungen. Diese Exponenten beschreiben die Veränderung der Momente bei einer Veränderung der Aggregationsstufen (entspr.: Auflösung

/(Skale). Sie wurden aus den Aggregationsstufen zwischen einer Stunde und einem Tag ermittelt und dienen unter anderem der wirklichkeitsgetreuen Wiedergabe der Momente in der Aggregationsstufe 5-Minuten. Die Exponenten wurden analog zu den Parametern der Gammaverteilung regionalisiert.

#### **Extremwerte**

Wenn erforderlich, wurden für eine genauere Anpassung des Niederschlags - Generators an die lokalen Extrema der Verteilung die von der Gammaverteilung erzeugten Werte an die Niederschlags-Extremwertanalyse des DWD [KOSTRA] angepasst. Dabei wurden für die Stundenwerte die Maxima mit Jährlichkeiten von 1 Jahr und 100 Jahren benutzt. Da diese bereits als Rasterdaten vorlagen wurden sie lediglich mit EDK auf das für diese Arbeit verwendete feinere Raster interpoliert.

#### **Überschreitungswahrscheinlichkeiten**

Desweiteren wurden die Überschreitungswahrscheinlichkeiten für drei hohe Werte bei den 5 Minuten-Daten ermittelt und als Karte berechnet. Diese wurde mit dem mittleren Tagesniederschlag als externem Drift interpoliert.

### **3.6 SYNTHESE DER NIEDERSCHLAGSREIHEN**

Im folgenden soll kurz der in diesem Projekt entwickelte Ansatz für die Synthese der Niederschlagsreihen dargestellt werden. Da der Niederschlag das Ergebnis komplexer atmosphärischer Prozesse ist und einen teils chaotischen Charakter hat, ist die direkte Modellierung sehr schwierig. Dieses gilt noch stärker für hoch aufgelöste Niederschlagsreihen, die mit meteorologischen Modellen nicht erstellt werden können. Sämtliche stochastischen Modelle haben bei der Modellierung große Schwierigkeiten mit den unterschiedlichen Zeitskalen. Generiert man z.B. Stundenwerte werden die Eigenschaften der akkumulierten 3 oder 6 Stunden Reihen nicht mehr korrekt wiedergeben. Deswegen wurde hier ein neuartiger, auf Simulated Annealing basierender Ansatz gewählt [Aarts & Korts, 1989]. Eine ausführlichere Darstellung dieses Verfahren und der Gründe für die Wahl eines so aufwendigen Ansatzes findet sich in Bárdossy et. al. (2000).

#### **Simulation der Stundenwerte**

Die hier angewandte Methode unterscheidet sich deutlich von den herkömmlichen Methoden. Bei den herkömmlichen Modellen werden die in der Zeit aufeinanderfolgenden Werte des Niederschlags sukzessive, entsprechend ihrer zeitlichen Reihenfolge, generiert, also eine Zeitreihe Schritt für Schritt durch Anhängen neuer Werte aufgebaut. Beim Simulated Annealing Ansatz hingegen wird eine vollständige Anfangs-Zeitreihe (erzeugt mit einem stochastischen Einfach-Modell) durch Variation der Werte so lange verbessert, bis die Eigenschaften stimmen. So existiert immer eine vollständige Zeitreihe, deren Eigenschaften ermittelt und entsprechend den vorgegebenen Anforderungen verbessert werden können. Bei diesem Modell ist es deshalb möglich die unterschiedlichen Zeitskalen zu berücksichtigen. Für die Generierung können die Eigenschaften des Niederschlages ausgewählt werden, die für die Anwendung besonders wichtig sind. Diese entsprechen in diesem Projekt den Parametern, deren Regionalisierung oben dargestellt wurde: Halbjahres-Summen, Statistiken der Großwetterlagen, mittlere und saisonale Autokorrelation, Kreuzkorrelation zu einer Referenzstation, eine Gammaverteilung des Niederschlags, Skalierungseigenschaften ausgedrückt über Exponenten der Momente und die Extrema. Das Niederschlagsmodell fasst diese Eigenschaften in Form einer Zielfunktion zusammen, um dann schrittweise Reihen zu erstellen, bei denen diese Zielfunktion optimiert wird. Die Zielfunktion misst dabei den Unterschied der Eigenschaften der generierten Zeitreihe und der erwünschten Eigenschaften. Die Optimierung der Zielfunktion und damit die Generierung der Niederschlags-Zeitreihe erfolgt mit dem Simulated Annealing Algorithmus. Details über das Modell sind in Bárdossy (1998) zu fin-

den.

Aufgrund des hohen Rechenaufwands, die der Simulated Annealing Algorithmus erfordert, wird die Simulation des zeitlich hoch aufgelösten Niederschlags nicht in einem einzelnen Schritt berechnet, sondern zunächst nur eine Niederschlagsreihe mit der zeitlichen Auflösung von 1 Stunde generiert.

#### Disaggregation zu 5-Minuten-Werten

Als zweiter Schritt wird die Niederschlagsreihe der 1-Stunden Werte in eine feinere mit 5 Minuten-Werte disaggregiert, wobei die vorgegebene Stundensumme erhalten bleibt. Die Disaggregation erfolgt ebenfalls mit dem Simulated Annealing Algorithmus. Die Zielfunktion setzt sich dabei nur noch aus der mittleren und saisonalen Autokorrelation und den Skalierungseigenschaften zusammen, alle anderen Parameter sind bereits durch ihre Berücksichtigung bei den Stundenwerten in die Datenreihe ausreichend eingegangen.

### 3.7 VERGLEICH MIT MESSWERTEN

Als Beispiel für die stochastische Simulation von zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsreihen werden hier die Ergebnisse für den Ort der Station „Waldachtal-Tumlingen“ für die Jahre 1980 – 91 vorgestellt und mit den tatsächlichen Messdaten dieser Station verglichen. Die synthetischen Niederschlagszeitreihen wurden gemäß dem oben beschriebenen Verfahren berechnet. Die Tabelle 1 zeigt die Charakteristika der simulierten Zeitreihe im Vergleich zu denen der Messdaten. Es wurden unabhängig voneinander zwei Simulationen jeweils des Zeitraums 1980 bis 1991 vorgenommen, aus dem auch die vorhandenen Stationsdaten stammen. Dabei ist deutlich zu sehen, dass die Simulation in der Lage ist die wesentlichen Parameter korrekt nachzubilden. So werden Mittelwert und Varianz mit hoher Präzision reproduziert, ebenso die Autokorrelationseigenschaften und z.B. die Überschreitungswahrscheinlichkeit für das Limit 0,95 mm. Bei den Extremwerten kann zwar nicht eine ebenso präzise Wiedergabe erzielt werden, aber hier ist zu bedenken, dass diese Parameter mit größeren statistischen Unsicherheiten verbunden sind. Deshalb kann auch hier ein insgesamt gutes Nachbildungsverhalten beobachtet werden, mit einer gewissen Überschätzung der Perzentile und Unterschätzung des Mittelwerts der absoluten Jahresmaxima der 11-Jahre-Zeitreihe. Auch die Eigenschaften der höheren Aggregationsstufen (z.B. 1 Stunde) werden von der Simulation korrekt wiedergegeben.

Tabelle 1: Vergleich simulierter und gemessener Daten am Ort der Messstation „Waldachtal-Tumlingen“, 5-Minuten-Werte

Parameter	Messwerte	Simulation 1	Simulation 2
Mittelwert	0,0099 mm	0,0100 mm	0,0100 mm
Varianz	0,00413 mm <sup>2</sup>	0,00411mm <sup>2</sup>	0,00413 mm <sup>2</sup>
Mittelwert der Jahresmaxima	6,18 mm	5,44 mm	5,16 mm
99%-Perzentil	0,40 mm	0,45 mm	0,45 mm
Autokorrelation (step1)	0,739	0,746	0,745
Anteil über 0,95 mm	0,16%	0,17%	0,17%
<b>Stunden-Aggregation:</b>			
Mittelwert	0,364 mm	0,370 mm	0,368 mm
Varianz	0,844 mm <sup>2</sup>	0,871 mm <sup>2</sup>	0,866 mm <sup>2</sup>
Mittelwert der Jahresmaxima	19,2 mm	18,7 mm	15,5 mm
99%-Perzentil	3,95 mm	4,15 mm	4,01 mm
Autokorrelation (step1)	0,493	0,497	0,507

**LU:W**

# 4 Verfügbarkeit der synthetischen Niederschlagsreihen

Mit NIEDSIM können Niederschlags-Reihen in 5-min-Zeitraaster erzeugt werden.

Die Abgabe kann in zwei Formaten erfolgen:

- MD-Format (passend z.B. zum Schmutzfrachtmodell KOSIM und N-A-Modell HYSTEM-EXTRAN)
- SMUSI-Format (passend z.B. zu den Schmutzfrachtmodellen SMUSI und Moment)

Die Reihen können bei der LUBW angefordert werden. Dazu ist lediglich der gewünschte Standort (Rechts- und Hochwert) und das gewünschte Format anzugeben. Standardmäßig werden die Reihen in Anlehnung an die Großwetterlagen der Jahre 1974–2003 erzeugt.

# 5 Hinweis zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Überregnung

Siedlungswasserwirtschaftliche Modelle sind meist in der Lage, für Teile des Entwässerungsgebietes unterschiedliche Regenreihen zu verwenden. Damit kann z.B. berücksichtigt werden, dass kurze und heftige Regenereignisse i. d. R. nicht das Gesamtgebiet betreffen, oder dass ggf. in Teilen des Gesamtgebietes generell höhere Niederschläge fallen.

Mit dem stochastischen NIEDSIM-Modell können Regenreihen für jeden beliebigen Punkt in Baden-Württemberg erzeugt werden. Es ist allerdings derzeit nur möglich, zueinander passende NIEDSIM-Reihen für mehrere Standorte zu generieren, wenn diese Standorte mehr als 5 bis 10 km voneinander entfernt liegen. Liegen die Standorte näher zusammen, werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Regenreihen überbetont.

Soll dennoch die Auswirkung einer ungleichmäßigen Überregnung abgeschätzt werden, kann hilfsweise wie folgt vorgegangen werden:

1. Durchführung der Modellrechnungen mit einer Regenreihe für die Mitte des Planungsgebietes. Die Ergebnisse berücksichtigen die Auswirkungen einer ungleichmäßigen Überregnung nicht.
2. Durchführung der Modellrechnungen mit mehreren Regenreihen. Die Auswirkungen einer ungleichmäßigen Überregnung werden überschätzt.
3. Bewertung der Modellergebnisse.

Da bislang noch keine Erfahrungen dazu vorliegen, wird empfohlen, bei dieser Bewertung die LUBW (Sachgebiet 41.1, Gewässerschutz, Kommunales Abwasser, Digitales Gewässernetz) hinzuzuziehen. Derzeit wird eine weitere Entwicklungsstufe von NIEDSIM getestet. Damit wird es möglich sein, unabhängig von der Entfernung der Standorte, mehrere zueinander passende Reihen zu erzeugen.

# 6 Bezugsquelle und Kosten

Die Niederschlagsreihen können bei der

LUBW, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg  
Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe  
Referat 41.1 – Gewässerschutz, Kommunales Abwasser, Digitales Gewässernetz –

bezogen werden.

Es entstehen Verwaltungskosten von ca. 115 Euro pro Reihe.

Kontakt: Tel. 0721/5600-26 99 [abteilung4.post@lubw.bwl.de](mailto:abteilung4.post@lubw.bwl.de)

# 7 Literatur

AARTS, E. UND KORTS, J. (1989): Simulated Annealing and Boltzmann Mashines, John Wiley and Sons, New York

AHMED, S UND DE MARSILY, G. (1987): Comparison of Geostatistical Methods for Estimating Transmissivity Using Data on Transimissvity and Specific Capacity, Water Resources Research, 23, 1717-1737

BÁRDOSSY, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing, Water Resources Research, 34, 1737-1744

BÁRDOSSY, A., GIESE, H., HALLER, B. UND RUF, J. (2000): Erzeugung synthetischer Niederschlagsreihen in hoher zeitlicher Auflösung für Baden-Württemberg, zur Veröffentlichung in: Wasserwirtschaft

BÁRDOSSY, A., GIESE, H., HALLER, B. UND RUF, J. (2000): Regionalisierte Niederschlagsreihen im 5-Minuten-Zeitraster für Baden-Württemberg, zur Veröffentlichung in: Korrespondenz Abwasser

BARTELS, H. U. A. (1997): KOSTRA-Atlas "Starkniederschlagshöhen in Deutschland", Offenbach a. Main, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

CLARK, I. (1979): Practical Geostatistics. Applied Science Publishers, London.

HESS, P. UND BREZOWSKY, H. (1969): Katalog der Großwetterlagen Europas, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 113, Bd. 15, 2. neu bearbeitete und ergänzte Aufl., Offenbach a. Main, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

JOURNEL, A. G. UND HUIJBREGTS, C. J. (1978): Mining Geostatistics. Academic Press, London, New York, San Francisco.

MANDELBROT, B. (1982): The Fraktal Geometrie of Nature. W.H. Freeman and Company, New York

MATHERON, G. (1971): The Theory of Regionalized Variables and its Applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique , Fasc. 5.

