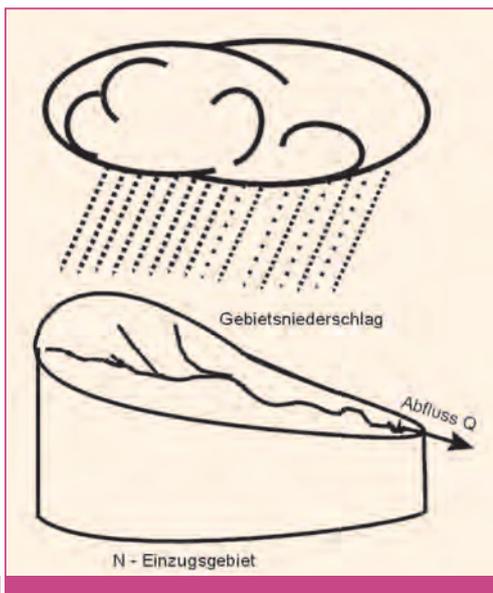


Regen-Vorhersagen

Niederschlagsmessung und Klimaveränderung



Die optimale Bewirtschaftung der Ressource Wasser wird vor dem Hintergrund der zu erwartenden Klimaänderungen immer wichtiger werden. Es bedarf detaillierter hydrologischer Messungen und Modellierungen, um geeignete Werkzeuge des Wasserressourcen Managements zu entwickeln. In diesem Beitrag werden die Niederschlagsmessung mit Wetterradar, die stochastische Genierung von Niederschlagsdaten sowie Aspekte der hydrologischen Modellierung vorgestellt.

verfügbar. Diese liefern zwar allgemein gute Ergebnisse, aber gerade die quantitative Vorhersage des Niederschlags ist weiterhin sehr ungenau. Zudem ist die zeitliche Reichweite dieser Modelle begrenzt. Für längere Zeiträume (Monate oder Jahreszeiten) können nur sehr ungenaue Angaben gemacht werden. Für die Planung wasserwirtschaftlicher Anlagen ist jedoch die Kenntnis der Wetterverhältnisse über mehrere Jahre notwendig. Da deterministische Methoden solche Prognosen nicht leisten können, wird zumeist mit der Annahme gearbeitet, dass sich die Zukunft – statistisch betrachtet – wie die Vergangenheit verhält. Nur unter dieser Annahme können die vergangenen Beobachtungen direkt als Abschätzung der Zukunft verwendet werden.

Durch das sich offensichtlich ändernde Klima wird diese Annahme heute in Frage gestellt. Es ist nicht klar, in wieweit die bisherige Bemessungspraxis geändert werden muss. Eine sinnvolle Kombination von Messungen und Klimavorhersagen muss gefunden werden, um zukünftige Risiken zu vermeiden.

Der gesamte Wasserkreislauf wird von einer Vielzahl von Prozessen beeinflusst, die erfasst und verstanden werden müssen. Daher werden die Prozesse zu Modellen zu-

1. Einleitung

Regen und Oberflächengewässer (Bäche, Flüsse und Seen) sind die wichtigsten Wasserressourcen für das menschliche Leben. In den meisten Teilen der Erde hat sich die Bevölkerung an die Verteilung des zumeist durch Niederschlag verfügbaren Wassers angepasst. Um häufige Schwankungen der Niederschlagsmengen und die daraus folgenden Hochwasser und Dürren überwinden zu können, ist die Bewirtschaftung der Wasserressourcen notwendig. Dieses kann nur bei guter Kenntnis der natürlichen Schwankungen geleistet werden.

Hydrologische Planung und die Bewirtschaftung von natürlichen Ressourcen ist immer mit hohen Unsicherheiten behaftet. Um optimale Entscheidungen treffen zu können, wäre eine ausreichende Kenntnis der zukünftigen Niederschläge und Abflüsse notwendig. Für kurze Zeiträume sind Vorhersagemodelle der Meteorologie

sammengefasst und dabei vereinfacht. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen physikalisch-deterministischen und stochastischen (d.h. indeterministischen) Modellen. Beide sind auf beobachtete oder gemessene Daten als Eingangsgrößen angewiesen.

Der Lehrstuhl für Hydrologie und Geo-hydrologie befasst sich mit allen Aspekten dieser Modellierung, von den Niederschlagsdaten als Modellinput bis zu den simulierten Abflüssen. Im Folgenden stellen wir drei der Arbeitsgebiete vor.

2. Niederschlagsmessungen mittels Radar

Als wichtigster Eingangsgröße für die hydrologische Modellierung kommt der möglichst akkuraten Messung des Niederschlags eine besondere Bedeutung zu. Niederschlagsmessgeräte, die zur Standardausstattung einer meteorologischen Messstation gehören, registrieren den Niederschlag in einem Auffanggefäß mit einer genormten Fläche von 200 Quadratzentimetern. Üblicherweise wird in einem Intervall von einer bis zu fünf Minuten die Gewichtsveränderung des Auffanggefäßes gemessen, was direkt der gefallen Niederschlagsmenge an diesem Ort entspricht. Dies wird bis heute noch als das quantitativ genaueste Verfahren betrachtet, auch wenn Forschungen zeigen, dass sich die gemessenen Niederschlagsmengen an Geräten, die nur wenige Meter voneinander entfernt sind, deutlich unterscheiden können.

Aufgrund der hohen Vorraussetzungen und des damit verbundenen Aufwands, eine meteorologische Messstation zu betreiben, ist die Stationsdichte in den meisten Ländern begrenzt. In Deutschland, das ein relativ dichtes Messnetz betreibt, beträgt die Stationsdichte ca. eine Station pro 150 bis 300 Quadratkilometern. Dies ist ausreichend, um das großräumige Niederschlagsgeschehen zu erfassen. Um aber effektiv vor Überflutungen durch Starkregenereignisse zu warnen, reicht diese Stationsdichte nicht aus, da solche Ereignisse eine meist viel geringere Ausdehnung haben und somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Ereignis von einer Niederschlagsstation aufgezeichnet wird, gering ist.

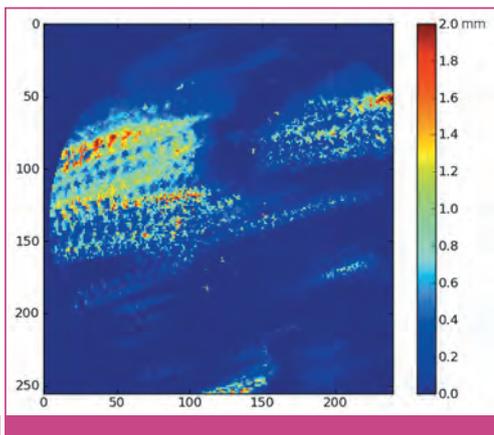
Als während des zweiten Weltkriegs entdeckt wurde, dass auf den damals nur zur

Luftraumüberwachung eingesetzten Radaren auch Niederschlagsfelder zu sehen waren, begannen sofort Forschungen, sich diesen Effekt auch direkt zur Niederschlagsmessung zu Nutze zu machen. Heute sind in vielen Ländern teils flächendeckende Wetterradarnetzwerke in Betrieb. Wetterradar nutzt die Rückstreuung hochfrequenter (2 – 24 GHz) elektromagnetischer Wellen an den Wasser- und Eisteilchen von Regen und Schnee, um deren Ort und Menge zu detektieren. Mittels einer rotierenden Antenne, deren Winkel gegen die Horizontale sich ebenfalls verändern lässt, kann so innerhalb von fünf bis fünfzehn Minuten ein dreidimensionales Bild des Niederschlagsgeschehens in einem Umkreis von 130 Kilometern mit einer durchschnittlichen Auflösung von einem Quadratkilometer erzeugt werden. Durch das indirekte Messverfahren und die hohe Reichweite enthalten Niederschlagsdaten auf Radarbasis allerdings eine Reihe von Fehlern, die sich quantitativ teils drastisch auswirken können. Zu den augenfälligsten Fehlern gehören Echos von nichtmeteorologischen Zielen, wie z.B. Flugzeugen, Schiffen, Vogel- und Insektenschwärmen, vor allem aber von Gebäuden in der Nähe des Radars oder von Geländeerhebungen. Diese reflektieren die Radarstrahlung in nicht unerheblichem Maß und erscheinen bei direkter Umrechnung als Gebiete mit konstant hohem Niederschlag. Dieser Niederschlag darf natürlich nicht an die hydrologische Modellkette weitergereicht werden, so dass effektive Filter für diese Fehlerart gefunden werden müssen, mit denen sicher zwischen nicht-meteorologischen und meteorologischen Echos unterschieden werden kann.

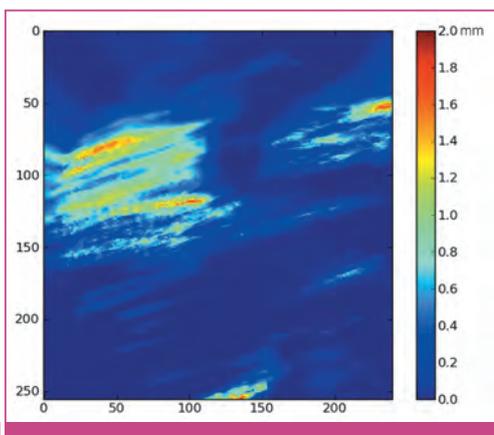
Ein weiterer Fehler wird erst bei der Summation mehrerer Einzelbilder ersichtlich. In dem Zeitraum zwischen der Aufnahme zweier Radarbilder bewegen sich die Niederschlagsfelder mit dem Wind weiter. Bei hohen Windgeschwindigkeiten und räumlich begrenzten Ereignissen (z.B. Gewittern) kommt es vor, dass in der Summe die gleiche Niederschlagszelle als mehrere Einzelzellen erscheint (01) und das Gelände unter der Bahn des Ereignisses nicht kontinuierlich überregnet erscheint. Durch die Berechnung des Verlagerungsfeldes aus aufeinanderfolgenden Einzelbildern kann der Ort der Niederschlagszelle an verschieden fein wählbaren Zeitpunk-

SUMMARY

The current discussion about climate change has also raised questions about the future management of water resources. Therefore, there's a need for detailed hydrological measurements and models in order to develop appropriate tools for water resources management. In this chapter, we discuss the advantages and problems of precipitation measurement using weather radar and the stochastic generation of precipitation time series. Furthermore, we also present some general aspects of hydrological modelling.



ten zwischen zwei Aufnahmen abgeschätzt und ein realistischeres Niederschlagsbild erzeugt werden (02). Eine weitere Fehlerquelle, die die Hochwasservorwarnung stark negativ beeinflusst, ist die Dämpfung des Radarsignals durch Niederschlag. Ähnlich der Verringerung der Sichtweite bei Nebel, erzeugt die starke Streuung des Radarstrahls in starken Niederschlagsfeldern eine überproportionale Abnahme des Signals mit der Entfernung. Obwohl es im Prinzip möglich ist, diesen Effekt über Beziehungen zwischen der gemessenen Rückstreuung und der daraus resultierenden Dämpfung theoretisch zu berechnen, führen selbst kleine Fehler in den Grundannahmen zu unrealistischen Korrekturen. Dies kann durch Dämpfungsreferenzen vermieden werden. Aktuelle



Forschungen nutzen hierzu die Information von Mikrowellenrichtfunkverbindungen. Diese werden auch von Mobilfunkbetreibern verwendet, weshalb diesen Ansätzen großes Potenzial zugeschrieben wird; allerdings unter der Einschränkung, dass sich die meisten kommerziellen Richtfunkverbindungen in Ballungsräumen befinden. In ländlichen Gebieten wäre eine Korrektur auf andere Referenzen angewiesen.

Auch nachdem das Radarbild vollständig korrigiert ist, zeigen sich immer noch Diskrepanzen zu Stationsmessungen. Dies hängt auch damit zusammen, dass Niederschlagsstation und Radar an unterschiedlichen Orten messen – der Radar in größerer Höhe, die Messstation am Boden. Außerdem werden bei der Umrechnung der zurückgestreuten Radarstrahlung in Niederschlagsintensitäten Annahmen über die Größenverteilung der Regentropfen bzw. der Schnee- und Eispartikel gemacht, die räumlich wie zeitlich hochvariabel sind.

Moderne Radarsysteme bieten mit zusätzlichen Polarisationsinformationen die Möglichkeit, genauer auf die Größenverteilung der Niederschlagspartikel zu

schließen und auch genauer auf die Dämpfung eingehen zu können. Bis diese Daten aber flächendeckend verfügbar und für alle davor liegenden Zeiträume ermittelt sind, werden die korrigierten Daten auf statistischem Wege noch an die Werte der Niederschlagsstationen angepasst. Hierzu wurde am Lehrstuhl das Konzept des Conditional Mergings entwickelt, das auf der geostatistischen Methode des Kriging beruht, also der Interpolation von Werten für Orte, von denen keine Messwerte vorliegen. Hierbei werden die Radardaten zunächst auch nur an den Stationsorten betrachtet und ähnlich wie diese mittels Kriging interpoliert. Die Abweichung zwischen dem interpolierten Stations- und dem interpolierten Radarfeld wird danach auf das ursprüngliche Radarbild aufgeprägt. Somit bleibt die Variabilität des Radarbilds erhalten, die Werte werden aber auf das Niveau der Stationsdaten korrigiert. Dieses Konzept wird aktuell dahingehend weiterentwickelt, andere Interpolationsmethoden zu finden, die die statistischen Eigenschaften des Niederschlags besser berücksichtigen können, als dies Kriging tut.

3. Simulierte Niederschlagsdaten

Wasserbauliche Strukturen sind sehr langfristige und in der Regel sehr kapitalintensive Investitionen. Beim Bau von Staudämmen, Rückhaltebecken, Hochwasserdämmen oder Kanalnetzen wird nicht selten ein Planungshorizont von 50 bis 100 Jahren und mehr betrachtet. Die richtige Dimensionierung solcher Bauwerke ist darum im Hinblick auf die zu erwartenden hydraulischen Anforderungen, die Gefahrenabwehr (z.B. dem Risiko, dass ein Damm überspült werden könnte) und den effizienten Einsatz der finanziellen Mittel besonders wichtig.

Für die unterschiedlichen Arten hydraulischer Strukturen sind dabei ganz unterschiedliche Belastungen maßgebend. Für ein großes Staubaupwerk beispielsweise ist das Niederschlagsvolumen im gesamten Einzugsbereich oberhalb der Talsperre ausschlaggebend. Eine Gefahr besteht hier, wenn großräumig und über einen längeren Zeitraum extrem viel Niederschlag fällt. Ganz anders die Situation in der Stadtentwässerung: Ein Kanalnetz reagiert innerhalb von wenigen Minuten auf ein Niederschlagsereignis. Für die Fra-

ge, ob ein Kanalnetz einer Belastung standhält oder ob es zu Rückstau und Überflutungen kommt, ist somit viel weniger das gesamte Volumen eines Niederschlagsereignisses entscheidend, als vielmehr die maximal auftretende Intensität. Die statistischen Eigenschaften von Niederschlag hängen stark davon ab, welche räumliche und zeitliche Skala man betrachtet. Die höchsten Niederschlagsintensitäten entstehen in Mitteleuropa typischerweise bei Gewittern. Diese sind relativ kurzlebig (bis zu wenigen Stunden) und eher kleinräumig in ihrer Ausdehnung (bis zu einigen Quadratkilometern). Sie können aber vor allem in gebirgigen Einzugsgebieten zu verheerenden Hochwasserereignissen führen (sog. „Flash-Floods“), während wenige Kilometer entfernt die Sonne scheint. Sie treten meist in den Sommermonaten auf. Über ein großes Gebiet gemittelt, wie zum Beispiel dem Einzugsgebiet eines großen Flusses, sind diese Ereignisse meist nicht mehr als Extreme wahrnehmbar. Für Hochwasser an den großen Flüssen, wie z.B. dem Elbe-Hochwasser von 2002, sind die großräumigen Strömungsverhältnisse über Europa, dem Mittelmeer und dem Nordatlantik verantwortlich. Hier kommt es zu Überflutungen, wenn die Großwetterlage über mehrere Tage für einen stetigen Feuchtetransport und Dauerregen sorgt. So hohe Intensitäten wie bei Gewittern werden dabei jedoch meist nicht erreicht. In der Regel werden Computermodelle eingesetzt, mit denen die zu erwartenden hydraulischen Belastungen eines geplanten Bauwerks durchgerechnet werden können. Dabei genügt es in vielen Fällen nicht, ein besonders schweres Regenereignis zu simulieren. Bei einem Kanalnetz beispielsweise hängt das Versagensrisiko nicht nur vom aktuellen Niederschlag ab, sondern auch von der Vorgeschichte: Sind die Kanäle noch von einem vorherigen Ereignis gefüllt, kann es viel schneller zu Rückstau und Überflutungen kommen. Es werden deshalb Langzeitsimulationen durchgeführt (Zeitreihen von mehreren Jahrzehnten) und die relativen Häufigkeiten bestimmter Gefahrensituationen (z.B. „einmal in zehn Jahren“) als Abschätzung für deren Risiko verwendet. Diese Simulationen stützen sich auf Niederschlagszeitreihen als Eingangsdaten, die je nach Modell und Problemstellung auf ganz unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen



Rückstau im Kanalnetz.

Skalen erhoben werden müssen. Nicht immer kann sich die Simulation dabei auf geeignete Messwerte stützen.

Die räumliche und zeitliche Variabilität von Niederschlag hängt stark von der betrachteten räumlichen und zeitlichen Skala ab. Zwei benachbarte Niederschlagsmessstationen werden fast die gleiche monatliche oder jährliche Regensumme aufzeichnen. Die Tagessummen hingegen können beträchtlich voneinander abweichen und die 5-Minuten-Werte oft sogar total verschieden sein.

Um Kanalnetze richtig simulieren zu können, sind hochaufgelöste Niederschlagsmessreihen (1-Stunden-Werte oder sogar 5-Minuten-Werte) notwendig. Betrachtet man Niederschlag auf solch kurzen Dauerstufen, so zeigt sich eine sehr starke räumliche Variabilität. Schon wenige Kilometer von einer Messstation entfernt, kann das Niederschlagsverhalten ganz anders aussehen, je nach dem, ob man sich z.B. auf der Luv- oder der Lee-Seite eines Höhenzuges befindet. Um ein Gebiet flächendeckend mit geeigneten Niederschlagszeitreihen abzudecken, müsste also ein sehr dichtes Messnetz betrieben werden. Die 295 in Baden-Württemberg verfügbaren Messstationen für den Momentanniederschlag sind dafür bei weitem nicht ausreichend.

Eine räumliche Interpolation von Niederschlagszeitreihen aus den Werten der umliegenden Stationen ist auf einer so hohen zeitlichen Auflösung nicht ohne weiteres möglich. Bei der Interpolation geht ein großer Teil der Variabilität der Werte verloren. Dadurch werden die Extremwerte stark abgemindert, auch viele statistische Charakteristika des Niederschlags, wie z.B. die Autokorrelation, also das Gedächtnis der Zeitreihen, werden stark verändert. Interpolierte Zeitreihen unterscheiden sich also deutlich von gemessenen und können

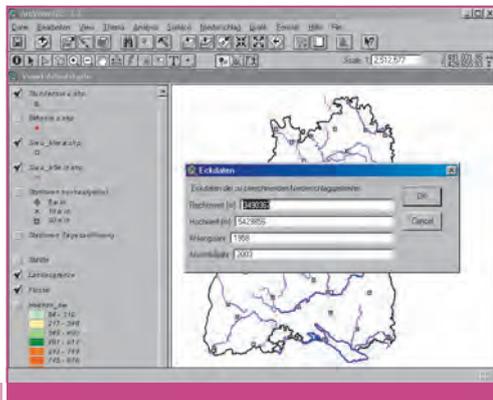
nicht zur Simulation herangezogen werden.

Mit NiedSim wurde am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart (LHG) deshalb ein System entwickelt, mit dem an jeder beliebigen Stelle in Baden-Württemberg eine Zeitreihe erzeugt werden kann, die in ihren statistischen Eigenschaften mit gemessenen Reihen übereinstimmt.

Das Grundprinzip von NiedSim ist folgendes: Anstatt die Niederschlagswerte direkt zu interpolieren, werden nur die statistischen Eigenschaften der Zeitreihen interpoliert und als Vorgabewerte für eine stochastische Generierung verwendet. Auf diese Weise kann der Varianzverlust durch die Interpolation verhindert werden.

Der Ablauf von NiedSim im Einzelnen:

1. Zuerst werden die statistischen Eigenschaften (wie z.B. die Verteilung der Werte, die Autokorrelation oder die Skalierung der Niederschlagssummen verschiedener Dauerstufen) aller verfügbaren Niederschlagsstationen berechnet.
2. Mit geeigneten Interpolationsverfahren werden die Werte auf ein gleichmäßiges 1-Kilometer-Raster interpoliert.



Die graphische Oberfläche für das Niederschlagsgenerierungssystem NiedSim. NiedSim wird von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) operationell eingesetzt.

3. Für die Generierung einer Zeitreihe werden diese statistischen Zielwerte vom nächstgelegenen Rasterpunkt ausgelesen.
4. Es wird eine zufällige Zeitreihe mit der richtigen Werteverteilung erzeugt.
5. Diese Initialreihe wird nun durch Tauschen von Werten optimiert. Die Erfüllung der statistischen Zielvorgaben aus 3. wird dabei mit einem Punktesystem bewertet. Ist die Punktzahl minimal, ist die Optimierung fertig.

Die Zeitreihengenerierung von NiedSim ist reziprok, d.h. sie stützt sich neben der geographischen Information auf die statistischen Charakteristika der umliegenden Niederschlagsstationen, die aus meteorologischen Beobachtungen der Vergangenheit gewonnen werden. Implizit wird damit die Bedingung stationärer klimatischer Verhältnisse gestellt. Auch wenn man beobachtete Zeitreihen zur hydraulischen Dimensionierung heranzieht, trifft man damit implizit die Annahme, dass die zukünftigen Niederschlagsereignisse mit den

vergangenen vergleichbar sind. Aktuelle Trendfortschreibungen zeigen jedoch, dass sich das Niederschlagsregime in Süddeutschland in den letzten Jahren verändert hat. Und nach Stand der Klimaforschung wird sich diese Änderung fortsetzen. In der Dimensionierung von Wasserbauwerken muss dies berücksichtigt werden. Das ist gerade in Hinsicht auf die lange Lebensdauer solcher Strukturen wichtig. Nur so ist gewährleistet, dass zum Beispiel ein Hochwasserrückhaltebecken in 50 Jahren noch genauso wirksam ist wie heute.

Zukünftige klimatische Veränderungen können mit sog. „Global Circulation Modells“ – kurz GCM abgeschätzt werden. (In der Regel sind GCM gemeint, wenn in den Medien von Klimamodellen gesprochen wird). In diesen Modellen werden die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre und den Ozeanen nachgebildet und dann in die Zukunft gerechnet. GCM sind sehr rechenintensiv und deshalb in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung begrenzt, räumlich auf 1° bis 2° geographischer Breite und Länge, zeitlich auf bestenfalls sechs Stunden. Für die Generierung von Niederschlagszeitreihen ist diese Auflösung nicht ausreichend. Außerdem ist bekannt, dass GCM die mittleren Niederschlagsverhältnisse viel besser abbilden können als die Extrema. Diese sind aber in der hydraulischen Dimensionierung besonders wichtig. Da die statistischen Eigenschaften des Niederschlags stark von der betrachteten Skala abhängen, ist zu erwarten, dass sich klimatische Veränderungen auf unterschiedlichen Skalen ganz unterschiedlich auswirken, und dass sich die Extrema ganz anders entwickeln als die mittleren Verhältnisse. Trendanalysen aus beobachteten Niederschlagszeitreihen zeigen, dass die jährliche Niederschlagssumme in Süddeutschland in den letzten Jahrzehnten signifikant zugenommen hat. Gleichzeitig gab es Verschiebungen im Jahresgang. Die Winter wurden feuchter und die Sommer tendenziell trockener.

Anhand von überregionalen Luftdruckfeldern wurde eine Wetterlagenklassifikation mit zwölf Wetterlagen („circulation patterns“ – CPs) erstellt. Mit dieser Einteilung konnte gezeigt werden, dass sich die Wetterlageabfolge in diesem Zeitraum deutlich verändert hat. In den Sommermonaten nahmen trockene Hochdruckwetterlagen zu. Gleichzeitig zeigt sich,

dass die Wetterlagen auf die Atmosphären-temperatur reagieren. Bei höheren Temperaturen sinkt zwar die Niederschlags-wahrscheinlichkeit, wenn es aber regnet, zeigen sich häufiger sehr hohe 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten. Dies lässt darauf schließen, dass in Zukunft mit einer höheren Durchschnittstemperatur bei gleichzeitig höheren Extremen in den Kurzzeitniederschlägen zu rechnen ist. Erklären lässt sich dies damit, dass bei höheren Temperaturen die Verdunstung steigt, die Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen kann und konvektive Aufwinde verstärkt werden. Es kann also mehr Wasser länger gehalten werden. Regnet es dann, dann umso plötzlicher.

Das Risiko von Flash-Floods könnte also ansteigen, selbst wenn die Sommer generell trockener würden. Dieser Trend zu mehr Kurzzeitextremen kann schon jetzt beobachtet werden. Dies zeigen (07) und (08). Setzt man die 1-Stunden-Werte des Niederschlags zu den Tagessummen ins Verhältnis, zeigt sich folgendes: Der Anteil am Tagesmaximum, der in fünf Minuten oder einer Stunde fallen kann, hat sich in den letzten Jahren an fast allen Messstationen Baden-Württembergs stetig erhöht.

Für (07) und (08) wurden 30 Niederschlagsstationen ausgewertet, die von 1991 bis 2004 alle in einer sehr hohen Datengüte zur Verfügung stehen. Die zeitliche Auflösung des Datensatzes beträgt 30 Minuten. Aus den Daten wurden die beobachteten Extrema isoliert und deren Skalierungseigenschaften untersucht. Dafür wurden von jeder Station und auf unterschiedlichen Dauerstufen zwischen 30 Minuten und 24 Stunden jeweils die fünf höchsten gemessenen Intensitäten pro Jahr ermittelt. Für alle Dauerstufen wurden diese Werte über zwei Zeiträume, einmal 1988 bis 1995 und 1996 bis 2004 gemittelt. Aus den gemittelten Werten aller Stationen kann dann die in (07) gezeigte Skalierungskurve erstellt werden.

Auf den ersten Blick sehen die Kurven für die beiden Zeiträume recht ähnlich aus. Um die Unterschiede zu verdeutlichen, wurden in (08) die Werte für die beiden Zeiträume in Verhältnis zueinander gesetzt. So erkennt man, dass sich die Skalierungseigenschaften grundlegend geändert haben. In den kurzen Dauerstufen bis zwei Stunden kann im späteren Zeitraum ein um sieben Prozent größerer Anteil des 24-Stunden-Maximum

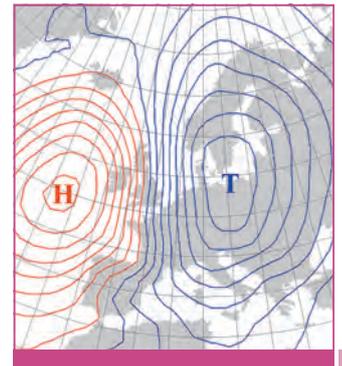
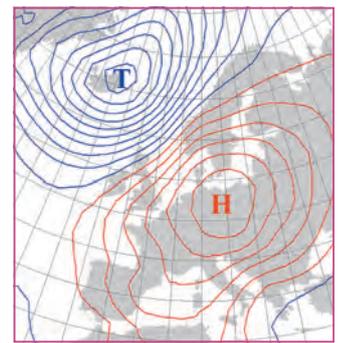
fallen als im Zeitraum von 1988 bis 1995. Die relativen Intensitäten mittlerer Dauer von vier Stunden bis unter 24 Stunden nehmen hingegen ab. In Anbetracht des kurzen Erhebungszeitraums sind diese Ergebnisse recht auffällig.

Aktuell wird untersucht, wie die unterschiedlichen Klimawandelsignale aus den verschiedenen Quellen in die Generierung von Zeitreihen implementiert werden können. Dafür wurde das Programmsystem NiedSim-Klima entwickelt, das sich im Moment in der Testphase befindet. Die zukünftige Wetterlagenabfolge wird dabei aus den GCM abgeschätzt. Aus den Beobachtungen der Vergangenheit wurde der Zusammenhang zwischen jeder Wetterlage, bei unterschiedlichen Temperaturniveaus und der Verteilung der 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten bestimmt. Nimmt man diesen Zusammenhang als konstant an, kann man aus der Wetterlagenabfolge und den Temperaturprognosen des GCM eine Abschätzung der zukünftigen Verteilung der 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten gewinnen. Das zukünftige Skalierungsverhalten zwischen Niederschlägen unterschiedlicher Dauerstufen kann über eine Trendfortschreibung in die Zukunft extrapoliert werden.

4. Hydrologische Modellierungen

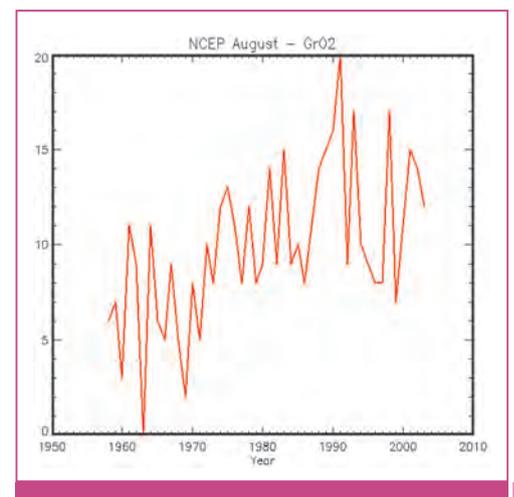
In der Wasserwirtschaft ist die hydrologische Modellierung ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Die so genannten Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) können sowohl für kurz- und mittelfristige Problemstellungen (z.B. Hochwasservorhersage), als auch für langfristige Planungszwecke (z.B. Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen) eingesetzt werden (09).

Allerdings sind hydrologische Modelle nach wie vor nicht uneingeschränkt einsetzbar, da es oft an ausreichenden Eingangsdaten mangelt oder Parameter, die gewisse Modellprozesse beschreiben, nur sehr schwer abzuschätzen sind. Um ein hydrologisches Modell kalibrieren zu können, sind verlässliche Daten, wie gemessene Abflüsse, Niederschlag oder Temperatur notwendig. Spe-



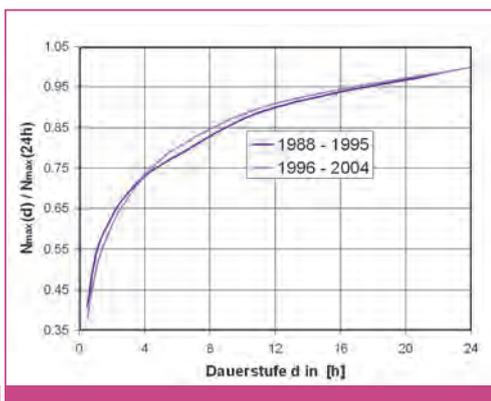
Mittlere Luftdruckverhältnisse an zwei typischen Wetterlagen (circulation patterns, CP). CP3 (links) – Hochdruckwetterlage, wenig Niederschlag, seltene Extremwerte. CP11 (rechts) generell eher nass, häufig extreme 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten.

05



Häufigkeit von CPs der Gruppe 2 (Hochdruckwetterlagen) im August von 1958 bis 2004.

06



07

Skalierung von Extremwerten unterschiedlicher Dauerstufe zwischen den Zeiträumen bis 1995 und ab 1996. Die Skalierung erfolgt nicht in absoluten Werten, sondern es werden alle Werte aller Dauerstufen kleiner 24-Stunden auf das mittlere Extrem der 24-Stunden-Summe der jeweiligen Station bezogen. So erhält man normierte Extrema zwischen 0 und 1. Ein Wert von 0,73 beispielsweise für die Dauerstufe von vier Stunden bedeutet, dass im Durchschnitt der fünf größten gemessenen 4-Stunden-Intensitäten 73 Prozent des Niederschlags gefallen sind, der im Schnitt über die fünf maximalen 24-Stunden-Ereignisse auftrat.



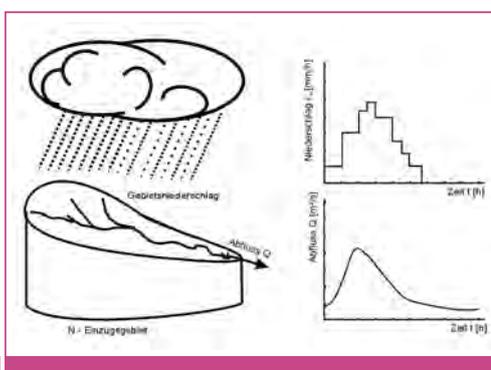
08

Zu- und Abnahme der Extrema verschiedener Dauerstufen zwischen den Zeiträumen 1988 bis 1995 und 1996 bis 2004.

ziell lange beobachtete Abflusszeitreihen liegen meist nur für größere Flussläufe vor, weshalb gerade die hydrologische Modellierung von kleinen unbeobachteten Einzugsgebieten (EZG) nach wie vor eine große Herausforderung darstellt. Aber auch die meteorologischen Eingangsdaten unterliegen einer großen zeitlichen und räumlichen Variabilität, die vom eingesetzten Modell erfasst werden müssen. Andere beeinflussende Faktoren, wie z.B. Landnutzung oder Bodeneigenschaften in den EZG, die das Abflussverhalten wesentlich beeinflussen können, werden in vielen hydrologischen Modellen gar nicht berücksichtigt. Dadurch sind physikalische Modelle für viele praktische Anwendungen nicht verwendbar. Deshalb bedient man sich Modellen, die versuchen, die Variabilität der Eingangsgrößen herauszufiltern. Oft werden dabei Parameter eingesetzt, die nicht direkt mit physikalisch messbaren Größen zusammenhängen und mit Hilfe von Kalibrierungsmethoden abgeschätzt werden.

Die Abschätzung dieser hydrologischen Modellparameter ist eine große Herausforderung, die mit Hilfe zunehmender Rechnerkapazitäten und der Entwicklung komplexer Optimierungsalgorithmen in den letzten Jahren immer besser gemeistert werden konnte. Allerdings hängen die Parameter dieser angepassten hydrologischen Modelle nach wie vor von den Eingangsdaten der Modelle ab, deren Qualität aufgrund von Messfehlern nicht gewährleistet werden kann.

Ein Niederschlags-Abfluss-Modell ist das hydrologische Transportmodell HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), das häufig für hydrologische Fragestellungen angewendet wird. Es wurde am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart kontinuierlich weiterentwickelt und steht heute in verschiedenen Versionen zur Verfügung, die für unterschiedliche Zielsetzungen angewendet werden können. Die Unterschiede der einzelnen Versionen liegen u.a. in der Art und Weise, wie die Eingangsdaten (z.B. Niederschlag und Temperatur) im Modell verarbeitet werden. In einer Version werden Niederschlags- und Temperaturdaten gleich verteilt über ein gesamtes Teileinzugsgebiet (TEZG) angenommen, in einer weiteren können diese Eingangsdaten rasterzellengenau berücksichtigt werden. In dieser räumlich unterteilten Version werden somit unterschiedliche Niederschlags- und Temperaturdaten in einem TEZG verwendet. Dadurch wird die Topographie eines TEZG und die damit unterschiedlichen Niederschlags- und Temperaturverteilungen als Zusatzinformation in das Modell aufgenommen.



09

In der Wasserwirtschaft ist die hydrologische Modellierung ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Die so genannten Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) können sowohl für kurz- und mittelfristige Problemstellungen (z.B. Hochwasservorhersage), als auch für langfristige Planungszwecke (z.B. Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen) eingesetzt werden.

Eine weitere Modifikation des HBV-Modells betrifft die Menge an berücksichtigten Eingangsdaten. Dadurch können Größen, wie z.B. Landnutzung, Bodeneigenschaften, Globalstrahlung, etc. in das Modell mit einfließen, die die Optimierungsalgorithmen bei der Parameterschätzung verbessern. Die Zielsetzungen bei der hydrologischen Modellierung sind, wie bereits erwähnt, sehr verschieden, so dass man jeweils unterschiedliche Zielfunktionen und Optimierungsalgorithmen bei der Modellkalibrierung anwenden muss. Eine einzelne Zielfunktion kann nie alle Teile einer Abflussganglinie beschreiben.

5. Ausblick

Zu Beginn der Forschungen im Bereich der hydrologischen Modellierung bestand die Hoffnung, dass es mit der stetig wachsenden Rechenleistung von Computersystemen irgendwann möglich sein wird, die angewendeten Modelle so weit zu verfeinern, dass die Realität fast fehlerfrei abgebildet wird. Leider hat sich diese Hoffnung nicht erfüllt. Je komplexer ein Modell ist, desto höher ist auch sein Bedarf an Eingangs- und Kalibrierungsdaten. Dieser Bedarf wird von Beobachtungen und Messungen schon heute bei weitem nicht mehr gedeckt.

Aus diesem Grund verschiebt sich der Fokus hydrologischer Forschung zusehends. Anstatt die Modelle an sich immer weiter zu verbessern, wird die Analyse der Modellfehler immer wichtiger: Wie robust ist das Modell gegen Fehler in den Eingangsdaten? Reagiert es in der gesamten Bandbreite immer gleich? Wie kann ich es auf ein Gebiet mit schlechter Datenlage kalibrieren? Gibt es eine statistische räumliche oder zeitliche Struktur in den Modellfehlern oder ist es ein „weißes Rauschen“? Dies ist vor allem in der Radarforschung von großer Bedeutung.

Bei diesen Analysen kommen neue statistische Verfahren zum Einsatz, vor allem um auch nicht-lineare Zusammenhänge abzubilden. In der Hydrologie sind Extremwerte (Dürren oder Überflutungen) von großer Bedeutung und die führen verglichen mit den mittleren Verhältnissen oft ein Eigenleben. Mit gängigen Methoden wie der Korrelation werden sie zum Teil gefährlich unterschätzt. • *András Bárdossy*

*Jochen Seidel, Thomas Pfaff
Ferdinand Beck, Felix Herma*

DIE AUTOREN

PROF. DR. ANDRÁS BÁRDOSY

studierte Mathematik an der ELTE Universität in Budapest und promovierte dort im Jahr 1981. Nach diversen Forschungsaufenthalten an internationalen Institutionen, unter anderem als Associate Professor an der Waterloo Universität in Kanada, erfolgte 1994 eine zweite Promotion an der Universität Karlsruhe. Seit 1994 ist er Professor am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart und seit 2003 Leiter des Lehrstuhls für Hydrologie und Geohydrologie mit Forschungsschwerpunkten im Bereich der Hydrologischen Modellierung und Hydroklimatologie.



DR. JOCHEN SEIDEL

studierte Geographie an der Universität Freiburg und promovierte dort im Jahr 2004. Von 2005 bis 2007 war er in einem Forschungsprojekt zur Rekonstruktion und Analyse von historischen Hochwasserereignissen tätig. Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart.



DIPL.-ING. THOMAS PFAFF, M.ENG.

studierte Umweltschutztechnik an der Universität Stuttgart und schloss sein Studium mit einer Masterarbeit über die Bestimmung von Schneefallintensität und Wolkenwassergehalt mittels passiver Mikrowellenradiometrie an der Universität Tokyo (Japan) ab. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie, wo er sich in seiner Forschungsarbeit mit den Möglichkeiten der quantitativen Verbesserung von Wetterradar-daten und deren Nutzung für die Hochwasservorhersage beschäftigt.



DIPL.-ING. FERDINAND BECK, M.SC.

studierte Umweltschutztechnik und Water Resources Engineering and Management an der Universität Stuttgart und der ENTPE Lyon. Seit 2005 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie und beschäftigt sich dort hauptsächlich mit Statistik und Stochastik im Bereich des Klimas. Bisherige Forschungsprojekte umfassten die synthetische Generierung von Niederschlagszeitreihen, sowie die Auswertung und Korrektur von Klimamodell-daten.



DIPL.-ING. FELIX HERMA

ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Abteilung Hydrologie und Geohydrologie. Er studierte Umweltschutztechnik an der Universität Stuttgart. Derzeit arbeitet er an dem Verbundforschungsprojekt Eva-Sim – Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. Hier liegt der Fokus auf der Generierung von räumlichen und zeitlichen Verläufen von hydro-meteorologischen Extremereignissen (z.B. Gewitter mit Starkregen).



Kontakt

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64679, Fax 0711/685-64681
Internet: <http://www.iws.uni-stuttgart.de>