FORUM FÜR HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG

HEFT 30.11

Hydrologie & Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011
an der Technischen Universität Wien

Günter Blöschl, Ralf Merz (Herausgeber)

Veranstalter des Tages der Hydrologie 2011:

- Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA, Aachen, Hennef
- Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien
- Vienna Doctoral Programme on Water Resources Systems (FWF DK+), Wien
- Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien
- Österreichische Gesellschaft für Hydrologie, Wien
- Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA, Hennef

Hydrologische Wissenschaften
Fachgemeinschaft in der DWA

Günter Blöschl und Ralf Merz (Herausgeber):

Hydrologie & Wasserwirtschaft -
von der Theorie zur Praxis

Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011
24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 30.11

ISBN: 978-3-941897-79-3

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2011

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA
Geschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D - 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 0
Fax: 02242/872 – 135
info@FgHW.de
www.FgHW.de

Vertrieb:
DWA Deutsche Vereinigung
für Wasserwirtschaft, Abwasser und
Abfall e.V., Bundesgeschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D – 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 333
Fax: 02242/872 – 100
vertrieb@dwa.de
www.dwa.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Nacken
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Hauptausschuss Hydrologie und
Wasserbewirtschaftung der DWA

Druck und Binden:
Riegelnik GesmbH, Wien

Umschlaggestaltung:
Dorit Steinberger, München

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2011

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.

Vorwort

Hydrologie und Wasserwirtschaft sind eng verbundene Gebiete. Durch unsere sich schnell verändernde Welt sieht sich die Wasserwirtschaft mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert wie Klimawandel, zunehmender Druck auf die Ressource Wasser und Umgang mit Extremereignissen. Für viele der Fragestellungen sind die bisher verwendeten Methoden nicht mehr ausreichend und neue Verfahren sind notwendig. Die hydrologische Wissenschaft kann durch neue Konzepte, numerische Ansätze und Messmethoden zur Lösung dieser praktischen Probleme beitragen. Umgekehrt können auch die Herausforderungen und Umsetzungen der Praxis wertvolle Impulse für theoretische Neuentwicklungen geben. Deshalb ist ein enger Austausch zwischen Theorie und Praxis unumgänglich.

Theorie zur Praxis zu verzahnen kann aber durchaus ein steiniger Weg sein, denn Traditionen in den beiden Feldern haben oft eine gewisse Erhaltungstendenz. Die Bereitschaft, sich auf etwas Neues einzustellen und eine vorurteilsfreie Kommunikation sind hier essentiell. Ebenso wesentlich ist eine differenzierte Sichtweise, denn die komplexen Probleme von heute erlauben in der Regel keine einfachen Antworten. Der Tag der Hydrologie 2011 soll unter dem Motto „Hydrologie und Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis“ einen Beitrag zum Dialog von Theorie und Praxis leisten. Die mehr als 110 eingereichten Beiträge wurden in vier Themengruppen gegliedert:

- Extreme: Prozesse und Modellierung
- Wandel: Erfassung und Auswirkungen
- Ressource Wasser: Analyse und Bewirtschaftung
- Flussgebietsmanagement: Konzepte und Umsetzung

So spannt der Tag der Hydrologie 2011 einen Bogen über die zentralen Anliegen von Hydrologie und Wasserwirtschaft.

Wir danken allen, die zum Zustandekommen des Tages der Hydrologie 2011 beigetragen haben. Seit Beginn der Tagungsserie 1999 findet der Tag der Hydrologie heuer das erste Mal außerhalb Deutschlands statt – ein klares Zeichen, dass der Dialog nicht nur zwischen Theorie und Praxis sondern auch über die Landesgrenzen hinweg der Weg der Zukunft ist. Herrn Prof. Nacken und den anderen Kolleginnen und Kollegen von der Fachgemeinschaft und dem Hauptausschuss danken wir, dass sie dies ermöglichten. Die Veranstaltung wurde finanziell unterstützt von IHP Deutschland und insbesondere vom Vienna Doctoral Programme on Water Resource Systems (www.waterresources.at). In diesem vom Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung finanzierten und bis 2021 angesetzten Programm werden derzeit 25 Dissertantinnen und Dissertanten interdisziplinär ausgebildet. Herzlich bedanken wollen wir uns beim wissenschaftlichen Komitee für die Begutachtung der Tagungsbeiträge. Abschließender, und nicht minder aufrichtiger Dank geht an Dipl.-Ing. Rogger und Dipl.-Ing. Nester, auf deren Schultern die Hauptlast der Tagungsorganisation und die Gestaltung des Tagungsbandes lag.

Wir wünschen Ihnen eine gelungene Veranstaltung.

Günter Blöschl, Ralf Merz Wien, 9.3.2011

Heft 30 2011 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrologie & Wasserwirtschaft - Von der Theorie zur Praxis

Keynotes

Andreas Schumann
Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Theorie und Praxis 7

Wolfgang Kinzelbach
Interaktion zwischen hydrologischer Forschung und Praxis als Antrieb für Innovation 19

Robert Fenz
Gewässerbewirtschaftung in Österreich – aktuelle und zukünftige Herausforderungen 20

Vorträge zum Thema 1: Extreme: Prozesse und Modellierung

Uwe Grünewald
Vielzahl von Hochwasser im Jahr 2010 an Oder, Neiße, Spree und Schwarzer Elster – eine Herausforderung nicht nur für die wasserwirtschaftliche Praxis 21

Jörg Walther, Ralf Merz, Gregor Laaha und Uwe Büttner
Regionalisierung von Hochwasserabflüssen in Sachsen 29

Ulrike Drabek und Thomas Nester
Ein Ereigniskatalog als Teil eines on-line Hochwasserwarnsystems 36

Johannes Hübl, Michael Chiari, Christian Scheidl und Thomas Wiesinger
Die Wildbachereignisse des Sommers 2010 in Österreich 43

Katja Heller und Arno Kleber
Einfluss periglazialer Deckschichten auf die oberflächennahen Fließwege am Hang - eine experimentelle Prozessstudie im Osterzgebirge, Sachsen. 50

Robert Schwarze, Burkhard Beudert und Susanne Theiss
Untersuchungen zum Abfluss im oberflächennahen Untergrund im Hochwasserfall 57

Florian Winter und Markus Disse
Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung auf verschlämmungsgefährdeten Agrarflächen 65

Reinhard Vogt
Ganzheitlicher kommunaler Hochwasserschutz und Hochwasserkompetenz für alle - Hochwasserschutzkonzept und HochwasserKompetenzCentrum in Köln 75

Oliver Böhm und Karl-Friedrich Wetzel
Differenzierung der Hochwassergeschichte des bayerischen Alpenvorlandes 81

Jan Szolgay, Michaela Danáčová und Peter Šurek

Estimation of changes of the flood regime caused by river engineering works using multilinear flow routing 88

Vorträge zum Thema 2: Wandel: Erfassung und Auswirkungen

Harald Kling, Martin Fuchs und Maria Paulin

Ensemble Modellierung der Abflusscharakteristik der oberen Donau unter Klimaszenarien 94

Hans-Peter Nachtnebel

Vergleich von anthropogenen Eingriffen mit zu erwartenden Klimaeinflüssen auf den Wasserhaushalt 102

Wolfgang Schöner, Günter Blöschl, Helmut Kroiß, Alfred Paul Blaschke, Reinhard Böhm, Klaus Haslinger, Norbert Kreuzinger, Ralf Merz, Juraj Parajka, Jose Luis Salinas und Alberto Viglione

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – meteorologische Grundlagen 110

Juraj Parajka, Alfred Paul Blaschke, Ralf Merz, Jose Luis Salinas und Günter Blöschl

Klimawandel in Österreich - Auswirkungen auf Oberflächen- und Grundwasser 121

Jose Luis Salinas, Alberto Viglione, Ralf Merz, Juraj Parajka, Wolfgang Schöner und Günter Blöschl

Wie ändern sich Hochwasser und Niederwasser in Österreich? 129

Uwe Haberlandt, Aslan Belli und András Bárdossy

Eignung von Großwetterlagen als Prämisse für das statistische Niederschlagsdownscaling 136

Markus C. Casper, Gayane Grigoryan, Oliver Gronz, Günther Heinemann, Rita Ley und Andreas Rock

Analyse des projizierten hydrologischen Verhaltens von Einzugsgebieten auf der Basis von Signature Indices 144

Helge Bormann, Hartmut M. Holländer, Theresa Blume, Wouter Buytaert, Giovanni B. Chirico, Jean-François Exbrayat, David Gustafsson, Herwig Hölzel, Philipp Kraft, Thomas Krauße, Ali Nazemi, Christian Stamm, Sebastian Stoll, Günter Blöschl und Hannes Flühler

Modellkonzept vs. Modellierer – wer oder was ist wichtiger? Vergleichende Modellanwendung am Hühnerwasser-Einzugsgebiet 152

Kerstin Stahl, Lena M. Tallaksen, Jamie Hannaford und Henny A.J. van Lanen

Abflusstrends in Europa: Vergleich eines Multi-Modell-Experiments mit Beobachtungen 159

Bernd Hausmann und Heribert Nacken

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime der Eifel-Rur 166

Vorträge zum Thema 3: Ressource Wasser: Analyse und Bewirtschaftung

Christian Reszler, Hans Kupfersberger, Heimo Truhetz und Andreas Gobiet und Martin Suklitsch

Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung in der Steiermark 173

Katrin Drastig, Annette Prochnow und Simone Kraatz

Effizientere Nutzung der Wasserressourcen in der Landwirtschaft 180

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer, Jürgen Ihringer, Patrick Preuß und Katharina Richter

Modellierung der Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder mit dem Tageswertmodell BEWASYS 186

Hannes Leistert und Markus Weiler

Hochaufgelöste Modellierung der Beschattung von Fließgewässern durch Vegetation und Topographie mittels LiDAR Daten 193

Jan Fleckenstein, Sven Frei, Klaus-Holger Knorr und Christina Weyer

Die Bedeutung der hydrologischen und biogeochmischen Dynamik in Auen für das Wasserqualitätsmanagement 200

Frido Reinstorf, Sebastian Leschik, Andreas Musolff, Karsten Osenbrück, Gerhard Strauch und Mario Schirmer

Methoden für die Abschätzung der Massenflüsse von Xenobiotika in verschiedenen Maßstäben in städtischen Gebieten 201

Stephan Hannappel, Sarah Zeilfelder, Gabriele Lemke und Beate Schwerdtfeger

Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern 206

Hartmut Wittenberg

Grundwasserneubildung als schnelle Antwortfunktion auf Starkniederschläge 213

Jörg Steidl, Gunnar Lischeid, Uta Steinhardt, Martina Schäfer, Timothy Moss und Benjamin Nölting

Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nach-haltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland (ELaN) 220

Gerhard Klasz, Walter Reckendorfer und Dieter Gutknecht

Der bordvolle Abfluss natürlicher Flüsse im Ursachen- und Wirkungszusammenhang mit der bordvollen Gewässergeometrie – Gewässermorphologische und ingenieurpraktische Aspekte 221

Vorträge zum Thema 4: Flussgebietsmanagement: Konzepte und Umsetzung

Gesa Kutschera, Hermjan Barneveld, Bernd Mehlig, Martin Brinkmann und Rita Lammersen

Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein – ein hydraulischer Ansatz zur Vereinbarkeit von Hochwasserschutz und Strukturverbesserung 230

Frederick M. Cate und Reinhard Schaufler

Flussgebietsmanagement vom Konzept zur Umsetzung am Beispiel des Hochwasser-Managements im Einzugsgebiet der Ache 237

Nicola Fohrer, Britta Schmalz, Jens Kiesel und Björn Guse

Integration aquatischer Ökosysteme in die Flussgebietsmodellierung - ein erweiterter ökohydrologischer Ansatz 244

Ulrich Kern und Hartmut Hoevel

Die Umgestaltung der Erft – ein Generationenprojekt im Rheinischen Braunkohlenrevier 245

Kirsten Rücker und Joachim Schrautzer

Die Bedeutung des Wasseraustausches für die Nährstoffretention in einem Fließgewässer-Niedermoor-Komplex 252

Ingo Heinz

Abwasserwiederverwendung: Eine Option im Flussgebietsmanagement? 259

Lothar Paul, Tilo Ihle und Klaus-Joachim Prien

Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren: Konflikt zwischen Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung 266

Jürgen Diener, Georg Johann, Michael Leismann und Burkhard Teichgräber

Umsetzung der Europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie im Seseke-Gebiet 273

Jürgen Waser, Raphael Fuchs, Hrvoje Ribičić und Günter Blöschl

Visuelle Aktionsplanung im Hochwassermanagement mit Visdom 280

Karl Rohrhofer, Frederick M. Cate und Julia Pfann

Wirksamkeit von Öffentlichkeitsbeteiligung im Flussgebietsmanagement am Beispiel des F&E-Projekts IMSURF-RBM1 287

Autorenverzeichnis 295

Abstracts der Posterbeiträge 305

Erschienene Hefte der Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 390

Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Theorie und Praxis

Andreas Schumann

Abstract

Hochwasserwahrscheinlichkeiten sollen (zumindest theoretisch) das natürliche Risiko, das durch die Zufälligkeit des Abflussprozesses bedingt ist, beschreiben. Die wesentliche praktische Anwendung, die Festlegung eines Bemessungshochwassers, beinhaltet jedoch auch eine subjektive Komponente. Ausgehend von der Differenzierung zwischen objektiver (aleatorischer) und subjektiver (epistemischer) Wahrscheinlichkeit wird gezeigt, dass Annahmen, die für eine Anwendung der Extremwertstatistik erforderlich sind, für Hochwasserscheitelabflüsse streng genommen nicht erfüllt werden können. Zudem werden einzelne Komponenten des hydrologischen Risikos (z.B. das statistische Risiko) in praktischen Anwendungen oft nicht hinreichend berücksichtigt. Ausgehend von der Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf statistischer Grundlage werden die Erfordernisse einer weitergehenden Datenprüfung und der Nutzen von Informationserweiterungen dargestellt. Es wird gezeigt, dass Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf der Grundlage derartiger Untersuchungen besser untersetzt werden können als durch die alleinige statistische Analyse. An Hand der Diskussionen zum Merkblatt M-552, das diese Fragen behandelt, werden die Schwierigkeiten der Einführung breiterer methodischer Ansätze aufgezeigt.

1. Einleitung

Generell handelt es sich bei der Hydrologie um eine „beobachtende“ Wissenschaft, die sich mit einem realen, physisch existierenden System befasst und damit auf Naturdaten angewiesen ist. Eine hydrologische Zeitreihe ist nicht wie ein Experiment in Physik oder Chemie beliebig oft wiederholbar, sondern enthält zeitlich und räumlich begrenzte Informationen zu hydrologischen Prozessen. Diese Informationen erweitern sich mit zunehmender Beobachtungslänge und ermöglichen damit verbesserte Einblicke in das hydrologische Regime. Andererseits ergeben sich mit der Erweiterung der Erfahrungsbasis auch neue wasserwirtschaftliche Fragestellungen (z.B. in Hinblick auf extreme Hochwasser) die wissenschaftlich fundierte Aussagen erfordern, aber oftmals mit vorhandenen wissenschaftlichen Methoden und Verfahren (noch) nicht bereitgestellt werden können. Somit können neue Daten und neue Fragestellungen zeigen, dass vorhandene, eingeführte Methoden nicht problemadäquat sind. Beispiele hierfür sind die statistische Einordnung der extremen Hochwasser, die am Beginn des 21. Jahrhunderts auftraten, und die Wahl der hydrologischen Belastung im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung von Talsperren (Kapitel 2.1).

Vorhandene Methoden und ihre Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse und der sich fortentwickelnden Informationsbasis von Zeit zu Zeit hinterfragt werden. Andererseits werden neue Lösungsansätze in Folge zunehmender methodischer Komplexität nur schrittweise einzuführen sein, da in der Praxis stets eine Abwägung zwischen den Möglichkeiten vorhandener und dem Nutzen sowie den zusätzlichen Anforderungen neuer Verfahren erfolgt. An Hand der Nutzung der mathematischen Statistik zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten soll dieses Problem hier verdeutlicht

werden. Wahrscheinlichkeiten bieten sich für eine derartige Betrachtung insofern an, da für sie zwei grundlegend unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten bestehen:

- Einerseits gibt es die objektive (aleatorische) Wahrscheinlichkeit, die die relative Häufigkeit zukünftiger Ereignisse, die von einem zufälligen physikalischen Prozess bestimmt werden, beschreibt. Diese Wahrscheinlichkeit wird als relative Häufigkeit interpretiert: Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ist die relative Häufigkeit, mit der es in einer großen Anzahl gleicher, wiederholter Experimente oder Stichproben auftritt (frequentistischer Wahrscheinlichkeitsbegriff).
- Andererseits gibt es eine subjektive oder epistemische Wahrscheinlichkeit, die die Unsicherheit über Aussagen, bei denen kausale Zusammenhänge und Hintergründe nur unvollständig bekannt sind, charakterisiert. Diese Wahrscheinlichkeit beruht auf logischen Schlüssen, hat eine psychologische Komponente (Erfahrung) und kann als Grad der persönlichen Überzeugung interpretiert werden (Bayes'scher Wahrscheinlichkeitsbegriff).

Bei der Angabe und Verwendung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten spielen in der Regel beide Wahrscheinlichkeiten eine Rolle: Die Theorie der Extremwertstatistik liefert aleatorische Wahrscheinlichkeiten, die auf dem frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff beruhen, die (Bemessungs-)Praxis nutzt Wahrscheinlichkeiten eher subjektiv und berücksichtigt die Unsicherheiten der Ermittlung dieser Wahrscheinlichkeiten z.B. durch zusätzliche Sicherheitsbeiwerte.

2. Die Komponenten des hydrologischen Risikos

Die hydrologische Unsicherheit bei der Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, die auch als hydrologisches Risiko bezeichnet wird, hat vier Komponenten (DYCK 1980):

1. Das natürliche Risiko, welches durch die Zufälligkeit des Abflussprozesses bedingt ist und durch die Verteilungsfunktion der Hochwasser beschrieben wird. Es soll durch die Wahrscheinlichkeit des Hochwassers beschrieben werden.
2. Das stochastische Risiko ergibt sich aus der Zufälligkeit der zeitlichen Aufeinanderfolge kritischer Hochwasserereignisse während des betrachteten Zeitraumes. Es wird durch die Verteilung der Zeitintervalle zwischen kritischen Ereignissen bzw. der Anzahl dieser Ereignisse innerhalb eines bestimmten Zeitraumes beschrieben.
3. Das statistische Risiko resultiert aus dem Stichprobencharakter gemessener Hochwasserereignisse, der es unter Umständen nicht erlaubt, Schlüsse auf die Grundgesamtheit zu ziehen, da nur eine Teilmenge aus dieser Grundgesamtheit bekannt ist. Die Ergebnisse der statistischen Analyse, z.B. die geschätzten Parameter einer Verteilungsfunktion, hängen von diesem Stichprobeneffekt ab.
4. Die Modellunsicherheit resultiert aus der unzureichenden Kenntnis der betrachteten Systeme und Prozesse. Sie kann bedingt sein durch nicht zutreffende Annahmen, z.B. hinsichtlich der Homogenität und Konsistenz der Datenbasis.

Die verschiedenen Unsicherheiten sind teilweise miteinander verknüpft, so verstärkt sich z.B. der Stichprobeneffekt durch das stochastische Risiko. Die verschiedenen Aspekte des hydrologischen Risikos werden in der Bemessungspraxis unterschiedlich stark berücksichtigt.

3. Das hydrologische Risiko in der wasserwirtschaftlichen Praxis

Weltweit werden im Hochwasserschutz zunehmend risikoorientierte Bemessungskonzepte statt der bisherigen sicherheitsorientierten Betrachtungsweise angewandt. Bei der sicherheitsorientierten Bemessung wurde angenommen, dass jedes Ereignis, das das Bemessungsereignis unterschreitet, kontrolliert werden kann und nur Ereignisse mit so geringen Überschreitungswahrscheinlichkeiten Risiken beinhalten, dass dieses Restrisiko zu vernachlässigen ist. Bei der risikoorientierten Bemessung wird die Kombination der Wahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen betrachtet. Das Restrisiko ist zu bewerten. Maßnahmen, die ggf. erforderlich sind, um dieses Restrisiko zu vermindern, sind auszuweisen.

Dass diese Wahl eines Bemessungshochwassers in Abhängigkeit von zwei Faktoren problematisch ist, kann am Beispiel der Umsetzung der EU-Hochwasserdirektive verdeutlicht werden (WHG, 2009). Bekanntlich werden dort drei Hochwasserszenarien bezeichnet, für die Gefahren- und Risikokarten und letztlich Pläne für risikomindernde Maßnahmen zu entwickeln sind:

a) Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Szenarien für Extremereignisse;
b) Hochwasser mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (voraussichtliches Wiederkehrintervall ≥ 100 Jahre);
c) gegebenenfalls Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit.

Die deutschen Bundesländer definieren in ihrer Umsetzung das Hochwasser mittlerer Wahrscheinlichkeit als HQ(100). Was als Extremereignis zu verwenden ist, bleibt allerdings noch weitgehend offen. Den Zielvorgaben der EU-Direktive folgend sind die möglichen nachteiligen Folgen unterschiedlicher Hochwasserszenarien zu ermitteln, um dann das Hochwasserrisiko zu bewerten und durch geeignete Maßnahmen zu mindern, falls dieses Hochwasserrisiko als „signifikant“ anzusehen ist. Damit stellt sich die Frage, wo die „Signifikanzgrenze“ anzusetzen ist. Besonders stellt sich diese Frage bei deichgeschützten Gebieten, in denen bei Überschreitung der Bemessungshochwasser potentiell große Schäden entstehen können. Die Fragestellung ist theoretisch über Schadenserwartungswerte und Kosten-Nutzen-Analysen auf Projektebene zu klären. Für den Bereich einer regionalen Planungseinheit stellt sich aber die Frage nach den kumulierten Konsequenzen der Festlegung eines Extremereignisses für einen größeren Planungsraum, z.B. ein Bundesland. In der Folge der Risikoanalyse sind in Maßnahmeplänen „angemessene“ Ziele für das Hochwasserrisikomanagement festzulegen. Die Wahl der Extremhochwasser ist somit das Ergebnis der Abwägung der Interessenslagen unterschiedlicher Gruppen und Akteure.

Mit den Bemessungsansätzen der DIN 19700 fand das **stochastische Risiko** Eingang in die Bemessungspraxis. So wurde in der DIN 19700 (2004) deshalb das HQ(10.000) für den Bemessungsfall 2 (Standsicherheit des Absperrbauwerkes) eingeführt, weil die beteiligten Talsperrenexperten 0,01 als akzeptables Risiko für eine Überschreitung des BHQ2 innerhalb eines Zeitraumes von 100 Jahren Talsperrenbetrieb ansahen. Bei der praktischen Umsetzung der DIN 19700 wird aber ein Problem weitgehend ausgeklammert. Bei den Vorgaben zur Hochwasserbemessung wurde die Berücksichtigung der Seeretention gefordert, da es sich hierbei um eine physikalisch bedingte Einflussgröße handelt. Damit ist der Lastfall des maximalen Einstaues nicht vom Scheitelabfluss der zufließenden Hochwasserwelle sondern

von der Abflussganglinie (Form und Fülle) abhängig. In der DIN 19700, Teil 11, wird deshalb gefordert, auch Hochwasserereignisse mit kleineren Scheitelwerten, aber Ganglinienformen, die unter Berücksichtigung der Retentionsbedingungen eine Stauinhaltsmaximierung bewirken, zu berücksichtigen (DIN 19700, 2004). Damit verliert das Bemessungshochwasser jedoch seine statistische Zuordnung, die bisher nur über den Scheitelabfluss erfolgte. Wenn eine Bemessungshochwasserwelle durch die Überschreitungswahrscheinlichkeit ihres Scheitelabflusswertes definiert wird, sind damit das Volumen und die Form der Ganglinie, welche im Zusammenspiel der gewässermorphologischen Gegebenheiten und der technischen Parameter des Absperrbauwerkes die Stauhöhe und damit das Risiko der Überlastung bestimmen, nicht definiert. Man kann zwar ein „typische“ oder „maßgebende“ Welle definieren, es sind jedoch kritische Belastungen denkbar, die durch Wellen mit kleineren Scheiteln, aber ungünstigen Ganglinien und Volumina bedingt sind. Ein Beispiel für die Ermittlung kritischer Lastfälle ist in Abbildung 1 dargestellt (KLEIN 2010).

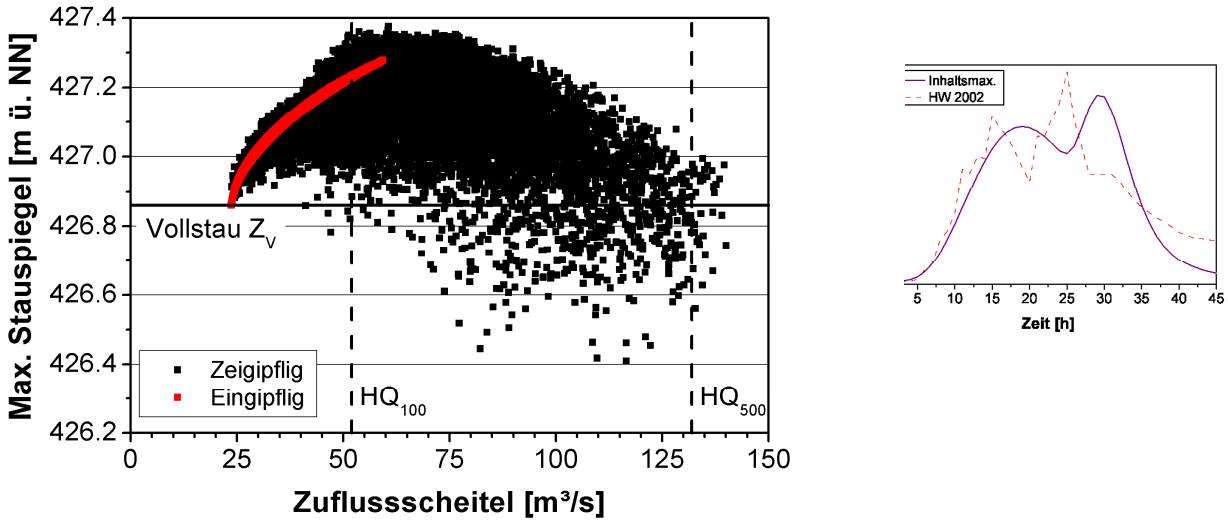


Abb. 1: Maximierte Stauspiegel in Abhängigkeit vom Zuflussscheitel bei vorgegebener typischer Ganglinie und statistischer Variation von Scheitel, Fülle und Form der Ganglinie (Talsperre Gottleuba). Die Hochwasserganglinien rechts zeigen die inhaltsmaximierende Ganglinie und die beobachtete Ganglinie des Extremhochwassers 2002.

Aus der Berücksichtigung der Retention folgt hier zwangsläufig entweder der Verzicht auf die Wahrscheinlichkeitseinordnung der Zuflusswelle oder die Notwendigkeit multivariater Betrachtungen von Scheitel und Fülle, um so die Wahrscheinlichkeit, die sich auf den Scheitel der Hochwasserwelle bezog, durch eine multivariate Wahrscheinlichkeit zu ersetzen. Eine derartige Wahrscheinlichkeit wäre z.B. durch Copulas abzuschätzen (Abbildung 2).

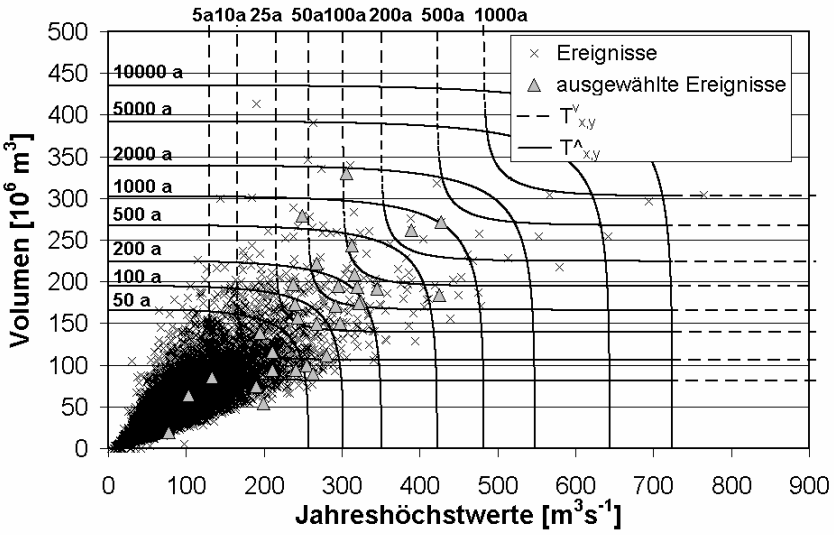


Abb. 2: Gemeinsame Wiederkehrintervalle TvX,Y (Überschreiten von x **oder** y) und T^X,Y (Überschreiten von x **und** y) für die Jahreshöchstabflüsse und die zugehörigen Füllen der Hochwasserwellen im Zufluss zum Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt (KLEIN et al. 2009).

Beide Beispiele zeigen, dass die Verwendung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in der Bemessungspraxis nicht schematisch erfolgt, sondern stets mit Abwägungen verbunden ist. Da ein Bemessungshochwasser das gesamte hydrologische Risiko umfassen soll, stellt sich die Frage, wie dessen einzelne Komponenten in der Praxis berücksichtigt werden:

- Das natürliche Risiko wird durch Verteilungsfunktionen der Hochwasserscheitel beschrieben. Hierzu gibt es eine Reihe von Verfahren der mathematischen Statistik (Verteilungsfunktionen, Parameterschätzverfahren), die z.B. im DVWK-Merkblatt 251 (1999) aufgelistet sind.
- Das stochastische Risiko wird bei Betrachtung der Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken wie z.B. Talsperren, d.h. eher wasserwirtschaftlich intern, berücksichtigt, aber selten kommuniziert. So wird z.B. das stochastische Risiko, dass ein auf ein HQ(100) bemessener Deich innerhalb von 30 Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,26 überlastet wird, nicht thematisiert.
- Das **statistische Risiko** (Stichprobeneffekt) wird in der Praxis nur mittelbar berücksichtigt. So wird z.B. festgestellt, dass der Extrapolationszeitraum einer Verteilungsfunktion nicht länger als das Dreifache der zur Schätzung verwendeten Stichprobe sein soll. Eine Vorgabe, die statistisch nicht begründet ist und meist auch nicht strikt eingehalten werden kann.
- Die **Modellunsicherheit** bei der Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird insbesondere bei der Wahl der Verteilungsfunktion deutlich. In der Regel sind mehrere Verteilungen anwendbar, die sich nur wenig in ihrer Anpassung unterscheiden. Unterschiede gibt es hauptsächlich im Extrapolationsbereich, womit die statistische Einordnung der extremen Hochwasser maßgebend für die subjektive Auswahl wird. Um die Wahl einer Verteilung zu objektivieren, wurden bisher Anpassungstests empfohlen. Ein Vergleich der Anpassungsmaße verschiedener Verteilungen untereinander zur Auswahl

einer „besten“ Verteilung ist statistisch nicht begründet und in Hinblick auf die Nutzung der Verteilungen zur Extrapolation auf seltene Hochwasser auch nicht sinnvoll. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, wie sich Verteilungsfunktionen im Bereich hoher Überschreitungswahrscheinlichkeiten (unten links) ähneln und im Bereich niedriger Wahrscheinlichkeitsverteilungen (unten rechts) unterscheiden.

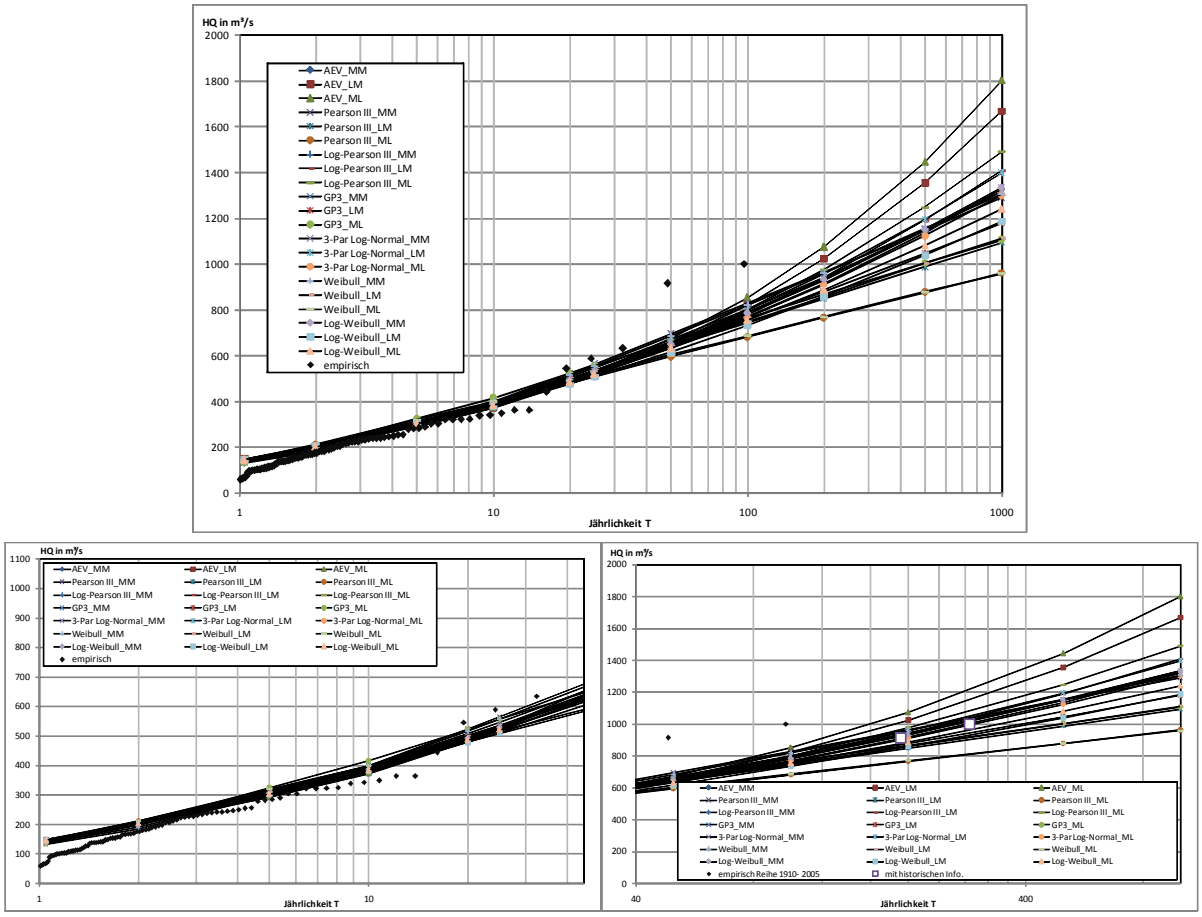


Abb. 3: Unterschiede zwischen den Anpassungen von Verteilungsfunktionen in den Bereichen niedriger und hoher Überschreitungswahrscheinlichkeiten (Pegel Wechselburg/Zwickauer Mulde)

4. Extremwertstatistik zur Abschätzung des hydrologischen Risikos - notwendig, aber nicht hinreichend

Die Ermittlung des hydrologischen Risikos beschränkt sich derzeit hauptsächlich auf die Extremwertstatistik mit dem Ziel, das natürliche Risiko zu beschreiben. Wie begründet ist dieser Ansatz?

Die Verwendung der Extremwertstatistik der Hydrologie wurde im Wesentlichen vor 70 Jahren durch die Arbeit von Gumbel „The Return Period of Flood Flows“ begründet (GUMBEL 1941). Gumbel betonte darin die erforderlichen Annahmen der Extremwertstatistik:

- die Hochwasserwerte sind quasi äquidistant,
- die Stichprobe ist homogen (d.h., jeder einzelne Wert der Stichprobe unterliegt der gleichen Verteilung),

- die Ursachen der Ereignisse sind gleich und
- die einzelnen Hochwasserereignisse sind voneinander unabhängig, d.h., das Auftreten eines hohen oder niedrigen Wertes hat keinen Einfluss auf irgendeinen Folgewert.

Die Ermittlung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf der Grundlage der Extremwertstatistik wurde in Deutschland durch Regelwerke weitgehend standardisiert. Geht die „Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit“ (DVWK, 1979) noch von der Pearson-III-Verteilung und der Momentenmethode aus, so beinhaltet zwanzig Jahre später das DVWK-Merkblatt 251 „Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen“ (DVWK, 1999) 7 Verteilungsfunktionen, 3 Parameterschätzverfahren und 3 Anpassungstests. Mit der Einführung von passenden Software-Lösungen ergeben sich heute die Hochwasserwahrscheinlichkeiten quasi auf Knopfdruck. Leider wird dadurch der Anwender von der eigentlichen Problemlösung getrennt. Er stellt Eingangsdaten bereit, sammelt die notwendigen Kenntnisse über die Bedienung des Programms und erhält ein Ergebnis, das ihm viel Zeit spart, aber voraussetzt, dass das zu lösende Problem den inhaltlichen Vorgaben der Lösung entspricht (bei der hochwasserstatistischen Analyse z.B. die Homogenität und Konsistenz der Daten). Die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird so Anwendergruppen ermöglicht, die nicht notwendigerweise die hydrologischen oder statistischen Kenntnisse besitzen müssen, die zur Anwendung der vorgefertigten Methoden und zur Interpretation der Ergebnisse erforderlich sind.

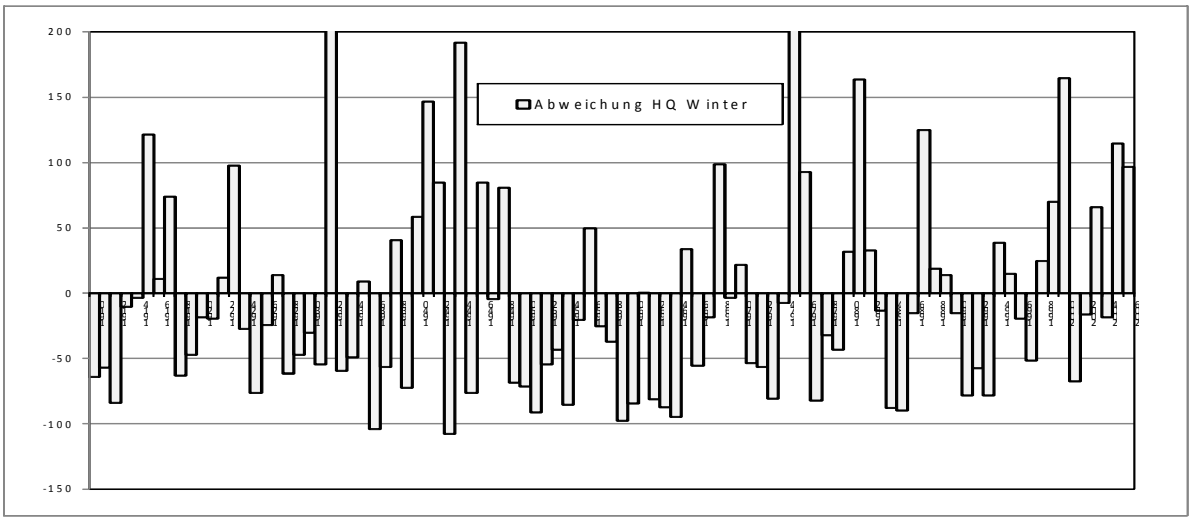


Abb. 4: Abweichungen der jährlichen Höchstabflüsse des Winterhalbjahres vom Mittelwert (in m^3/s) für den Pegel Wechselburg/Zwickauer Mulde. Zwischen 1949 und 1973 traten in 25 Jahren nur vier Ereignisse auf, die den langjährigen Mittelwert überschritten, im Zeitraum zwischen 1938 und 1948 (11 Jahre) dagegen 7 Ereignisse.

Die verfügbaren Hochwasserdaten zeigen, dass die von Gumbel angeführten Bedingungen der Extremwertstatistik durch Reihen der Jahreshöchstwerte nicht streng erfüllt werden. Versucht man z.B. das statistische Risiko (Stichprobeneffekt) abzuschätzen, so zeigt sich, dass große Hochwasserereignisse in einer Zeitreihe häufig gruppiert auftreten. Hochwasserarme und hochwasserreiche Zeitabschnitte wechseln einander ab, ohne dass die Länge dieser Zeiträume bisher hinreichend genau begründet werden kann. Die einzelnen Hochwasserer-

eignisse sind nicht voneinander unabhängig, d.h. auf einen hohen oder niedrigen Wert folgt eher ein Wert ähnlicher Größenordnung (Beispiel: Abbildung 4, durch die Persistenz lassen sich gegenläufige statistisch signifikante Trends für die Zeiträume 1940-1964 (r_{xy} = -0,56) und 1959-1976 (r_{xy} = 0,51) nachweisen).

Neben diesem Phänomen (Hurst-Effekt) treten weitere Einflussfaktoren auf, die die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf rein statistischem Wege in Frage stellen. Wie eingangs erwähnt, stellen in der Hydrologie die Daten den Schlüssel zu allen Forschungsarbeiten dar, mit denen Prozesse, die in der realen Welt ablaufen, identifiziert und beschrieben werden sollen. Leider kann keine wissenschaftliche Untersuchung eine schlechte Datenbasis ersetzen oder kompensieren. Im Gegensatz zu den meisten Gutachtermeinungen könnten einfache Analysen guter Daten mehr Praxisrelevanz besitzen als komplexe Analysen schlechter Daten. Ausschlaggebend für die Güte der Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten ist somit die Konsistenz der Daten. Nicht nur dass der Fehler der Abflussmessung generell mit zunehmender Größe der Abflüsse zunimmt, Stationsverlegungen, Beobachterwechsel, Veränderungen der Methodik der Abflusserfassung, Sedimentation und Erosion im Gewässerprofil des Pegels bewirken sprunghafte oder gleitende Veränderungen der Messgenauigkeit. Wenn man versucht, diese Ungenauigkeit hydraulisch zu quantifizieren oder zu beseitigen, verlagert sich die Unschärfe häufig auf diese Ansätze. Abbildung 5 belegt dies mit dem Beispiel der Abflusskurve am Pegel Hattingen/Ruhr (OERTEL et al. 2009). Trotz sorgfältigster Erfassung des Gewässerprofils besteht eine hohe Unsicherheit der Abflusskurve in Folge der jahreszeitlichen Variabilität der Rauheit. So schwanken z.B. bei einem Wasserstand von 600 cm die Abflüsse um ±17%. Die Autoren geben dazu folgenden Hinweis: „Da aufgrund der jährlichen Schwankungen und Veränderungen nicht von festen Zeitpunkten bestimmter Vegetationsformen ausgegangen werden kann, muss individuell entschieden werden, welche der entwickelten Abflusskurven zum jeweiligen Zeitpunkt zu wählen ist“ (OERTEL et al. 2009). Für Frühjahrs- und Herbsthochwasser dürfte dies somit schwierig sein.

Andere hydrologische Aspekte, die bei der statistischen Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten meist nicht hinreichend berücksichtigt werden, sind:

- Unterschiede in der Hochwassergenese (unterschiedliche Wetterlagen, räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilungen, Niederschlagsformen und Bodenfeuchteverhältnisse)
- Veränderungen in Einzugsgebieten und Hochwasserwellenablauf (kausale Instationaritäten, die von der stochastische Variabilität der Reihen (Beispiel Abbildung 4) zu unterscheiden sind)
- die unsichere Einordnung der größten Hochwasser durch empirische Wahrscheinlichkeiten, die vom Reihenumfang abhängen.

Das letztgenannte Problem ist besonders schwerwiegend für die Wahl der Verteilungsfunktion. Wenn sich unterschiedliche Verteilungsfunktionen hauptsächlich im Extrapolationsbereich seltener Ereignisse unterscheiden (Abbildung 3, unten rechts) spielen extreme Hochwasser bei der Wahl der Verteilungsfunktionen eine große Rolle. Deren statistische Einordnung hängt jedoch stark von der Länge der Beobachtungsreihe ab.

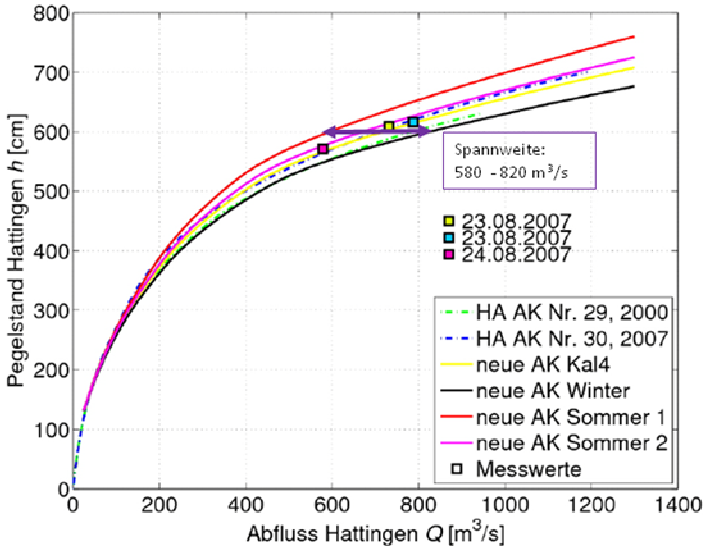


Abb. 5: Hydraulisch ermittelte Abflusskurven am Ruhr-Pegel Hattingen (OERTEL et al. 2009)

5. Von der Hochwasserstatistik zur Hochwasserhydrologie

Die von Gumbel genannten Bedingungen (homogene Stichprobe, gleiche Genese der Ereignisse, Unabhängigkeit der Ereignisse) sind für Hochwasser nicht gegeben. Es gibt Möglichkeiten, diese Bedingungen herzustellen (z.B. durch Datenprüfung und Homogenisierung der Reihen) oder aber durch zusätzliche Informationen die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten über die Extremwertstatistik hinaus zu verbessern. Diese Informationserweiterungen können wie folgt schematisiert werden (BLÖSCHL & MERZ 2008):

- Zeitliche Informationserweiterungen berücksichtigen das stochastische und das statistische Risiko. Durch die Analyse historischer Hochwasserereignisse können extreme Hochwasser über den Beobachtungszeitraum hinaus statistisch eingeordnet werden. Durch den Vergleich der statistischen Merkmale kurzer Beobachtungsreihen mit denen längerer Reihen benachbarter Pegel kann ein Beobachtungszeitraum unter Berücksichtigung der stochastischen Variabilität eingeordnet und die statistischen Kennwerte korrigiert werden.
- Kausale Informationserweiterungen berücksichtigen die Unterschiede in der Genese von Hochwasserereignissen z.B. durch die Analyse der Hochwasserentstehungsbedingungen, der Gebietsprozesse oder der saisonalen Hochwasserverteilung. Die Verwendung von Niederschlag-Abflussmodellen integrieren die Vorstellungen zu den Niederschlag-Abflussprozessen eines Gebietes und können zur Transformation von Niederschlags- in Abflussreihen genutzt werden. Unter bestimmten Bedingungen kann die Niederschlagsstatistik zur Transformation in eine Hochwasserabflussstatistik genutzt werden.
- Räumliche Informationserweiterungen können dazu verwendet werden, um Inhomogenitäten der Eingangsdaten aufzuzeigen und durch den räumlichen Ausgleich das statistische und das stochastische Risiko zu reduzieren. Sie sind die Voraussetzung um an unbeobachteten Gewässerquerschnitten Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu ermitteln.

Neben der Extremwertstatistik sind diese Möglichkeiten zur Informationserweiterung Gegenstand des im Herbst 2010 in das Gelbdruckverfahren gegangene DWA-Merkblattes M-552 „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“. In Fortschreibung des Merkblattes

251 des DVWK wird die Trennung zwischen dem hydrologischen Problem „Hochwasserwahrscheinlichkeit“ und dem prioritär angenommenen Lösungsverfahren der mathematischen Statistik überbrückt. Es verlässt die vorgegebenen Pfade der mathematischen Statistik, in dem eine stärkere Berücksichtigung der hydrologischen Besonderheiten gefordert wird. Natürlich werden die bestehenden hochwasserstatistischen Ansätze nicht in ihrer Gesamtheit in Frage gestellt. Stattdessen soll auf schematische Anwendungen der mathematischen Statistik (z.B. in Form von Anpassungsmaßen) verzichtet werden. Die Informationserweiterungen (Prüfung und -bewertung der Hochwasserdaten sowie zeitlich, kausal und räumlich erweiterte Informationen) sollen die Ergebnisse der hochwasserstatistischen Analyse ergänzen und untersetzen. Je nach Aufgabenstellung ist es nicht immer notwendig, alle Informationsquellen zu erschließen. Es wird jedoch empfohlen, möglichst viele dieser Informationen zu nutzen, da dadurch die Aussagekraft der Ergebnisse erhöht wird.

Im Gelbdruck- Verfahren wurde mehrfach der damit verbundene höhere Bearbeitungsaufwand angesprochen. In Tabelle 1 werden vier Stellungnahmen hierzu zitiert. Mit der Forderung nach Berücksichtigung zusätzlicher Informationen entsteht der Eindruck der Überforderung. Leider wird dabei übersehen, dass Informationserweiterungen nicht zwangsläufig die Anwendung komplexer Modelle bedeutet, die dem Praktiker nicht zur Verfügung stehen. Oft ist bereits durch wenige zusätzliche Arbeitsschritte (z.B. durch Aufstellung eines Abflussspendendiagramms, eines Hochwasserquantillängsschnittes, einer saisonalen Analyse oder eines Vergleichs der statistischen Kennwerte unterschiedlicher Zeitabschnitte) eine wesentlich verbesserte Belastbarkeit der Ergebnisse hochwasserstatistischer Analysen zu erreichen. Eine Berücksichtigung zusätzlicher Informationen zum Gebietsverhalten bei extremen Abflussverhältnissen und darauf aufbauende Überlegungen zu Prozessabläufen sollten in Hinblick auf die immanenten Defizite der Hochwasserstatistik selbstverständlich sein. Dies setzt allerdings voraus, dass bei den Bearbeitern gleichermaßen hydrologische und mathematisch-statistische Kenntnisse vorhanden sind.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Hochwasserprozesse und der Tatsache, dass für jedes Gebiet unterschiedliche Daten und Informationen vorliegen, ist es schwierig, eine stringente Methodik zur Informationserweiterung und -kombination vorzuschlagen. Die geeignete Wahl der Methoden hängt immer vom Einzelfall, den verfügbaren Daten und der Informationsbasis ab. Auf Grund unterschiedlicher regionaler hydrologischer Bedingungen aber auch der bestehenden methodischen Komplexität (z.B. bei der Rekonstruktion historischer Hochwasser oder in der Entwicklung von Regionalisierungsansätzen) ist eine methodische Vorgabe schwierig. Die Berücksichtigung der genannten Aspekte und Probleme bei Auftraggebern, Bearbeiter und Aufsichtsbehörden erfordert in erster Linie regionales hydrologisches Verständnis und die Bereitschaft, ggf. zusätzliche Untersuchungen durchzuführen um Unsicherheiten bei der Ermittlung von Hochwahrscheinlichkeiten zu reduzieren. Bei der Festlegung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten sollten dann diese zusätzlichen Informationen einbezogen werden, um die Plausibilität der Ergebnisse der hochwasserstatistischen Analyse an Hand der weitergehenden Untersuchungen zu untersetzen.

Tab.1: Pro und Contra Informationserweiterung

Pro	Contra
„Eine HQn - Ermittlung unter Einbeziehung aller Überlegungen der vorliegenden Arbeit stellt natürlich einen erheblichen Aufwand und damit verbunden hohe Kosten dar. Der hohe "WERT" einer soliden Bearbeitung sollte deutlich hervor gehoben werden, damit zukünftig "Schnellschüsse" unter dem meist gegebenen hohen Kostendruck in der Wirtschaft vermieden werden.“	„Wenn das Merkblatt zum Standard erhoben wird, verbleibt die Frage, in welcher Tiefe Betrachtungen künftig auszuarbeiten sind. Aus Kostengründen kann man nicht überall eine Dissertation aus der Abflussermittlung machen.“
„Besonders zu begrüßen ist die Einführung des Begriffs “Extremwerthydrologie” statt “Extremwertstatistik”. Hiermit zeigt das Merkblatt, dass es sich bei der Ermittlung von HW-Wahrscheinlichkeiten um eine komplexe Aufgabe handelt, …. Die letztgenannte Notwendigkeit kann noch etwas stärker betont werden, um den Zielpersonen (in Behörden, Ingenieurbüros, u.a.) bereits vor Beginn ihrer Arbeiten eine bessere Einschätzung des notwendigen Aufwands zu ermöglichen.“	„Ich bin der Meinung, dass Ingenieurbüros keine Wissenschaft betreiben müssen, und dass es die Aufgabe der Wissenschaft ist, ihnen Verfahren zu liefern, die zwar wissenschaftlich entstanden sind, die aber am Ende in einem Merkblatt in vereinfachten Verfahren und Regeln ihren Niederschlag finden müssen. Diese Aufgabe hat der Entwurf verfehlt…“

6. Zusammenfassung

In der Einleitung wurde die zwei grundlegend unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten von Wahrscheinlichkeiten (aleatorische und epistemische Wahrscheinlichkeiten) dargestellt. Hochwasserwahrscheinlichkeiten, die auf der Grundlage der mathematischen Statistik ermittelt wurden, werden in der Regel als objektive Wahrscheinlichkeiten betrachtet, obwohl subjektive Komponenten (z.B. die Annahmen, dass die Datenbasis repräsentativ und homogen ist oder das die gewählte Verteilungsfunktion auch im Extrapolationsbereich zutrifft) enthalten sind. Der Bearbeiter drückt mit der Verwendung der Ergebnisse seine Überzeugung aus, dass diese Annahmen zutreffen.

Hochwasserwahrscheinlichkeiten sollen das natürliche Risiko quantifizieren. In der Praxis wird jedoch das hydrologische Risiko benötigt, was zusätzlich das stochastische und das statistische Risiko sowie die Modellunsicherheit beinhaltet. Verschiedene Aspekte dieser Risikokomponenten wurden erläutert. Wenn zusätzliche Informationen, die gerade diese Risikokomponenten berücksichtigen, die Aussagen der Extremwertstatistik stützen, steigt damit das Vertrauen in das Ergebnis der statistischen Analyse. Sowohl Auftraggeber und Auftragnehmer gewinnen an Überzeugung, dass die ermittelten Hochwasserwahrscheinlichkeiten das hydrologische Risiko repräsentieren. Es ist erforderlich, diese Brücke von der nur vermeintlich objektiven Wahrscheinlichkeit der Extremwertstatistik hin zum subjektiven Überzeugtheitsgrad, mit der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in der Praxis verwendet werden, zu schlagen.

Literatur

BLÖSCHL, G. & R. MERZ (2008): Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. Wasserwirtschaft, 98 (11) 12-18.

DIN 19700 (2004): Stauanlagen: Teil 10 - Gemeinsame Festlegungen, Teil 11 - Talsperren, Teil 12 - Hochwasserrückhaltebecken.

DVWK (1979): Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 101.

DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, DVWK-Merkblatt 251/1999

DYCK, S. (Hrsg.) (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 1, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

GUMBEL, E. J. (1941): The Return Period of Flood Flows, Ann. Math. Statist. Volume 12, Number 2, 163-190.

KLEIN, B. (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren, Schriftenreihe Hydrologie/ Wasserwirtschaft Ruhr- Universität Bochum, Heft 25.

OERTEL, M., A. SCHLENKHOFF, G. MORGENSCHWEIS (2009): Überprüfung von Abflusskurven für die Pegel Wetter und Hattingen an der Ruhr nach den Hochwasserereignissen im August 2007 mit Hilfe von numerischen 2-D-Modellen, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa), 53. Jahrgang, Heft 6, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Interaktion zwischen hydrologischer Forschung und Praxis als Antrieb für Innovation

Wolfgang Kinzelbach

Die Lücke zwischen dem Bedarf der Praxis an hydrologischen Methoden und den Themen der wissenschaftlichen Forschung wächst ständig. Dies führt zu Frustration bei Praktikern und Forschern gleichermassen. Die PraktikerInnen verstehen die hoch-mathematisierten Methoden der Forschung nicht mehr und die ForscherInnen sind enttäuscht, dass ihre Methoden nicht genutzt werden. Eklatantestes Beispiel ist die stochastische Modellierung von Aquiferen. Relativ wenig von dem was in 30 Jahren an Arbeiten entstand, ist in die Praxis eingezogen. Der Gegensatz zwischen Praxis und Theorie ist natürlich und sollte nicht nur als Nachteil sondern auch als Chance gesehen werden. Das Spannungsfeld ist letztlich Antrieb für dauerhafte Innovation. Damit es wirksam wird, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Nachwuchskräfte und spin-offs sind notwendig für den natürlichen Export neuer Methoden aus der Hochschule. Aufgeschlossene PraktikerInnen müssen das Wagnis zu Experimenten eingehen. Die TheoretikerInnen müssen ihre Theorien in verständliche Worte und nutzerfreundliche Software einkleiden. An drei Beispielen wird gezeigt, wie es funktionieren kann: Diese sind die Fluggeophysik des Okavango Deltas, die Echtzeitsteuerung des Wasserwerks Zürich Hardhof und die Planung der Wasserallokation im Yanqi-Becken in China. Während die Praxis von der Theorie keine Wunder erwarten darf, muss die Forschung dankbar sein für den harten Prüfstein der Praxis.

Gewässerbewirtschaftung in Österreich – aktuelle und zukünftige Herausforderungen

Robert Fenz

In den verschiedenen Sektoren der Wasserwirtschaft wurden in den vergangenen Jahrzehnten wesentliche Fortschritte erzielt. Die Verschmutzungen der Fließgewässer und Seen wurde durch enorme Anstrengungen in der Abwasserreinigung weitgehend beseitigt, rund 90% der Bevölkerung werden heute von zentralen Wasserversorgungsanlagen mit Trinkwasser aus Grund- oder Quellwasser versorgt, ein erheblicher Teil des besiedelten Gebiets verfügt über einen Hochwasserschutz bei einem 100 jährlichen Ereignis und rund 75% des Wasserkraftpotentials wird genutzt und deckt damit 60% der Stromerzeugung in Österreich ab. Trotz des Erreichten steht die Wasserwirtschaft auch heute vor großen Herausforderungen und Fragen hinsichtlich zukünftiger Strategien, bei deren Klärung die Wissenschaft wesentlich beitragen kann und soll. Es werden mehrere dieser Herausforderungen und Spannungsfelder aufgezeigt: So wird z.B. in Bezug auf Mikroschadstoffe zu klären sein, wie weit einem Vorsorge- oder aber einem risikobasiertem Ansatz bei der Maßnahmenfestlegung gefolgt werden soll. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für zukünftige Strategien zur Anpassung an den Klimawandel für die Wasserwirtschaft, wobei diese Strategien auf einem möglichst guten Wissen über die maßgeblichen Mechanismen und die Vulnerabilität des Gewässersystems basieren sollen. Die Gewässer in Österreich unterliegen bereits einem hohen Nutzungsgrad und daher werden für eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung geeignete planerische Strategien für den Interessensausgleich bei neuen Nutzungen wie z.B. der Wasserkraft erforderlich sein. Eine wesentliche Herausforderung liegt heute und zukünftig darin, Flächen für Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Gewässerrenaturierung zur Verfügung zu haben. Schließlich soll eine zukunftsfähige Wasserwirtschaft angesichts leerer Kassen der öffentlichen Haushalte kosteneffizient sein und bedarf geeigneter Finanzierungsinstrumente um Investitionen in Hochwasserschutzmaßnahmen und in die Instandhaltung der vorhandenen teuren Infrastruktureinrichtungen, wie z.B. die Kanalisationen, bezahlen zu können. Für alle diese Herausforderungen gilt, dass zukünftig in einem noch größeren Ausmaß als bisher, sektorübergreifende und einzugsgebietsbezogene Strategien und Planungen entwickelt werden müssen, die in der Praxis vollzogen werden können.

Vielzahl von Hochwasser im Jahr 2010 an Oder, Neiße, Spree und Schwarzer Elster – eine Herausforderung nicht nur für die wasserwirtschaftliche Praxis

Uwe Grünewald

Zusammenfassung

In Teilflusseinzugsgebieten von Oder und Elbe kam es im Jahr 2010 zu einer Ballung von Hochwasserereignissen. Wieder gab es Tote und erhebliche Schäden. Wieder reklamierten betroffene und aufgebrachte Bürger den von Medien und Politikern immer wieder versprochenen „Hochwasserschutz". Wieder zeigte sich in vielfältiger Weise, dass „Schnittstellen" „Schwachstellen" sind, dass sich Bauleitplanung nach wie vor noch zu häufig als „Bau-Leidplanung" darstellt usw.

Nur wenige politische Entscheidungsträger hatten die Einsicht und den Mut, den offensichtlichen Mangel an Flächen-, Bau-, Risiko- und Eigenvorsorge in breiten Kreisen der Öffentlichkeit, der Wirtschaft, der Bevölkerung usw. offen zu thematisieren. Deutlich wurde aber auch erneut der Mangel in Theorie und Praxis, den Umgang mit Hochwasserrisiken ausgewogen zu kommunizieren und die in verschiedenen anderen Regionen und bei anderen solchen Extremereignissen „gelernten Lektionen" breitenwirksam zu vermitteln.

Hier liegt nach wie vor ein großes Defizit der ressort- und akteursübergreifenden Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung.

1. Das Hochwasserjahr 2010 aus globaler und regionaler Sicht

Das Jahr 2010 war aus „global-hydrologischer" Sicht vor allem geprägt durch die verheerende Flutkatastrophe in Pakistan. In der dortigen Region Peschawar sollen nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2010a) im Zeitraum vom 01. Juli bis 10. August 2010 die größten Regenmengen seit 150 Jahren beobachtet worden sein. Die Hochwasserschäden waren beträchtlich (MUNICH RE 2010). Es wird von 20 Millionen Flutopfern mit weit mehr als Tausend Toten berichtet. Im Rahmen der internationalen Hilfe aktivierte am 6. August 2010 die Europäische Gemeinschaft ihr „EU-Katastrophenschutzverfahren" (BEHÖRDEN SPIEGEL 2010, S. 4).

Fast gleichzeitig prägte sich am (Freitag, den) 06. und (Sonnabend, den) 07.08.2010 mit der von Norditalien über die Alpen ziehenden „Vb-artigen Zugbahn des Boden-"Tiefs „Viola" (BISSOLLI & RAPP et al. 2010) in der Grenzregion Tschechien, Polen und Deutschland ein „regional-hydrologisch" bedeutendes Hochwasserereignis aus.

„Nachdem zuerst Bayern und der Alpenrand betroffen waren, wurde am Freitag und Samstag vor allem Sachsen mit unwetterartigen Regenfällen heimgesucht. Vollgesogen mit feuchter Luft aus dem Mittelmeerraum bildeten sich an einer Luftmassengrenze, die sehr warme Luft im Osten und recht kühle Luft in Westeuropa trennte, zahlreiche Schauer und Gewitter. Besonders in der Grenzregion zu Tschechien und Polen kamen im Stau der Gebirge extrem hohe Regenmengen zusammen. Dabei traten in den engen Tälern des Erzgebirges und des Zittauer Gebirges viele Bäche und Flüsse über die Ufer, einige Ortschaften wurden regelrecht überflutet. Zahlreiche Keller liefen voll, die Stromversorgung von Tausenden wurde unterbrochen. Im Landkreis Görlitz wurde am Samstag Abend Katastrophenalarm ausgelöst,

nachdem im polnischen Radmeritz der Witka-Staudamm gebrochen war und eine Flutwelle die Neiße entlang rollte. In Neukirchen im Erzgebirge ertranken drei Menschen beim Versuch Gegenstände aus einem vollgelaufenen Keller zu bergen“ (DWD 2010b).
Bereits Mitte Mai 2010 führten während der Eisheiligen starke Niederschläge, die mit dem (Vb)Tiefdruckgebiet „Yolanda“ verbunden waren, vor allem im Süden Polens, aber auch in Teilen z.B. der Slowakei, Tschechiens und Ungarns zu starken Hochwasserschäden (BIS-SOLI & FRIEDRICH et al. 2010). Die Flüsse March und Theiß trugen mit großen Abflüssen zu hohen Wasserständen in der Donau bei. In Polen waren vor allem die Weichsel und die Oder betroffen. In Städten wie Krakow und Wroclaw wurde der Notstand ausgerufen. Allein in Polen starben 19 Menschen. Durch die Oder waren auch Teile Brandenburgs betroffen. Insgesamt nahm aber das Mai-Hochwasser 2010 an der Oder keineswegs die Ausmaße (BELZ & WIECHMANN 2010) und die Schadwirkung (GRÜNEWALD et al. 1998) des Juli-Ereignisses von 1997 an. Auch wenn sich plötzlich z.B. mit der Notwendigkeit des „Bibermanagements“ neue Herausforderungen (MUGV 2011) ergaben, konnte u.a. festgestellt werden, dass die neuen modernen Oderdeiche in Brandenburg der Belastung gewachsen waren.
Nicht so bei dem Hochwasserereignis im August sowie später Ende September/Anfang Oktober an Neiße und Spree sowie (bis in das Jahr 2011 hinein) an der Schwarzen Elster. Die Flusseinzugsgebiete von Spree und Schwarzer Elster waren von den Hochwasserereignissen der Jahre 1997, 2002 und 2006 an Oder bzw. Elbe in großen Teilen verschont geblieben und die Schaden bringenden Wasserfluten trafen offensichtlich auf eine weitgehend unvorbereitete Bevölkerung und zum Teil Behörden. Ähnlich zum August-Ereignis 2002 im Elbegebiet offenbarten sich analog zu den damaligen Aussagen in der Ereignisanalyse des Umweltamtes der Landeshauptstadt Dresden (UMWELTAMT DRESDEN 2004, S. 3): „Das Augusthochwasser 2002 hat gnadenlos die Schwachstellen im Hochwasserschutz, im Unterhaltungszustand der Gewässer und in der Organisation der Hochwasserabwehr aufgezeigt“ die entsprechenden Schwachstellen an Neiße, Spree und Schwarzer Elster.
Wieder hagelte es Klagen und Schuldzuweisungen zwischen den verschiedenen Betroffenen, Institutionen und Akteuren z.B. über mangelnde bzw. mangelhafte (grenzüberschreitende) Vorwarnungen und Vorhersagen (z.B. SZ 09.08.2010, AG MELDEWEGE SMI 2010, SZ 17.12.2010), unzureichende Bemessung und hochwassergerechte Ausführung technischer Anlagen, mangelhafte Pflege und Unterhaltung von Deichen (z.B. SACHSEN.DE 10.08.2010), unzureichende technische und finanzielle Unterstützung während und nach dem Schadensereignis (z.B. SZ 11.08.2010, SZ 12.08.2010, SZ 02.09.2010, SZ 09.09.2010), mangelhafte (Eigen-)Vorsorge (z.B. SZ 27.10.2010) im kommunalen und privaten Bereich entlang der sächsisch-brandenburgischen Flüsse Neiße, Spree und Schwarze Elster. Besonders betroffen waren dabei zwar vor allem die Flussabschnitte und -teileinzugsgebiete in den „Hochwasserentstehungsgebieten“ in Polen und Tschechien sowie Sachsens, aber auch in den „Hochwasserdurchlaufgebieten“ Brandenburgs ergaben sich vielfältige Herausforderungen. Die kumulierten finanziellen Schäden der Hochwasser des Jahres 2010 im Freistaat Sachsen werden mit einer „Gesamtschadenssumme von deutlich über 900 Millionen Euro“ (SACHSEN.DE 12.11.2010) angegeben. Ähnlich konkrete Zahlenangaben zu den (Gesamt)Hochwasserschäden im Land Brandenburg waren bis Anfang

Februar 2011 nicht zu erschließen. „Der Landtag stellt fest: Das diesjährige Oderhochwasser verlief in Brandenburg ohne größere Schäden“ (19. Sitzung am 02.07.2010). Der Landrat des Elbe-Elster-Kreises wird bezüglich der Schwarzen Elster zitiert mit: „Die materiellen Auswirkungen des Hochwassers vom September/Oktober 2010 seien beträchtlich: „In der Landwirtschaft und im Gartenbau liegen die Schäden im zweistelligen Millionenbereich“ und: „Die geschätzten Kosten für die Deichreparatur liegen zwischen 30 und 50 Millionen Euro“ (MOZ 06.01.2011). Diese aufgetretene Häufung extremer Niederschlags- und Abflussereignisse passt in das Bild der beobachteten Zunahme von „Trog-Mitteleuropa(TRM)“-Wetterlagen (SMUL 2008). Offensichtlich muss sich die „heutige Gesellschaft“ auf eine zunehmende Gefahr durch Hochwasser ebenso einstellen, wie sie es Ende des 18. bis Mitte des 19. Jahrhunderts in dieser Region herausgefordert war zu tun (POLIWODA 2007).

2. Zur Praxis beim Hochwasserschutzversprechen, bei der Hochwasserbewältigung und bei der Hochwasservorsorge in unterschiedlichen deutschen Bundesländern

„Hochwasserschutz“ ist in DIN 4047 definiert als „Gesamtheit der Maßnahmen des Gewässerausbaus durch Gewässerregelungen und Bedeichung, der Hochwasserrückhaltung und/oder der baulichen Veränderung an den zu schützenden Bauwerken und Anlagen, die dazu dienen, das Überschwemmungsgebiet zu verkleinern, den Hochwasserstand zu senken und/oder den Hochwasserabfluss zu ermäßigen“.

D.h. die Anstrengungen zum Hochwasserschutz konzentrieren sich auf sogenannte „reaktive“ Maßnahmen. Im Prinzip findet man sich mit den ablaufenden Hochwasserwellen ab und versucht, das Ableitungssystem den Abflüssen anzupassen.

Auch wenn heute selbst in Bayern kaum mehr von „Hochwasserfreilegung“ o. ä. gesprochen wird, ist der traditionelle „Hochwasserschutz-Ansatz“, wie er im föderalen Deutschland bisher überwiegt, durch ein Sicherheitsdenken geprägt, das meist dann erst wieder aktiv wird, wenn Schäden durch Hochwasser auftreten. Daraufhin wurde der Hochwasserschutz entsprechend so konzipiert, dass man sicher zu sein scheint, sollte genau dieses Schadensereignis noch einmal eintreten. Häufig wird dabei der Schutz auf solche fixierte Bemessungswerte ausgerichtet wie z.B. das 100-jährliche Hochwasser.

Nicht zuletzt wurde im Rahmen der Lesson-Learned-Studie zum Elbe-Hochwasser 2002 (DKKV 2003) herausgearbeitet, dass diesem traditionellen Ansatz vernünftigerweise eine Risikokultur entgegenzusetzen ist, die sich der (permanenten) Bedrohung durch Naturereignisse wie Hochwasser bewusst ist. Sie erlaubt es, potenzielle Gefährdungen und Schäden und deren Veränderungen transparent und über Fachgrenzen hinweg darzustellen und zu beurteilen.

Anstatt „Hochwasserschutz“ zu versprechen, wurden eine bewusste Auseinandersetzung und ein bewusster „Umgang mit den Hochwasserrisiken“ angemahnt. Grundlage dafür sind beispielsweise die Offenlegungen von Gefahren und Verletzlichkeiten. Deutlich wird, dass ein solches „Hochwasserrisikomanagement“ in Einheit von Hochwasservorsorge und Bewältigung eine Querschnittaufgabe ist, die nicht sektoral und disziplinär bewältigt werden kann (GRÜNEWALD 2005).

Inzwischen hat die „Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser“ (LAWA) durch ihren (nach wie vor zwar konservativ benannten) ständigen Ausschuss „Hochwasserschutz und Hydrolo-

gie“ im Februar und März 2010 Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten“ und „Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagement(HWRM)plänen“ (LAWA 2010 a, b) erarbeitet. Der dort dargestellte „HWRM-Zyklus“ lehnt sich eng an den „Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements“ (aus DKKV 2003) an.

Diese LAWA-Empfehlungen sollten eigentlich auch für die beiden deutschen Bundesländer Brandenburg und Sachsen Leitlinie ihres Handelns sein. Wertet man diesbezüglich die Hochwasserberichterstattung der Medien wie z.B. der „Sächsischen Zeitung“ und der „Lausitzer Rundschau“ aus, so dominiert offensichtlich nach wie vor seitens Politik und Behörden das traditionelle Hochwasserschutzversprechen und demgemäß in der Bevölkerung die entsprechende erweckte Schutzerwartung. Analysiert man daraufhin die Fach- und Öffentlichkeitsarbeit der entsprechenden Ministerien und Behörden der beiden Bundesländer, so lässt sich zum großen Teil feststellen, dass dies leider offensichtlich zutrifft (z.B. LTV 2010, STK BRANDENBURG 2010).

Zwar mahnt der (CDU-)Ministerpräsident des Freistaates Sachsen öffentlich eine „höhere Eigenvorsorge“ bzw. „Risikovorsorge“ als Element des Hochwasserrisikomanagement-Kreislaufs bzw. –Zyklus an (z.B. SZ 27.10.2010), wird aber dafür u.a. von seinem (FDP-) Regierungskoalitionspartner, den Medien und Teilen der betroffenen Bevölkerung massiv kritisiert (z.B. SZ 09.09.2010). Unabhängig davon erließ aber die sächsische Staatsregierung im Rahmen der Hochwasserbewältigung in den Schadgebieten die „Richtlinien Hochwasser 2010“ für Private, Unternehmen, Kommunen und Härtefälle (SMI 21.10.2010) umfangreiche finanzielle Hilfen (SACHSEN.DE 12.11.2010).

Vergleichbare finanzielle Hilfen für Private gibt es in Brandenburg nicht. Für Gemeinden, Gemeindeverbände und Landkreise wird auf das „Brandenburgische Finanzausgleichsgesetz“ bzw. das „Brandenburgische Brand- und Katastrophenschutzgesetz“ verwiesen (LANDTAG BRANDENBURG 10.11.2010).

Bezüglich der Hochwasservorsorge muss aber die Haltung und Handlung der sächsischen Landeshauptstadt Dresden hervorgehoben werden. Unbeirrt von anderen sächsischen ministeriellen und behördlichen „Hochwasserschutzstrategien“ entwickelte sie nach den Augustfluten 2002 an der Elbe stetig und zielstrebig den „Plan Hochwasservorsorge Dresden (PHD)“ weiter. Er wurde am 12.08.2010 im Stadtrat beschlossen (PHD 2010). Diese Hochwasservorsorgestrategie des Landeshauptstadt Dresden erfüllt nicht nur formal sondern vor allem inhaltlich wesentliche Anforderungen der neuen europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG 2007) und des deutschen Gesetzes zur Neuregelung des Wasserrechtes vom 31.07.2009, das im März 2010 in Kraft gesetzt wurde und besitzt m. E. Vorbildfunktion weit über die Betrachtungsregion hinaus.

3. Wir tun uns aber auch in der Theorie nach wie vor schwer beim Umgang mit und der Kommunikation von Hochwassergefahren und -risiken

„Risiko“ ist allgemein zu charakterisieren durch das Produkt der beiden Faktoren „Ausmaß zu erwartender Schäden“ und der „Wahrscheinlichkeit, mit der diese auftreten können“. Beim Hochwasserrisiko gilt, dass die Gefährdung durch Abflüsse, die zu Überschwemmungen z.B. mit hohen Wasserständen oder Fließgeschwindigkeiten führen, fast immer über Eintritts-

wahrscheinlichkeiten und die Schadenempfindlichkeit bzw. Vulnerabilität vor allem durch die Elemente „Exposition“ und „Anfälligkeit“ charakterisiert werden.
Traditionelle (deutsche) Hochwasserschutzstrategien betrachteten dagegen vor allem Maßnahmen zur Verminderung von Abflüssen und Überschwemmungen bzw. strebten die Anpassung der „Vorfluter“ und Gewässersysteme an sogenannte Bemessungsabflüsse an und ließen beispielsweise jahrzehntelang die Bebauung von Flussauen mit Gewerbegebieten oder Wohnsiedlungen sowie die immer weitergehende Eindeichung und den Ausbau von Flüssen zu.
Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre und Jahrzehnte mit hohen Schäden nicht nur in Sachsen und Brandenburg machten jedoch die Mängel dieser reaktiven Strategie deutlich und führte jüngst auch zu den neuen Strategieempfehlungen durch die LAWA (2010 a, b). Offensichtlich ist aber die Auseinandersetzung und der Umgang mit (Natur-)Gefahren, Ungewissheiten, Unsicherheiten, möglichen Schäden, Risiken usw. außerordentlich subjektiv und durch vielfältige emotionale Erfahrungen und Faktoren sowie vielfältige Akteure geprägt.
Erfolgreich wird diese Kommunikation erst dann sein, wenn nicht nur über das „wie“ der externen Vermittlung solcher Risiken an die Öffentlichkeit im Sinne von DKKV (2003)

- Risikoanalyse – „Was kann überhaupt passieren?
- Risikobewertung – „Was darf nicht passieren?“ bzw. „Welche Sicherheit zu welchem Preis?“
- Risikoumgang – „Wie kann mit dem Risiko bestmöglich umgegangen werden?“

sondern auch über das „was“ dieser Vermittlung intern im Bereich z.B. der Politik, der Fachbehörden und der Wissenschaft Klarheit besteht.
Die dargestellten Grundhaltungen von Behörden und Politikern in Sachsen und Brandenburg verdeutlichen mit wenigen Ausnahmen – abgesehen z.B.vom beispielhaften Handeln der Landeshauptstadt Dresden – eine weitgehende Unklarheit zu diesem „was“ des Hochwasser-Risikomanagements und der Hochwasser-Risikokommunikation (z.B. LANDTAG BRANDENBURG 02.07.2010). In (GRÜNEWALD 2011) ist dazu ausgeführt:
„Ohne Zweifel ist eine an die Öffentlichkeit gerichtete „externe“ Risikokommunikation und eine damit verbundene Offenlegung von Risiken im Sinne der Risikoanalyse („Was kann passieren?“) notwendig. Bedrohungen und ihre Auswirkungen sowie Möglichkeiten der Vorsorge sind transparent zu diskutieren, in die politische Meinungsbildung einzugliedern und in der Öffentlichkeit zu kommunizieren. Hiermit sind stärkere Anstrengungen zur Bewusstseinsbildung verbunden.
Ein angemessenes Risikobewusstsein ist für die Akteure des Kreislaufs von Hochwasservorsorge und -bewältigung unerlässlich. Dabei ist aber die Entwicklung eines externen Risikobewusstseins nicht nur in der Öffentlichkeit und bei den potenziell Betroffenen notwendig, sondern auch die Entwicklung eines solchen „internen Risikobewusstseins“ in Politik und in den Verwaltungsbehörden.
Zu beachten ist auch, dass Risiken und Möglichkeiten der Vorsorge sich mit der Zeit ändern. Dies erfordert umso mehr ein kontinuierliches Monitoring und ein kontinuierliches (politisches, gesellschaftliches und finanzielles) Engagement. Es reicht nicht aus, anlassbezogen, d.h. nur nach Schadenerfahrungen zu reagieren. Schließlich bedeutet der Paradigmenwechsel vom Sicherheitsdenken zu einer Risikokultur eine engere Zusammenarbeit der Akteure

von Vorsorge und Bewältigung. Die Konzentration auf die Beherrschbarkeit von Hochwasser wird ersetzt durch Strategien zum Umgang mit dem Hochwasser. („Was darf nicht passieren? Welche Sicherheit für welchen Preis?“) Damit verliert die vielerorts anzutreffende Trennung zwischen Akteuren der Hochwasservorsorge und -bewältigung an Bedeutung.
Letztlich ist die Diskussion über das Hochwasserrisiko mit der Diskussion über andere Naturrisiken und technologische Risiken zu verknüpfen. Ziel wäre die kohärente Behandlung aller Risiken, denen die Menschen in einer bestimmten Region ausgesetzt sind („Wie kann mit dem Risiko bestmöglich umgegangen werden?“). Am besten gelingt das, wenn die verschiedenen Akteure des Hochwasserrisikomanagements die Partizipation der potenziell betroffenen Bevölkerung wecken und aufrechterhalten können.“
Wege dazu wurden u.a. im BMBF-Verbundforschungsprogramm RIMAX analysiert und aufgezeigt (MERZ, BITTNER, GRÜNEWALD, PIROTH 2011) und inzwischen auch teilweise umgesetzt. Offensichtlich gibt es aber noch viel zu tun, um sich den sich verändernden Hochwasserrisiken nicht nur in Brandenburg und Sachsen besser anzupassen. **Bei Hochwasser scheint es so wie mit dem Alter zu sein: Vor Alter kann man sich nicht schützen, man sollte jedoch in möglichst vielfältiger Weise Vorsorge betreiben und wenn es dann kommt, die Risiken (möglichst in Gemeinschaft) zu bewältigen versuchen.**

Literatur

AG MELDEWEGE SMI (2010): Staatsministerium des Innern: Bericht der gemeinsamen sächsisch-polnischen Arbeitsgruppe zur grenzüberschreitenden Kommunikation während des Augusthochwassers 2010 (AG „Meldewege“). http://www.smi.sachsen.de/download/SMI/Abschlussbericht.pdf (abgerufen am 05.01.2011)

BEHÖRDEN SPIEGEL (2010): Größte Regenmengen in Peschawar seit 150 Jahren. Newsletter Netzwerk Sicherheit Nr. 292, 23. August 2010.

BELZ, J. U. & W. WIECHMANN (2010): Frühjahrshochwasser im Osten und Südosten Deutschlands. Bundesanstalt für Gewässerkunde. www.bafg.de (abgerufen am 05.01.2011).

BISSOLLI, P., J. RAPP, K. FRIEDRICH, M. ZIESE, E. WEIGL, H. NITSCHE, G. MALITZ, A. BECKER, (2010): Zur Rolle des Starkniederschlages am 7.-9. August 2010 im Dreiländereck Polen, Tschechien, Deutschland bei der Entstehung der Hochwasser von Neiße, Spree und Elbe. http://www.dwd.de (abgerufen am 08.12.2010)

BISSOLI, P., K. FRIEDRICH, J. RAPP, M. ZIESE (2010): Hochwasser im östlichen Mitteleuropa im Mai 2010. http://www.dwd.de (abgerufen am 05.01.2011)

DKKV (2003): Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (Hrsg.): U. Grünewald, M. Kaltofen, S. Schümberg, B. Merz, H. Kreibich, T. Petrow, A. Thieken, W. Streitz, W. R. Dombrowsky: Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Schriftenreihe des DKKV Heft 29, 150 S.

DWD (2010a): Größte Regenmengen in Peschawar seit 150 Jahren. Deutscher Wetterdienst – Presse-Info. 12.08.2010. Internet: http://www.dwd.de (abgerufen am 05.01.2011).

DWD (2010b): Extreme Niederschläge in Deutschland. Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Thema des Tages. 08.08.2010, 07.59 Uhr, Internet: http://www.dwd.de (abgerufen am 08.08.2010).

EG (2007): Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union. L 288/27, 06.11.2007, 8 S.

GRÜNEWALD, U. et al. (1998): Ursachen, Verlauf und Folgen des Sommer-Hochwassers 1997 an der Oder sowie Aussagen zu bestehenden Risikopotentialen. Eine interdisziplinäre Studie – Langfassung. Deutsche IDNDR-Reihe 10b. Bonn 1998, Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e. V.; 187 S.

GRÜNEWALD, U. (2005): Hochwasserrisikomanagement als Kreislauf von Vorsorge und Bewältigung - eine Aufgabe, die nicht sektoral zu bewältigen ist. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Flussgebietskonferenz 2005 der Bundesregierung. Forum 4, Katastrophenschutz – Koordinierung (Bund, Länder und Gemeinden) Umgang mit Katastrophensituationen – Katastrophenvorsorge. 23./24.06.2005, Berlin, S. 164-168. Internet: http://www.bmvbs.de/Anlage/original_961406/Dokumentation-der-Flussgebietskonferenz-2005-Teil-III.pdf.

GRÜNEWALD, U. (2011): Risikokommunikation. In: MERZ, B., BITTNER, R., GRÜNEWALD, U., PIROTH, K. (Hrsg.): Management von Hochwasser-Risiken mit Beiträgen aus den RIMAX-Forschungsprojekten. Schweizerbart-Verlag. S. 195-204 (in Vorbereitung).

LANDTAG BRANDENBURG (02.07.2010): Plenarprotokoll. Landtag Brandenburg. 5. Wahlperiode. 19. Sitzung. Potsdam, 2. Juli 2010. www.parldok.brandenburg.de (abgerufen am 05.01.2011).

LANDTAG BRANDENBURG (10.11.2010): Ausgleich der Hochwasserschäden an Schwarzer Elster und Pulsnitz. Plenarprotokoll 5/24, 10. November 2010 www.parldok.brandenburg.de (abgerufen am 05.01.2010).

LAWA (2010a): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. LAWA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, beschlossen auf der 139. LAWA-VV am 25./26. März 2010, Dresden, 38 S., Internet: http://www.lawa.de/documents/HWGK15062010_8d8.pdf (Zugriff am 18.08.2010)

LAWA (2010b): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser: (Hrsg.): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. Beschlossen auf der 139. LAWA-VV am 25./26. März 2010 in Dresden, 53 S.

LTV (2010): Landestalsperrenverwaltung Sachsen (Hrsg.): Hochwasserschutz für Dresden. http://www.forsten.sachsen.de/ltv/download/LTV_FL_Buergerinfo_Dresden.pdf (abgerufen am 05.01.2010)

MERZ, B., BITTNER, R., GRÜNEWALD, U., PIROTH, K. (2011): Management von Hochwasser-Risiken mit Beiträgen aus den RIMAX-Forschungsprojekten. Schweizerbart-Verlag. (in Vorbereitung)

MOZ (06.01.2011): Landrat fordert Deichsanierung an Schwarzer Elster. Märkische Oderzeitung. 06.01.2011. http://www.moz.de/artikel-ansicht/dg/0/1/275432/ (abgerufen am 06.01.2011)

MUGV (2011): Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Tack: Schutz der Hochwasseranlagen hat absolute Priorität (06.07.2010). http://www.mugv.brandenburg.de/sixcms/detail.php/5lbm1.c.122956.de (ab¬ge¬rufen am 05.01.2011).

MUNICH RE (2010): Munich RE NatCatSERVICE. www.munichre.com (abgerufen am 05.01.2011)

PHD (2010): Plan Hochwasservorsorge Dresden. Landeshauptstadt Dresden. http://www.dresden.de/de/08/03/053/132010100000259251.php (abgerufen am 05.01.2011).

POLIWODA, G. N. (2007): Aus Katastrophen lernen. Köln, Verlag Böhlau, 295 S.

SACHSEN.DE (10.08.2010): Erste Daten und Fakten zum Augusthochwasser 2010 in Sachsen. http://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/157225. (abgerufen am 05.01.2011)

SACHSEN.DE (12.11.2010): Hochwasser in Sachsen 2010. Ostritz und Kloster Marienthal erhalten Fördermittel zur Beseitigung der Hochwasserschäden. http://www.regionen.sachsen.de (abgerufen am 05.01.2011).

SMI (2010): Staatsministerium des Innern: Richtlinien Hochwasser 2010. 21.10.2010. 28 S. http://www.regionen.sachsen.de/download/internet_BM_21.10.2010.pdf (abgerufen am 05.01.2011)

SMUL (2008): (Hrsg.): Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden, 211 S.

STK BRANDENBURG (2010): Staatskanzlei Brandenburg: Zu den Ergebnissen der Kabinettssitzung teilt Regierungssprecher Thomas Braune mit: Hochwasserschutz bleibt unverzichtbare Schwerpunktaufgabe. 23.11.2010. http://www.stk.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.232078.de (abgerufen am 05.01.2011)

SZ (09.08.2010): Naturgewalt ohne Vorwarnung. Sächsische Zeitung. 09. August 2010, S. 3.

SZ (11.08.2010): Sächsische Top-Firmen von Flut hart getroffen. Sächsische Zeitung. 11. August 2010, S. 1

SZ (12.08.2010): Das Hochwasser in Sachsen. Jeder Euro Zinsen wäre zuviel. Sächsische Zeitung. 12. August 2010, S. 3.

SZ (02.09.2010): Flutgeschädigte Unternehmer fühlen sich im Stich gelassen. Sächsische Zeitung. 02. September 2010, S. 23

SZ (09.09.2010): Hochwasseropfer empfangen Ministerpräsident Tillich in Zittau mit Pfiffen. Sächsische Zeitung. 09. September 2010, S. 8.

SZ (27.10.2010): Tillich fordert mehr Eigenvorsorge gegen Hochwasser und mehr Angebote der Versicherungen. Sächsische Zeitung. 27. Oktober 2010, S. 6.

SZ (17.12.2010): Was ist schiefgelaufen bei der August-Flut? Sächsische Zeitung. 17. Dezember 2010. S. 5

UMWELTAMT DRESDEN (2004): Analyse und Schlussfolgerungen für den Hochwasserschutz in Dresden. In: Flutkatastrophe 2002: Das Augusthochwasser in Dresden. Landeshauptstadt Dresden, Umweltamt, CD-ROM.

Regionalisierung von Hochwasserabflüssen in Sachsen

Jörg Walther, Ralf Merz, Gregor Laaha, Uwe Büttner

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer landesweiten Regionalisierung von Hochwasserabflüssen in Sachsen vorgestellt. Die Datengrundlage bildeten beobachtete Scheitelabflüsse an insgesamt 179 Pegeln. Im Anschluss an die Prüfung der Abflussdaten wurden für 113 dieser Pegel die beobachteten Jahreshöchstabflüsse unter Berücksichtigung der Saisonalität und historischer Hochwasserereignisse extremwertstatistisch ausgewertet. Als regional gültige Verteilungsfunktion wurde dabei die Allgemeine Extremwertverteilung zugrunde gelegt. Für die Regionalisierung wurden zwei unterschiedliche Basisverfahren eingesetzt: das Index-Flood-Verfahren und Top-Kriging. Beim Index-Flood-Verfahren erfolgt eine Übertragung der höheren Momente der Verteilungsfunktion innerhalb homogener Regionen, während bei Top-Kriging eine räumliche Interpolation der Momente entlang des Gewässernetzes erfolgt. Zur Bildung von homogenen Regionen für das Index-Flood-Verfahren wurden die beiden Klassifikationsverfahren Clusteranalyse und Regressionsbaum angewendet. Im Ergebnis wurden auf Basis eines Regressionsbaums vier homogene Regionen abgegrenzt. Die Anwendung der beiden Basisverfahren erfolgte in sechs verschiedenen Verfahrenskombinationen. Zur Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Verfahren wurde ein Jack-Knife-Vergleich für die durch Pegel beobachteten Einzugsgebiete durchgeführt. Als Vorzugsverfahren für Sachsen wird eine Kombination aus Georegression, Top-Kriging und Index-Flood-Verfahren empfohlen.

1. Zielstellung, Datengrundlage und Pegelauswahl

Im August 2009 beauftragte das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) die DHI-WASY GmbH und die TU Wien mit der Erarbeitung einer auf die hydrologischen Verhältnisse im Freistaat Sachsen zugeschnittenen landeseinheitlichen Methodik zur Bestimmung von Hochwasserscheitelabflüssen mit Wiederkehrintervall HQ_T für unbeobachtete Gewässerquerschnitte. Für die Untersuchungen standen Abflussbeobachtungen an insgesamt 204 gewässerkundlichen Pegeln sowie verschiedene Geodatenthemen zur Verfügung. Anhand der flächendeckend vorliegenden Geodaten wurden für die Pegeleinzugsgebiete folgende Gebietskenngrößen bestimmt: Einzugsgebietsfläche und -form, Fließgewässerdichte, Wald- und Bebauungsanteil, nutzbare Feldkapazität und hydraulische Leitfähigkeit, Geländegefälle und -höhe, mittlerer Niederschlag und Starkniederschlagshöhe und -häufigkeit.

Die Aufbereitung der Abflussdaten umfasste

- die Verlängerung, Ergänzung oder Zusammenführung von Reihen,
- die Korrektur von Daten entsprechend der Vorgabe des LfULG,
- die Prüfung der Plausibilität von extremen Hochwasserereignissen,
- die Prüfung der Homogenität der gebildeten Reihen,
- die abschließende Festlegung der zu berücksichtigenden Pegel.

Für die extremwertstatistische Auswertung (Abschnitt 2) wurden 113 Basispegel mit einer Reihenlänge von mindestens 26 Jahren ausgewählt. Sie bilden auch die Grundlage für die Untersuchungen in den Abschnitten 3 und 4. Zur Erweiterung der Datenbasis in Abschnitt 4 wurden zusätzlich 66 Pegel mit einer Reihenlänge von 10 bis 25 Jahren berücksichtigt. Somit wurden letztlich insgesamt 179 Pegel für die Regionalisierung verwendet.

2. Extremwertstatistische Auswertung

Zur Anwendung kam die saisonale Hochwasserstatistik gemäß DWA-Merkblatt 552 (DWA, 2010). Als regional gültige Verteilungsfunktion wurde die Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) gewählt. Die Parameter dieser Verteilungsfunktion wurden nach der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momentenmethode mit Hilfe der Software HQ-EX 3.0 (WASY, 2005) geschätzt. Für jeden der 113 Basispegel erfolgte die Parameterschätzung sowohl auf Grundlage der Jahres-HQ-Reihen als auch auf Grundlage der saisonalen HQ-Reihen für das Sommer- und Winterhalbjahr. Für Pegel mit historischen Hochwassern wurde die damit verbundene Zusatzinformation bei der extremwertstatistischen Auswertung der Reihen entsprechend berücksichtigt.

Nach der extremwertstatistischen Auswertung der saisonalen HQ-Reihen für das Sommer- und Winterhalbjahr kann die auf das Gesamtjahr bezogene Unterschreitungswahrscheinlichkeit P_U eines bestimmten Hochwasserabflusses HQ gemäß DWA (2010) mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$P_U(\text{Jahr}) = P_U(\text{Winter}) * P_U(\text{Sommer}) \qquad (1)$$

Die mit Hilfe von Gleichung (1) berechneten Wertepaare (HQ, P_U) werden im Folgenden als zusammengesetzte Verteilung (Winter - Sommer) bezeichnet. Leider fehlt für die zusammengesetzte Verteilung eine geschlossene mathematische Beschreibung, die es erlaubt, für eine vorgegebene Unterschreitungswahrscheinlichkeit den Hochwasserabfluss auf direktem Weg zu berechnen. Mit Gleichung (1) ist das nur iterativ möglich.

Praktisch wurde dieses Problem gelöst, indem die zusammengesetzte Verteilung durch eine Allgemeine Extremwertverteilung approximiert wurde. Dies geschah über eine Optimierung der drei Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung, bei der die Summe der gewichteten quadratischen Abweichung zwischen der zusammengesetzten Verteilung und der approximierten Allgemeinen Extremwertverteilung minimiert wurde. Als Gewicht wurde der Hochwasserabfluss HQ verwendet. Damit wurde eine bessere Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung im Extrapolationsbereich ($T \geq 100$ a) erzielt als bei einer Minimierung der Summe der einfachen quadratischen Abweichung. Abbildung 1 veranschaulicht die Vorgehensweise und das Ergebnis der Optimierung beispielhaft für den Pegel Golzern 1/Mulde.

Nach Approximation der Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung (Winter - Sommer) wurden für alle Basispegel neben den lokalen Parametern der saisonalen AEV auch die Quantile HQ_T für T = 2 bis 500 a ermittelt.

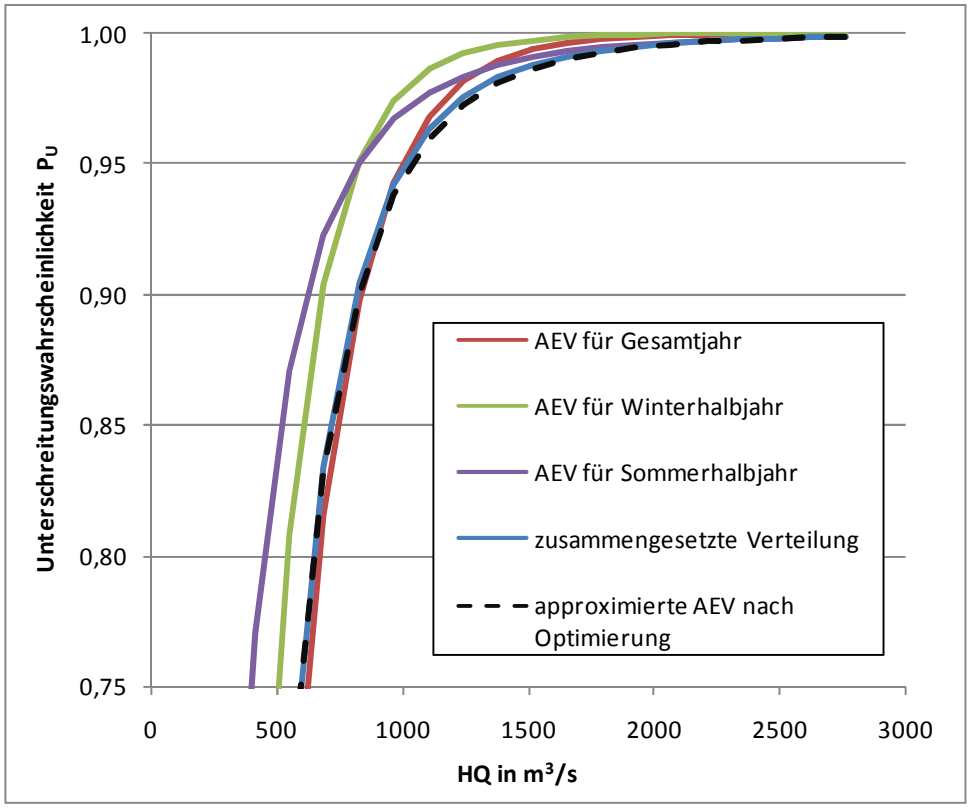


Abb. 1: Approximation einer Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung am Beispiel des Pegels Golzern 1/Mulde

3. Bildung von Regionen

Als Grundlage für das Index-Flood-Verfahren (HOSKING & WALLIS 1997) war die Bestimmung hochwasserhomogener Regionen erforderlich. Hierzu wurden die beiden Klassifikationsverfahren Clusteranalyse und Regressionsbaum angewendet und ihre Ergebnisse miteinander verglichen. Beide Verfahren basieren auf der Annahme, dass ähnliche Gebietseigenschaften ähnliche Hochwasserprozesse bewirken, unterscheiden sich aber in Hinblick auf die Gruppenbildung.

Bei der Clusteranalyse erfolgt die Gruppenbildung aufgrund der Ähnlichkeit von Einzugsgebietskenngrößen, wobei Auswahl und Gewichtung der Kenngrößen eine zentrale Rolle spielen. Für die Clusteranalyse wurde die Partitionierungsmethode PAM (partitioning around metoids) verwendet (KAUFMANN & ROUSEEUW 1990), die eine eindeutige Zuordnung der Einzugsgebiete in ähnliche Gruppen (Cluster) ermöglicht. Die Anzahl der Cluster ist vorzugeben, die Clusterzentren werden durch den Algorithmus optimal bestimmt. Als Ähnlichkeitsmaß wurde aufgrund der Resultate einer vorgeschalteten Sensitivitätsanalyse die Euklidische Distanz verwendet, da diese die besten Resultate erzielte.

Der Regressionsbaum ist ein hierarchisches Klassifikationsverfahren, mit dem eine simultane Gruppierung aufgrund von Gebiets- und Abflusskenngrößen möglich ist. Dieses Verfahren wurde bereits erfolgreich zur Klassifikation von Niedrigwasserkenngrößen angewendet (LAAHA & BLÖSCHL 2006). Die Auswahl der hydrologisch relevanten Gebietskenngrößen erfolgt aufgrund des schrittweisen Modellansatzes automatisch durch das Verfahren. Da die Homogenität der höheren Momente der regionalen Verteilungsfunktion eine Grundannahme

des Index-Flood-Verfahrens darstellt, wurde als Zielvariable für den Regressionsbaum eine gewichtete Linearkombination der höheren Momente der Form

$$z_1 = 3L_{cv} + 2L_{skew} + 1L_{kur} \quad (2)$$

verwendet, wobei L_{cv} den Variationskoeffizienten, L_{skew} den Schiefekoeffizienten und L_{kur} die Kurtosis der lokalen Extremwertverteilung auf Basis der L-Momente (HOSKING & WALLIS 1997) bezeichnen.
Die Ergebnisse der Klassifikationsverfahren wurden zunächst mittels der Teststatistiken nach HOSKING & WALLIS (1997) hinsichtlich ihrer Eignung für das Index-Flood-Verfahren bewertet. Anschließend wurden die Ergebnisse in Karten der naturräumlichen Gliederung Sachsens gegenübergestellt und gemeinsam mit dem Auftraggeber beurteilt. Im Ergebnis dieser Diskussion wurde ein Regressionsbaum mit drei Knoten favorisiert, mit dem eine plausible Gliederung Sachsens in Regionen mit unterschiedlichem Hochwasserverhalten erzielt wird. Da dieser Regressionsbaum ausschließlich die nutzbare Feldkapazität als Gebietskenngröße berücksichtigt, wurde noch untersucht, ob durch die Kombination der nutzbaren Feldkapazität mit weiteren Gebietskenngrößen, insbesondere mit dem mittleren Niederschlag, eine Verbesserung der Teststatistiken erreicht werden kann, was allerdings nicht der Fall war.
Die endgültige Abgrenzung von vier räumlich zusammenhängenden Regionen erfolgte nach Zusammenschau der Ergebnisse der verschiedenen Klassifikationsverfahren auf der Grundlage des Regressionsbaums mit drei Knoten und unter besonderer Berücksichtigung von Morphologie und Einzugsgebietsgrenzen (Abbildung 2). Dadurch wird Sachsen primär in eine Festgesteinsregion im Süden mit geringer nutzbarer Feldkapazität und hoher Geländehöhe (i. d. R. > 400 m HN) und eine Übergangs- und Lockergesteinsregion im Norden mit mittlerer bis hoher nutzbarer Feldkapazität und geringer Geländehöhe unterteilt. Innerhalb der letztgenannten Zone existieren zwei Teilregionen mit deutlich abweichendem Hochwasserverhalten infolge einer besonderen naturräumlichen Ausstattung bzw. einer auffälligen Häufung lokaler Starkniederschläge.

4. Anwendung von Index-Flood-Verfahren und Top-Kriging

Zur Übertragung von Hochwasserkenngrößen von Pegelgebieten auf unbeobachtete Gebiete wurden mit dem erweiterten Index-Flood-Verfahren auf Basis von L-Momenten (HOSKING & WALLIS 1997) und Top-Kriging (SKØIEN et al. 2006) zwei grundsätzlich unterschiedliche Regionalisierungsverfahren angewendet. Das Index-Flood-Verfahren beruht auf der Annahme, dass innerhalb einer homogenen Region die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven aller Gebiete einer regionalen Verteilung folgen und sich nur durch einen Normierungsparameter (Index Flood) unterscheiden. Top-Kriging ist eine Erweiterung des bekannten geostatistischen Kriging-Verfahrens, berücksichtigt aber zusätzlich die Topologie (Unter-/Oberlieger-Relationen) und die Gebietsgröße bei der Schätzung von Abflusskenngrößen für unbeobachtete Gebiete.
Die Anwendung der beiden Basisverfahren erfolgte separat und in Kombination untereinander sowie mit einer Georegression in insgesamt sechs verschiedenen Varianten. Zur Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Varianten wurde ein Jack-Knife-Vergleich für die durch

Pegel beobachteten Einzugsgebiete durchgeführt. Im Ergebnis des Jack-Knife-Vergleichs wird folgende Verfahrenskombination als Vorzugslösung für die Anwendung in Sachsen empfohlen:

a) Georegression zwischen MHQ (Index Flood) und Einzugsgebietsgrößen
b) Regionale Analyse und Ausgleich der Residuen der Georegression mit Top-Kriging
c) Bestimmung der höheren Momente (Varianz und Schiefe) der regionalen Verteilungsfunktion mit dem Index-Flood-Verfahren

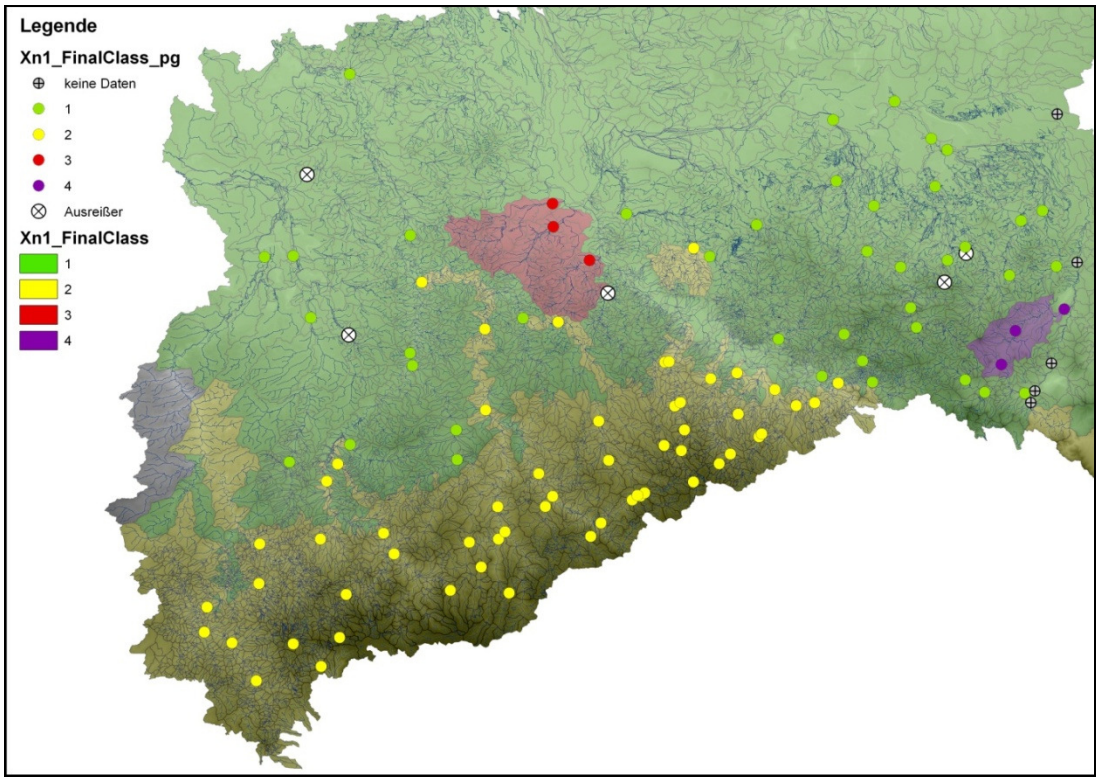


Abb. 2: Hochwasserregionen in Sachsen als Basis für das Index-Flood-Verfahren

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des Jack-Knife-Vergleichs. Darin dargestellt sind insgesamt sechs Diagramme für sechs verschiedene Fehlermaße, die in den Diagrammen jeweils gegen das Wiederkehrintervall T aufgetragen wurden. Die Ergebnisse der einzelnen Verfahrensvarianten sind umso besser, je größer das Bestimmtheitsmaß R^2 ist, je kleiner die Fehlergrößen rmse, nsdve und sdvne sind und je näher die Fehlergrößen nme und mne an der Nulllinie liegen. In Abbildung 3 wird deutlich, dass die oben beschriebene Verfahrenskombination aus Georegression, Top-Kriging und Index-Flood-Verfahren (in der Legende als Georegression + Index Flood bezeichnet) gegenüber den anderen 5 Varianten im Vorteil ist.
Inhalt von Abbildung 4 ist eine Karte der mit dem Vorzugsverfahren regionalisierten Abflussspende des 100-jährlichen Hochwassers.

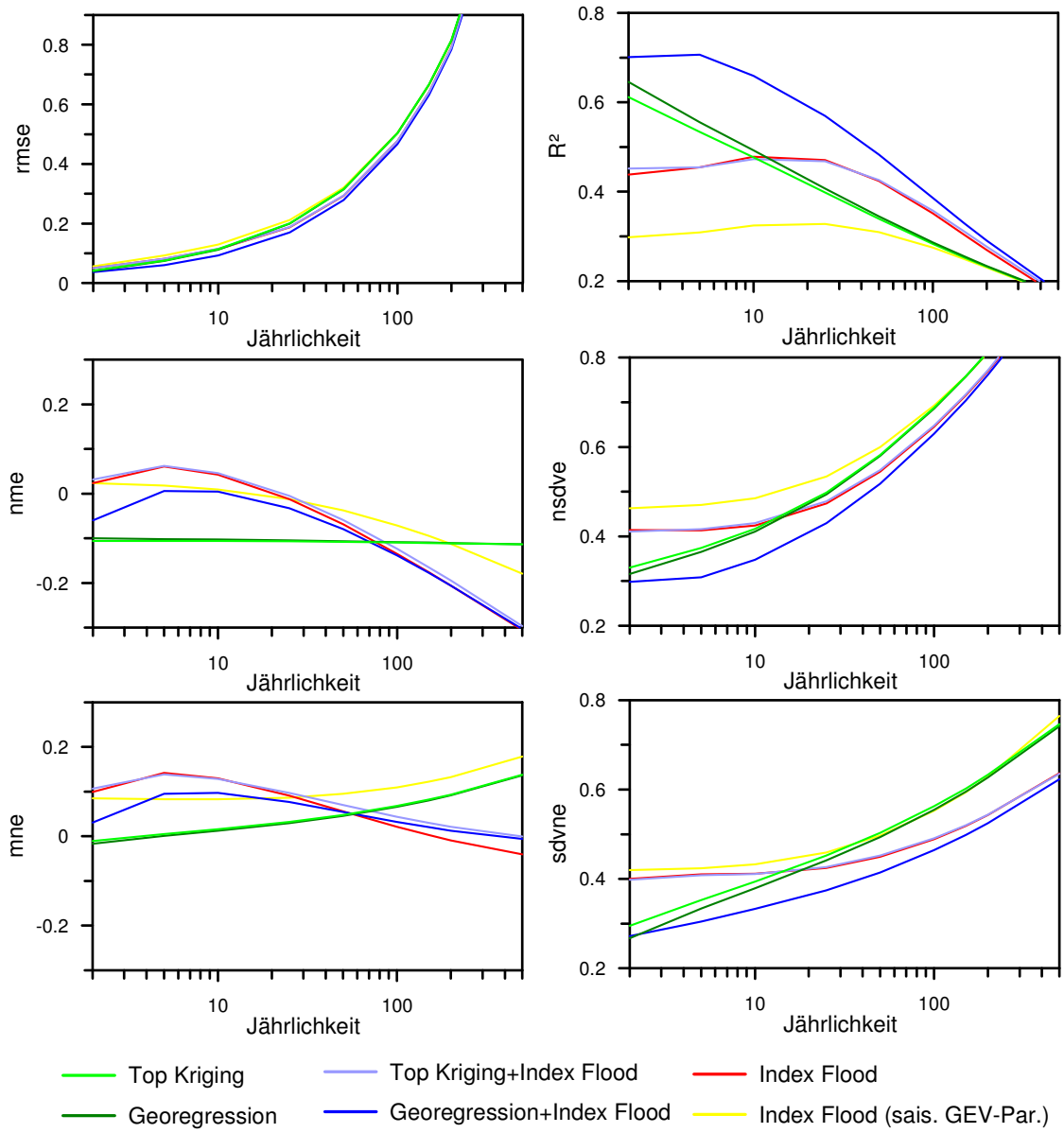


Abb. 3: Jack-Knife-Vergleich von regionalisierten und lokal geschätzten Hochwasserspenden an den Basispegeln der Regionalisierung

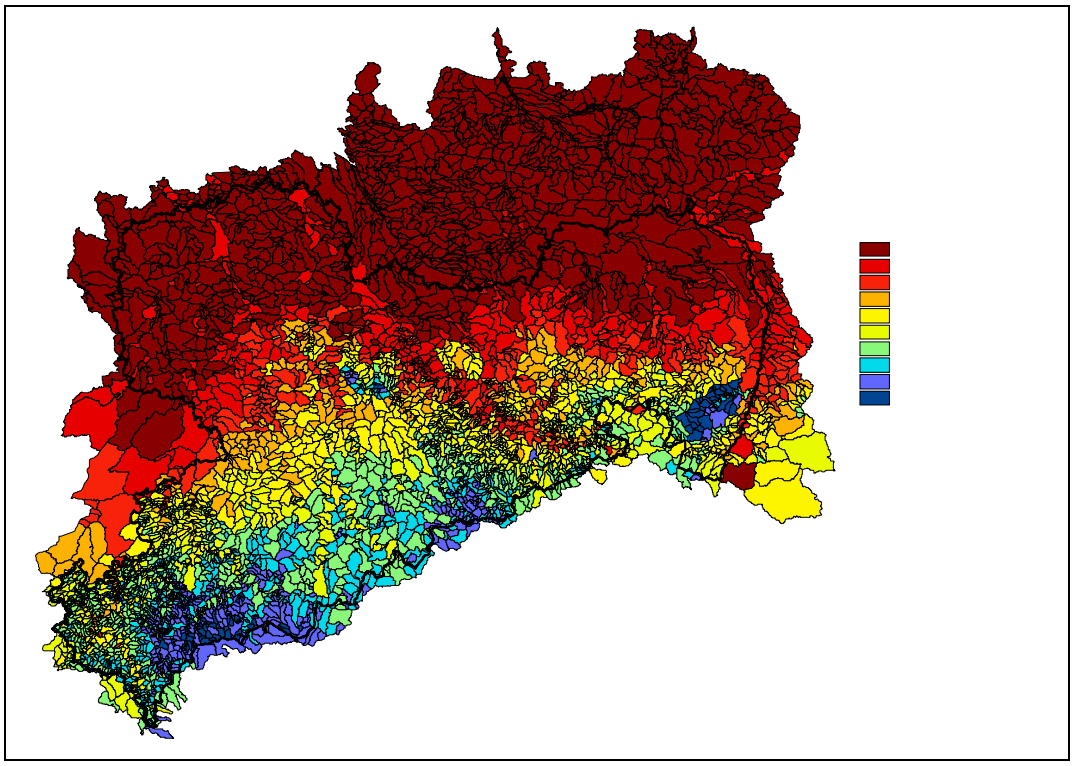


Abb 4: Mit dem Vorzugsverfahren regionalisierte Abflussspende Hq_{100} in $m^3/(s*km^2)$

Literatur

DWA (2010): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. - Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Entwurf, August 2010.

HOSKING, J. R. M. & J. R. WALLIS (1997): Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. - Cambridge University Press, Cambridge.

KAUFMAN, L. & P. J. ROUSSEEUW (1990): Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis. - Wiley, New York.

LAAHA, G. & G. BLÖSCHL (2006): A comparison of low flow regionalization methods - catchment grouping. - Journal of Hydrology, 323, S. 193-214.

SKØIEN, J. et al. (2006): Top-Kriging - geostatistics on stream networks. - Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 10, S. 277-287.

WASY (2005): HQ-EX 3.0 - Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. - Benutzerhandbuch, WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH.

Ein Ereigniskatalog als Teil eines on-line Hochwasserwarnsystems

Ulrike Drabek, Thomas Nester

Zusammenfassung

In Österreich gibt es trotz seiner geringen Größe mehrere unterschiedliche operationelle Durchflussvorhersagesysteme, wobei bei deren Erstellung nicht auf eine einheitliche, flächendeckende Modellierung geachtet wurde. Daneben gibt es Anwender, die aufgrund ihrer besonderen Anforderungen an die Warnung mit bestehenden Modellen nicht ihr Auslangen finden, sondern z.B. speziell Warnungen für gefährdete Stellen benötigen, aber dennoch kein eigenes, operationelles Durchflussvorhersagesystem betreiben wollen. Ein Beispiel dafür sind die ÖBB, die im Zuge des Projektes BESIHO (NESTER et al. 2008) ein Warnsystem entwickelt haben, das operationelle Vorhersagen an Flüssen (sofern vorhanden) mit einem off-line zu bedienenden, neuen Ereigniskatalog verknüpft, um für definierte, speziell gefährdete Stellen entlang von Bahnstrecken neben Flüssen rechtzeitig Hochwasserwarnungen zu erhalten. Der Ereigniskatalog ist eine Sammlung einzelner Diagramme, die Zusammenhänge zwischen Hochwasserparametern beobachteter Hochwässer je nach Wetterlage in einer Form darstellen, die unter Verwendung aktueller Beobachtungen von Durchfluss und Niederschlag zur Abschätzung der Größe, der Dauer und des Gradienten des Anstiegs einer aktuellen Hochwasserwelle herangezogen werden können. Es werden die Herleitung und die Anwendung dieses Kataloges, bestehend aus Abbildungen und Tabellen, vorgestellt.

1. Das Untersuchungsgebiet

Die Salzach hat von ihrem Ursprung bis zum Kraftwerk Wallnerau ein Einzugsgebiet von 2188,3 km². Entlang des Flusses gibt es zwei fernübertragene Durchflussmessstellen: Mittersill (HZB.Nr. 203075, 582,6 km², 782 m.ü.A.) und Bruck an der Salzach (HZB.Nr. 203125, 1168,7 km², 746 m.ü.A.). Hauptzubringer ist die Fuscher Ache mit dem Pegel Bruck an der Fuscher Ache (HZB.Nr. 203141, 161 km², 758 m.ü.A.) (siehe Abbildung 1).

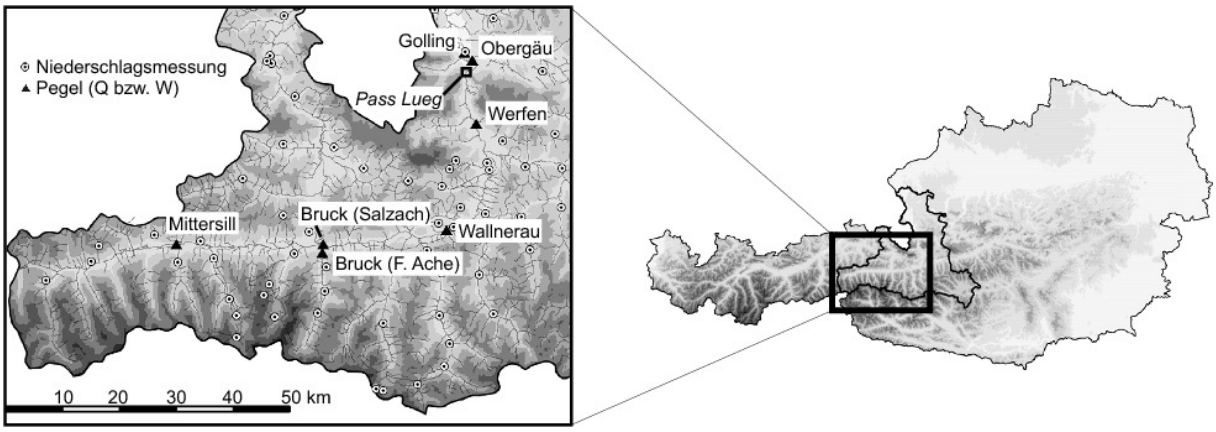


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet obere Salzach mit den Pegeln Mittersill, Bruck (Salzach) und Bruck (Fuscher Ache).

Die Höhenerstreckung des Einzugsgebietes reicht von 600 m.ü.A. bis auf 3666 m.ü.A. (Großvenediger). Der Süden des Einzugsgebietes im Bereich des Alpenhauptkammes ist vergletschert. Das hydrologische Regime ist gekennzeichnet durch hohe Abflüsse im Frühjahr und im Sommer und niedrige Abflüsse im Winter. Während der kalten Jahreszeit sind die Pegel stark durch den Kraftwerkseinsatz an den Speicherkraftwerken im hochalpinen Bereich beeinflusst. Im Sommer ist die Schnee- und Gletscherschmelze an den Ganglinien deutlich zu erkennen. Der mittlere jährliche Niederschlag im Gebiet liegt zwischen 1000 mm und 1600 mm.

2. Datenbasis

Für die Herleitung des Kataloges standen Durchflussdaten in stündlicher Auflösung für die Jahre 1996-2005 zur Verfügung. In diesem Zeitraum wurden 119 Ereignisse für den Pegel Mittersill, 85 Ereignisse für den Pegel Bruck a.d. Salzach und 99 Ereignisse für den Pegel Bruck a.d. Fuscher Ache identifiziert. Entlang der Strecke gibt es noch einige kleinere Zubringer mit Durchflussmessungen, deren Einfluss auf den Durchfluss der Salzach ist jedoch prozentuell gesehen so gering, dass sie für die Katalogerstellung vernachlässigt wurden. Innerhalb des Zeitraumes gibt es kaum Datenlücken. Für denselben Zeitraum standen auch Niederschlagsdaten in stündlicher Auflösung zur Verfügung. Mithilfe der „inverse distance method“ wurden vom Projektpartner Meteomedia (jetzt UBIMET) Gebietsniederschläge (für das ganze Bundesland Salzburg Daten von 26 Datensammlern (kontinuierlich), 50 Ombrometern und 5 Totalisatoren) ermittelt. Nur ein kleiner Teil dieser Niederschlagsmessstationen liegt allerdings im Gebiet bis Bruck/Salzach (siehe dazu auch Abbildung 1).

Tab. 1: Zugehörigkeit der Ereignisse zu Großwetterlagen

Abk.	Wetterlage	Mittersill	Bruck/F	Bruck/S
H	Hoch über West- und Mitteleuropa	3	3	3
h	Zwischenhoch	2	1	2
Hz	Zonale Hochdruckbrücke	0	0	0
HF	Hoch mit Kern über Fennoskandien	0	0	0
HE	Hoch mit Kern über Osteuropa	0	0	0
N	Nordlage	0	0	0
NW	Nordwestlage	5	3	3
W	Westlage	14	10	11
SW	Südwestlage	6	8	2
S	Südlage	4	4	2
G	Gradientschwache Lage	5	6	1
TS	Tief südlich der Alpen	2	1	1
Tw	Tief über dem westlichen Mittelmeer	1	2	0
TS	Tief im Südwesten Europas	0	0	1
TB	Tief bei den Britischen Inseln	0	0	1
TR	Meridionale Tiefdruckrinne	10	5	9
Tk	Kontinentales Tief	26	22	24
Vb	Tief auf der Zugstraße Adria – Polen	0	0	0

Zusätzlich zu den hydrologischen Daten standen Informationen der Wetterlagenklassifikation auf täglicher Basis nach Lauscher (LAUSCHER, 1972) für die Jahre 1999-2005 zur Verfügung, wobei die Zuteilung der Ereignisse zu den einzelnen Klassen in Tabelle 1 dargestellt ist. Die Definition der zugehörigen Wetterlage erfolgte zu Beginn des Ereignisses. Die weitaus größte Anzahl der Hochwasserereignisse an der oberen Salzach finden während der Wetterlagen Tk, W und TR statt. Es sind das die Wetterlagen, bei denen die Alpen eine Barriere für anströmende Luftmassen darstellen und so oft Stauniederschläge hervorrufen.

3. Methodik

3.1 Ermittlung der Hochwasserparameter

Folgende Parameter beschreiben die Hochwasserereignisse selbst oder auch Randbedingungen, von denen erwartet wurde, dass sich Zusammenhänge ergeben, die für die Hochwasserwarnung eingesetzt werden können. Allgemein kann ausgesagt werden, dass im Vorfeld der Untersuchungen nicht vorhergesagt werden kann, welche der die Hochwasserereignisse beschreibenden Parameter in Folge deutliche Zusammenhänge zeigen und für den Katalog verwendet werden können, da sich je nach Gebietscharakteristik andere Relationen als dominant herausstellen werden. Ein Merkmal des Ereigniskataloges ist es nämlich, dass Gebietscharakteristika bzw. hydrologische Merkmale in den Diagrammen direkten Niederschlag finden.

Ermittelte Parameter:

- Der Monat, in dem das Ereignis stattfindet („Saisonalität“).
- Die Zeitpunkte von Beginn des Anstiegs der Hochwasserwelle t_0 und Scheitel der Welle bzw. Ende des steilen Anstiegs (ohne eindeutigem Scheitel bei Ausuferung) t_P. Diese Werte sind nötig, um in Folge die nächsten Parameter abzuleiten:
- Dauer ($\Delta t = t_P - t_0$) und Gradient ($m^3/s \cdot h$) des Wellenanstiegs. Diese beiden Parameter sind für die Hochwasserwarnung sehr wichtig, da sie den Zeitraum beschreiben, in dem kurzfristige Schutzmaßnahmen getroffen werden können.
- Q_{min}, Q_{max}, ΔQ. Diese Parameter beschreiben die Dynamik von Hochwasserwellen und sind daher für die Hochwasserwarnung von Bedeutung.
- Mittlerer Basisabfluss Q_B über 7 Stunden vor dem Zeitpunkt t_0.
- Vorregenindex (Antecedent Precipitation Index) API_i für die Zeitschritte i = 1, 3, 5, 10 und 30 Tage. Ähnlich wie der Basisabfluss beschreibt der API_i die Vorbefeuchtung des Gebietes.
- Niederschlagssumme von t_0 bis t_P (mm). Der Niederschlag während des Anstiegs der Hochwasserwelle ergänzt den entsprechenden API_i (zumeist i =1) zum Ereignisniederschlag.
- Schnee im Einzugsgebiet als binärer Wert (0 oder 1).
- Meteorologische Bedingungen anhand der in Kapitel 2 genannten Großwetterlagenklassifizierung.
- Bodenfeuchte zum Zeitpunkt t_0, der aktuelle Wert des Zustandsparameters eines parallel gerechneten, aber nicht online zur Verfügung stehenden HBV-Modells.

3.2 Auswahl der für die Hochwasserwarnung relevanten Parameter

Sämtliche Parameter wurden nach für die Hochwasserwarnung verwertbaren Zusammenhängen untersucht. Verwertbar im Sinne der Arbeit sind Zusammenhänge dann, wenn sie einerseits eindeutige Trends aufweisen und andererseits aufgrund vorliegender Echtzeitdaten zu erwartende Hochwasserparameter aus dem Ereigniskatalog abgelesen werden können. Die am leichtesten abrufbaren Echtzeitdaten sind öffentlich publizierte Durchflüsse und Niederschläge an fernübertragenen Messstellen, sowie die Temperatur.

Generell kann ausgesagt werden, dass die für die Hochwasserwarnung anwendbaren Beziehungen für jedes Gebiet einzeln hergeleitet werden müssen. Es ist nicht erwiesen, dass die hier verworfenen Zusammenhänge (z.B. Schnee im Einzugsgebiet oder Bodenfeuchte aus einem Wasserhaushaltsmodell) in anderen Gebieten auch keine Aussagen liefern, im Gegenzug kann es sein, dass hier aussagekräftige Relationen in anderen Gebieten keine Gültigkeit haben.

Die für den Ereigniskatalog ausgewählten Beziehungen sind:

- API_1 – Gradient. Der Zusammenhang zwischen dem API_1 und dem Gradienten des steilen Anstiegs kann für die Hochwasserwarnung bereits verwendet werden, bevor der Anstieg selbst begonnen hat. Der gefallene Regen der letzten 24 Stunden wird beobachtet, aus der Grafik kann ein statistisch zu erwartender Gradient abgeschätzt werden, der für die folgenden Relationen benötigt wird.
- Gradient – Durchfluss (Q_{max}, ΔQ). Diese Relation lässt sich in der Hochwasserwarnung insofern einsetzen, als (a) bei bereits beobachtetem Anstiegsbeginn aufgrund des Gradienten beurteilt werden kann, wie groß der Scheitel bzw. wie groß die Durchflussdifferenz vom Basisdurchfluss aus gesehen statistisch werden kann. Sofern (b) noch kein Anstieg beobachtet wurde, kann mithilfe der zuvor angewendeten Relation API_1 – Gradient und dem daraus abgeschätzten Gradienten auf die Durchflussparameter geschlossen werden.
- Dauer – Gradient. Der Gradient ($m^3/s \cdot h$) des steilen Hochwasseranstiegs ist ein Parameter, der für die Hochwasserwarnung von großer Bedeutung ist. Von ihm hängt ab, wie schnell Maßnahmen zum Schutz von Einrichtungen getroffen werden müssen, um vor Erreichen eines gewissen Wasserspiegels geschützt zu sein. Mithilfe der Relation von Dauer und Gradient lässt sich die statistisch zu erwartende Dauer eines Ereignisses ablesen, wenn (a) bereits ein Gradient des Anstiegs einer Hochwasserwelle beobachtet wird bzw. wenn (b) der Gradient aufgrund des API_1 abgeschätzt wurde.

4. Ergebnisse

Die Grafiken können aus Platzgründen nicht in vollem Umfang in dieser Publikation dargestellt werden. Sie sind vollständig in DRABEK (2010) zu finden. Beispielhaft werden daher Zusammenhänge und auch die Anwendung für den Pegel Mittersill dargestellt. In Abbildung 3a – 3c sind drei der zuvor genannten Beziehungen, nach Wetterlagen aufgeteilt, dargestellt. Dazu einige Erläuterungen: Die Abhängigkeit der jeweiligen Zusammenhänge von der Wetterlage ist deutlich zu erkennen: In Abbildung 3a ist abzulesen, dass der Gradient unter Hochdruckwetter bei selber Vorbefeuchtung wesentlich steiler ausfällt als unter den anderen Wetterlagen. Es handelt sich bei Hochdruckwetter erfahrungsgemäß vorwiegend um konvek-

tive Ereignisse, die sich durch hohe Niederschlagsintensitäten und dementsprechend schnell auftretende Hochwässer auszeichnen. Aus Abbildung 3b ist z.B. abzulesen, dass die höchsten Scheitelwerte unter der Wetterklasse Tk zu finden und dass unter NW-Wetterlage kaum hohe Abflussspitzen zu erwarten sind. Die konvektiven Ereignisse unter Hochdrucklage wiederum weisen zwar hohe Gradienten, aber nicht besonders hohe Scheitelwerte auf. Abbildung 3c zeigt, dass unter W-Wetterlage ähnlich schnelle und steile Hochwässer zu erwarten sind wie unter TR-Wetterlage, dass aber NW-Wetter diesbezüglich ruhiger verläuft. In allen drei Abbildungen 3a-3c ist zu sehen, dass Ereignisse unter der Wetterlage NW keine ausgeprägten Maxima liefern, die Gefahr eines großen Hochwassers daher aus statistischer Sicht gering ist. In dieselbe Kategorie fallen auch die Hochwässer der S, SW und G Wetterlage.

4.1 Anwendung des Ereigniskatalogs

In Abbildung 4 wird anhand eines Validierungsereignisses gezeigt, wie der Ereigniskatalog angewendet wird. Im unteren Teil der Abbildung ist die Ganglinie des Hochwasserereignisses vom Juli 2009 am Pegel Mittersill dargestellt. Zeitpunkt der Anwendung des Kataloges ist der 18.07.2009 um 04:30 (t_1), mit einem dicken schwarzen Strich dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt konnte bereits aus den letzten Stunden ein Gradient des Anstieges ermittelt werden, er beträgt 19,5 $m^3/s \cdot h$. Mit diesem Gradienten kann aus der Beziehung Gradient – Q_{max} für die vorherrschende Wetterlage TR (obere Zeile, linkes Diagramm) ein Bereich des zu erwartenden Scheiteldurchflusses abgelesen werden. Analog können der zu erwartende Durchflussanstieg als Differenz ΔQ und eine zu erwartende Dauer Δt ermittelt werden (obere Zeile, mittleres und rechtes Diagramm). Trägt man alle drei erwarteten Werte bzw. die die Unsicherheit in den Daten darstellenden Bereiche in die Ganglinie (unterer Teil der Abbildung 4) ein, erhält man eine zeitliche und quantitative Einschätzung des Hochwasserscheitels. Er wird zeitlich gut abgeschätzt, der maximale Durchfluss um -23% (aufgrund Gradient-Q_{max}) bzw. -8% (aufgrund Gradient-ΔQ) unterschätzt. Damit liegt die Einschätzung für dieses Hochwasser im selben Genauigkeitsbereich wie Ergebnisse aus operationellen Vorhersagemodellen. Man muss allerdings bedenken, dass die Datenbasis durch die Aufteilung aller Ereignisse nach Wetterlagen für die Einschätzung nur mehr aus relativ wenigen Einzelwerten besteht, es ist in diesem Gebiet daher immer mit einer Unsicherheit der Abschätzung zu rechnen.

Trägt man die tatsächlichen Parameter des Hochwassers nach dessen Ablauf in den Ereigniskatalog ein (graue Punkte in den drei Diagrammen der oberen Zeile), sieht man, in wie weit es dem statistischen Ablauf entsprochen hat. Das aktuelle Ereignis kommt in allen drei Relationen am jeweils oberen Rand zu liegen, nachdem es einen sehr steilen Anstieg mit einem hohen Scheitelwert aufzuweisen hat, liegt aber generell im Trend. Durch das Hinzufügen des neuen Ereignisses wird der Katalog vergrößert und seine Aussagekraft steigt.

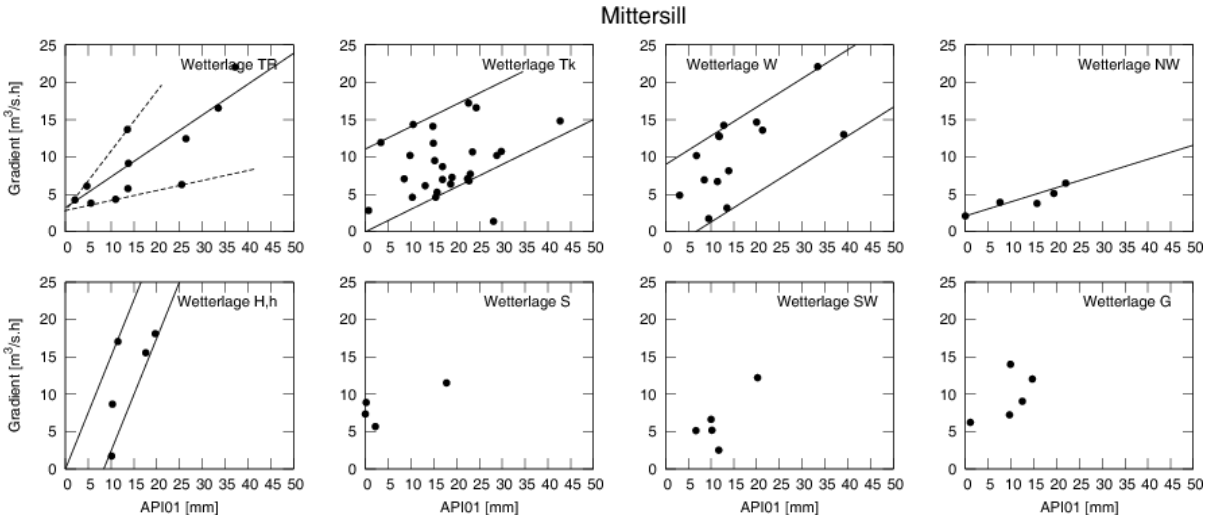


Abb. 3a: Zusammenhang zwischen API_1 und Gradient für einzelne Wetterlagen

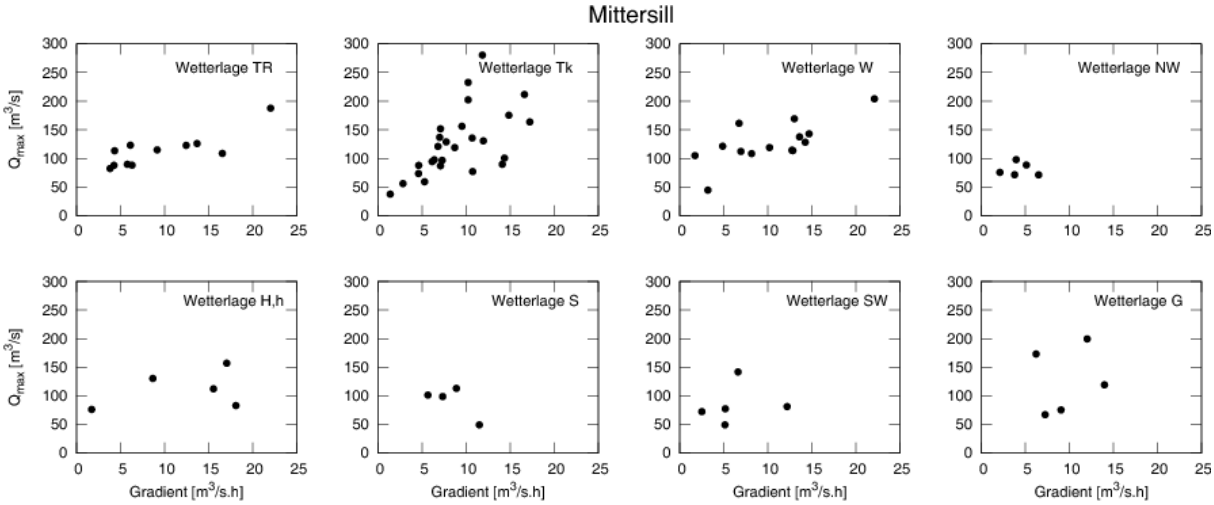


Abb. 3b: Zusammenhang zwischen Gradient und Q_{max} für einzelne Wetterlagen

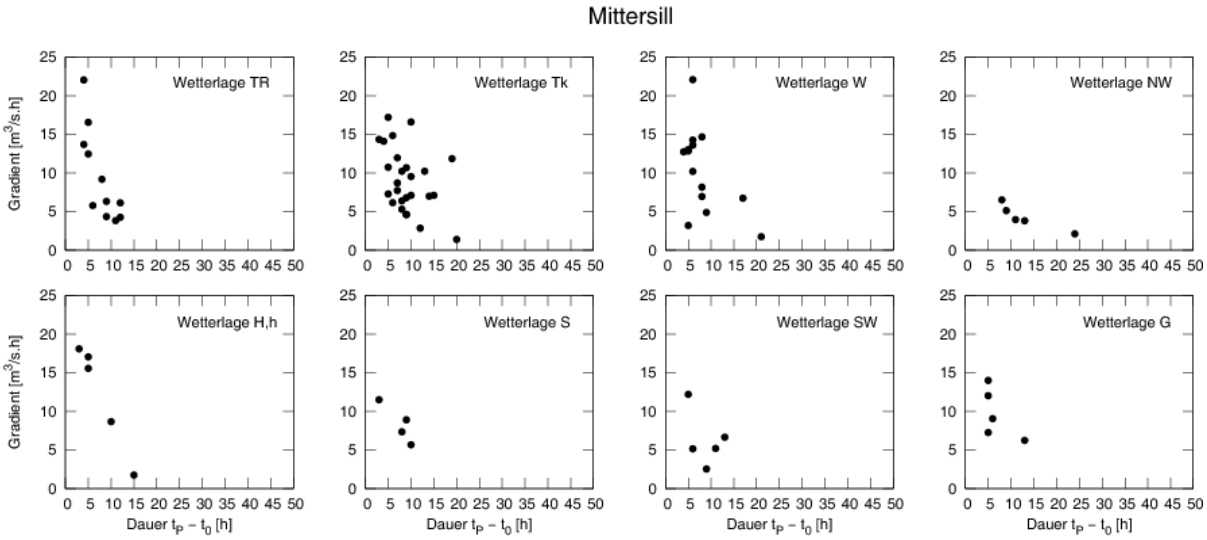


Abb. 3c: Zusammenhang zwischen Dauer und Gradient für einzelne Wetterlagen

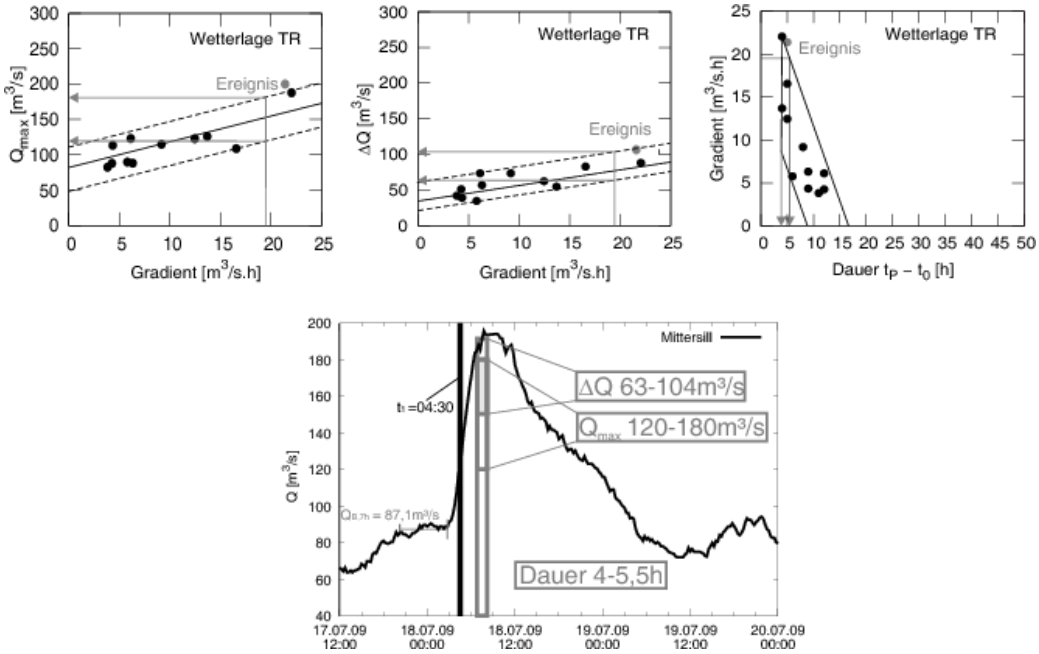


Abb 4: Anwendung des Ereigniskataloges nach Beginn des steilen Anstieges.

5. Schlussfolgerung

Der vorgestellte Ereigniskatalog kann für die Fälle, dass entweder der Wunsch besteht, (a) ein kostengünstiges – da nur bei der Erstellung und nicht im Betrieb mit Kosten verbundenes – und leicht verfügbares Instrument zur Verfügung zu haben oder (b) neben einem operationellen Vorhersagesystem eine einfache Möglichkeit zur Abschätzung von Hochwässern zu besitzen, hilfreiche Informationen liefern. Die Diagramme beschreiben gebietsspezifische Zusammenhänge an Pegeln, die das hydro-/meteorologische Verhalten eines Einzugsgebietes widerspiegeln. Die Datenpunkte umfassen allerdings trotz der Unterteilung in Wetterlagen Hochwasserereignisse mit mehreren unterschiedlichen Entstehungsmechanismen und zeigen daher auch unterschiedliche Gebietsreaktionen. Daher entsteht auch die Streuung in den Diagrammen, derer sich der Anwender bewusst sein muss.

Der Katalog wird mit jedem Ereignis erweitert, dadurch die Datenbasis, auf der er beruht, vergrößert und die Unsicherheit verkleinert. Im Fall der Anwendung in der Hochwasserwarnung ist daher stets im Auge zu behalten, dass ein aktuell auftretendes Ereignis durchaus im Randbereich der bisherigen Beobachtungen, einzuordnen sein kann. Abgelesene Parameter aus dem Ereigniskatalog sind also niemals als genau zu erwartender Wert zu sehen, können aber, wie die Praxis gezeigt hat, sehr gut zur Abschätzung eines aktuellen Hochwasserereignisses herangezogen werden.

Literatur

DRABEK, U., (2010): Anwendungsbezogene Aspekte der operationellen Durchflussvorhersage. Dissertation TU Wien. - Wiener Mitteilungen Nr. 221

LAUSCHER, F., (1972): 25 Jahre mit täglicher Klassifikation der Wetterlage in den Ostalpenländern. - Wetter u. Leben 24

NESTER, T. et al. (2008): A flood warning system for railways. – In: Georisk, H. 2 (2008), Nr. 4; S. 235 - 247

Die Wildbachereignisse des Sommers 2010 in Österreich

Johannes Hübl, Michael Chiari, Christian Scheidl, Thomas Wiesinger

Zusammenfassung

Der Sommer 2010 wurde von zahlreichen Wildbachereignissen geprägt. Von Mai bis Anfang September dokumentierte der forsttechnische Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) 294 Ereignisse der Kategorie „Hochwasser“. Innerhalb dieses Zeitraumes wurden dabei der Prozessart des geschiebeführenden Hochwassers die häufigsten Ereignisse (80%) zugeordnet. Weiters wurden 13% der Ereignisse als Murgänge im eigentlichen Sinne klassifiziert. Nur 7% der Wildbachereignisse konnten als Hochwasser eingestuft werden. Insgesamt wurde ein maßgeblicher Wildholzanteil bei 20% der Ereignisse registriert. Am häufigsten wurde das Bundesland Steiermark von Hochwasserereignissen im Sommer 2010 betroffen, gefolgt von Tirol, Oberösterreich und Vorarlberg. Die meisten Ereignisse wurde im Monat Juli dokumentiert. In diesem Monat wurden insgesamt 200 Ereignisse registriert, wobei auch der größte Anteil an Murgängen (31) auftrat.

1. Einleitung

Im Zuge einer standardisierten Ereignisdokumentation (HÜBL et al. 2002, 2006) wurden von Mai bis Anfang September vom Forsttechnische Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung 294 Ereignisse der Kategorie „Hochwasser“ registriert. Unter dem Begriff „Hochwasser“ werden all jene Ereignisse beschrieben, deren Erscheinungsbild stark durch Wasser geprägt ist, bzw. deren dominant transportiertes Medium Wasser darstellt. Nach ONR 24800 (2009) werden dabei folgende Prozesstypen unterschieden: Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport (Hochwasser mit Geschiebe), murartiger Feststofftransport sowie Murgang im eigentlichen Sinne.

Da die Grenzen zwischen den einzelnen Prozesstypen der Kategorie „Hochwasser“ nicht immer eindeutig feststellbar sind, muss mit verschiedenen Prozesstypen innerhalb des gleichen Einzugsgebietes gerechnet werden. Als Beispiel für die Prozessüberlagerung kann das Einzugsgebiet Schwarzenseebachtal/Kleinsölk (Abbildung 1) angeführt werden. Dort wurden die Prozesse Hochwasser, Geschiebetransport, Murgang und Rutschungen während eines Ereignisses festgestellt.

Zusätzlich kann das Auftreten von Wildholz die Ereignisentwicklung beeinflussen, weshalb es vom Forsttechnischen Dienst bei der Ereignismeldung berücksichtigt wird. Abbildung 2 zeigt die räumliche Verteilung der Prozesstypen für den Berichtsraum des Jahres 2010. Dabei ist der Prozesstyp des geschiebeführenden Hochwassers mit 136 bzw. 80% das am häufigsten dokumentierte Ereignis. Innerhalb des Berichtszeitraumes wurden weiters 13% oder 37 Ereignisse als Murgänge beschrieben. Hochwässer ohne maßgeblichen Feststofftransport hatten einen Anteil von 7%. Insgesamt konnte ein hoher Wildholzanteil bei 20% der Ereignisse registriert werden.

Abb. 1: Überlagerung der Prozesse Hochwasser, Geschiebetransport, Murgang und Rutschung im Schwarzenseebachtal/Kleinsölk (Quelle WLV GBL Ennstal und Salzatal).

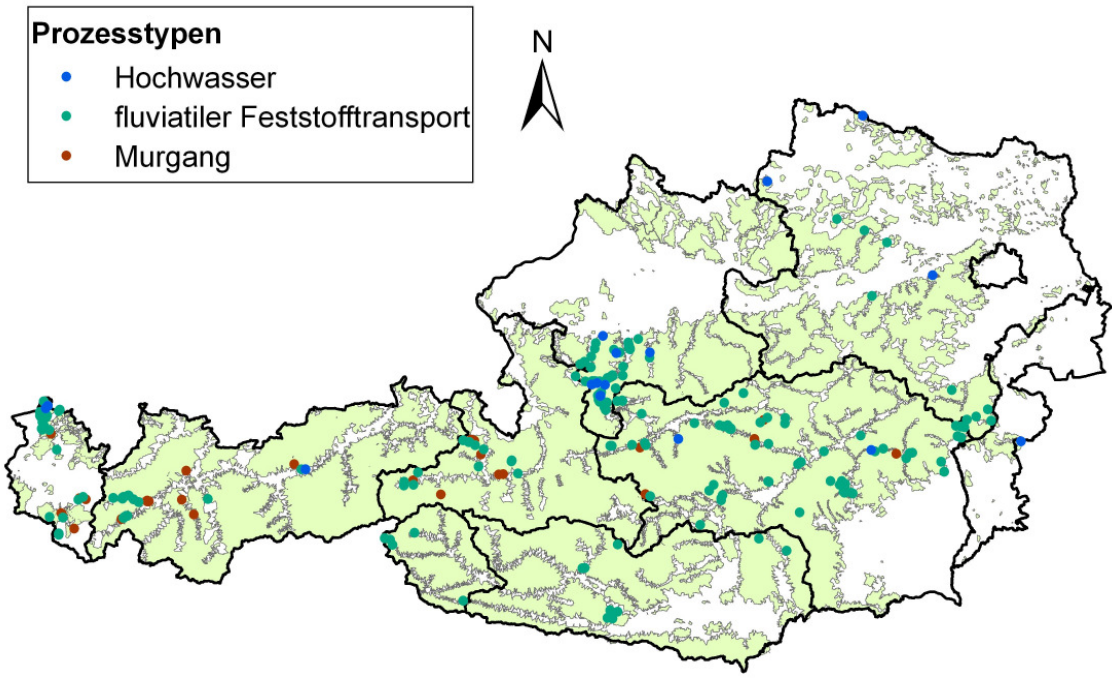


Abb 2: Räumliche Verteilung der Wildbachereignisse 2010 in Österreich.

2. Räumliche und zeitliche Verteilung

Am häufigsten wurde das Bundesland Steiermark von Hochwasserereignissen im Sommer 2010 betroffen. Hier verzeichnete der digitale Wildbachkataster (WLK) des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung insgesamt 84 Ereignisse, wobei die dominanten Prozesstypen als Hochwässer mit Geschiebe und Murgänge im eigentlichen Sinn angegeben wurden. Das Land Steiermark zeigte den höchsten Anteil an Hochwasserereignissen mit Wildholz. In den Bundesländern Oberösterreich und Tirol wurden insgesamt 62 bzw. 55 Ereignisse registriert, wobei der Anteil an Wildholz in Oberösterreich größer war. Das Land Vorarlberg verzeichnete 46 Hochwasserereignisse im Sommer 2010. Bis auf die Bundesländer Niederösterreich (14 Ereignisse), Burgenland (1 Ereignis) und Kärnten (11 Ereignisse) wurden überall Murgänge im eigentlichen Sinne dokumentiert – am häufigsten in Tirol. Im Bundesland Salzburg wurden insgesamt 21 Ereignisse erfasst, ein Drittel davon wurde als Murgang im eigentlichen Sinn angesprochen. Um die verschiedenen Landesflächen zu berücksichtigen wurde die Anzahl der Ereignisse pro Bundesland und 1.000 km² berechnet. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, zeigte das Bundesland Vorarlberg die höchste Dichte an Hochwasserereignissen im Sommer 2010.

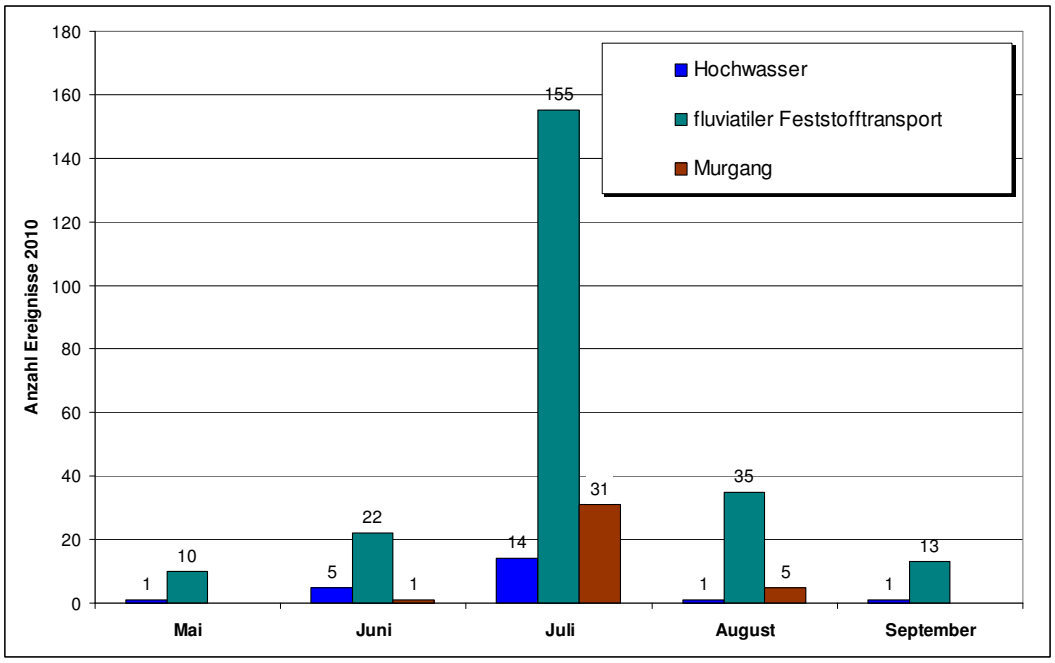


Abb. 3: Monatliche Verteilung registrierter Wildbachereignisse für den Beobachtungszeitraum.

Tab. 1: Anzahl Ereignisse pro 1.000 km² in den Bundesländern, basierend auf den Ereignissen vom Sommer 2010.

	NÖ	B	ST	OÖ	S	K	T	VB
Ereignisse/1.000 km^2	0,5	0,3	5	5	3	3	1	17

Die zeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse 2010 ist in Abbildung 3 dargestellt. Die meisten Prozesse ereigneten sich im Monat Juli. In diesem Monat wurden insgesamt 200 Ereignisse registriert, wobei auch der größte Anteil an Murgängen (31) auftrat.

3. Auslösekriterien

Alle Hochwasser- und Murgangereignisse im Sommer 2010 waren mit intensiven Niederschlagsereignissen verbunden (ZAMG 2010a, b, c, d). Die meteorologischen Ursachen für die am stärksten betroffenen Gebiete sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Viele Ereignisse waren gekoppelt mit heißen Temperaturen, instabiler Schichtung der Atmosphäre, Kaltfronten und Höhentiefs – die zusammen genommen Ursache heftiger Gewitter oder anhaltender Regenfälle waren. Vor den Ereignissen hat es entweder schon geregnet oder es war (extrem) heiß. Typisch ist in allen Fällen, dass neben einem kurzzeitigen intensiven Starkregen, teilweise mit viel Hagel, zusätzlich noch länger andauender Regen registriert wurde – meist für ein bis zwei Tage. Nachfolgend werden die wichtigsten Auslösekriterien aus den Ereignisdokumentationen für alle Ereignisse des Beobachtungszeitraums den Hochwasserprozessen gegenübergestellt.

Tab. 2: Zusammenfassung der Wetterlagen und –erscheinungen unmittelbar vor und während der Hochwasser- und Murgangereignisse in besonders betroffenen Regionen.

Monate	Tage	untersuchtes Gebiet	Wetter kurz vor dem Ereignis	Wetter zum Ereignis
Mai	26.+ 27.	Bucklige Welt	lang anhaltende Niederschläge mit Adria Tief	Gewitter in feucht-labiler Luft; viel Hagel
Juni	17	Bregenzer Wald	Italien Tief mit gewittrigen Niederschlägen	Höhentief nördlich von Österreich, lang anhaltender Niederschlag
Juli	4.+ 5.	Südl. Oberösterreich	heiß, Hochdruckeinfluss	Heftige Gewitter, Starkregen, Hagel
	11.+ 12.	Vorarlberg, Arlberg, Paznauntal	Hochdruck über Österreich, ab 10.7. zunehmend labil	Heftige Gewitter
	16.+ 17.	Niedere Tauern / Kleinsölk	Vereinzelte Gewitter; heiß	Kaltfront zieht durch → heftige Gewitter zwischen Vorarlberg und Niederösterreich

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, wurden die meisten Ereignisse aufgrund von kurzzeitigen Starkregenschauern ausgelöst. Auffallend für den Berichtszeitraum ist das Auftreten von Hagel in Kombination der jeweiligen Auslösekriterien. Die im Berichtszeitraum dokumentierten Niederschlagsereignisse in Kombination mit Hagel sind sowohl für ca. 30% aller Hoch-

wasserereignisse mit Geschiebe als auch für ca. 30% aller Murgänge im eigentlichen Sinne verantwortlich. Für 17 Ereignisse von insgesamt 294 konnte kein Auslösekriterium angegeben werden.

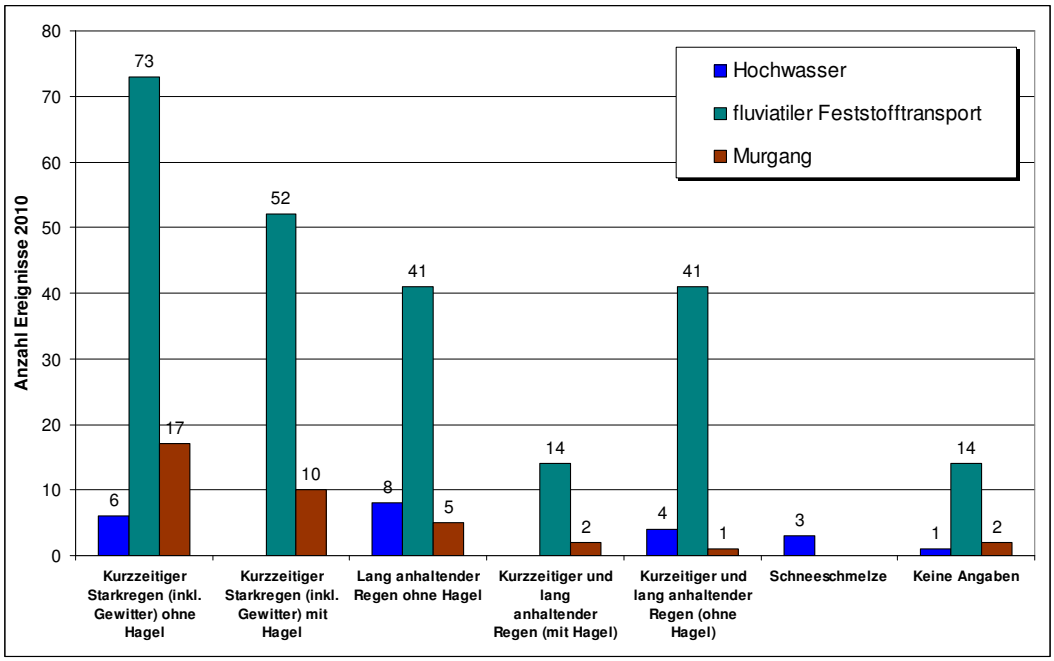


Abb. 4: Registrierte Auslösekriterien der Ereignisse 2010.

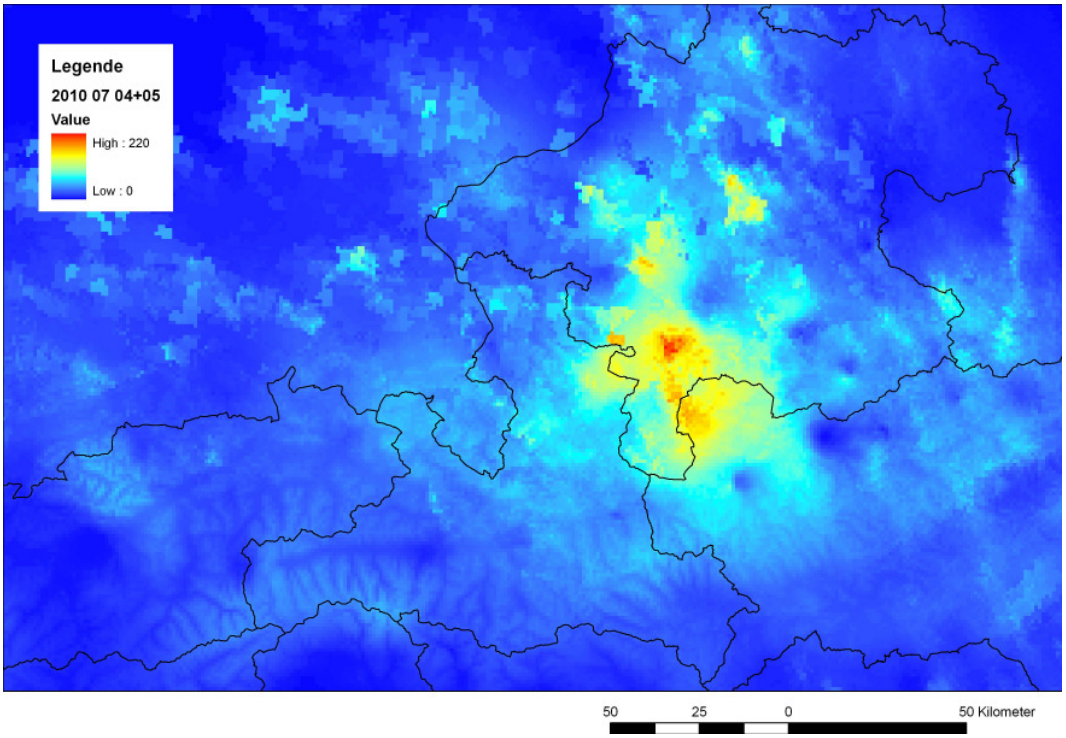


Abb. 5: Niederschlagssumme vom 4. und 5. Juli 2010. (Quelle der INCA Rohdaten: ZAMG).

Die Analyse der Wetterdaten hat gezeigt, dass die Bodenstationen oft nicht repräsentativ für den Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet sind, da sie meist außerhalb der Wildbachein-

zugsgebiete liegen. Daher wurden für weitere Analysen die INCA Rohdaten der ZAMG herangezogen. In Abbildung 5 ist der 2-Tagesniederschlag für den 4. und 5. Juli 2010 dargestellt. Der Schwerpunkt der Starkregen lag im Bereich Salzkammergut zwischen Gmunden und Bad Aussee mit einem Maximum in Ebensee. Die Niederschlagsmenge in Ebensee (private Messung 355 mm in 48 Stunden) ist für denselben Zeitraum in der gezeigten INCA Analyse nicht ersichtlich (Maximalwert 216 mm).

4. Abflussspende nach Prozessarten

Für zahlreiche Einzugsgebiete wurden im Sommer 2010 Querprofile zur Rückrechnung des Spitzenabflusses aufgenommen. Für alle im Berichtszeitraum analysierten Querprofile wurde die spezifische Abflussspende ($m^3s^{-1}km^{-2}$) berechnet und über der Einzugsgebietsfläche aufgetragen. Die Rückrechnung erfolgte für Hochwässer mit Geschiebe nach RICKENMANN (1990) und für Reinwasserabflüsse nach der Stricklerformel. Die Murgang Spitzenabflüsse wurden mittels Kurvenüberhöhung und teilweise mittels Videoanalysen ermittelt.

Für den Vergleich wurden die einzelnen Prozesstypen nach ONR 24800 (2009) farblich zusammengefasst und in Abbildung 6 dargestellt. Die Prozesse Murgang und murartiger Feststofftransport weisen die höchsten spezifischen Abflussspenden auf. In den größeren Einzugsgebieten wurde vorwiegend Hochwasser im eigentlichen Sinn und fluviatiler Feststofftransport mit eher geringen Abflussspenden dokumentiert.

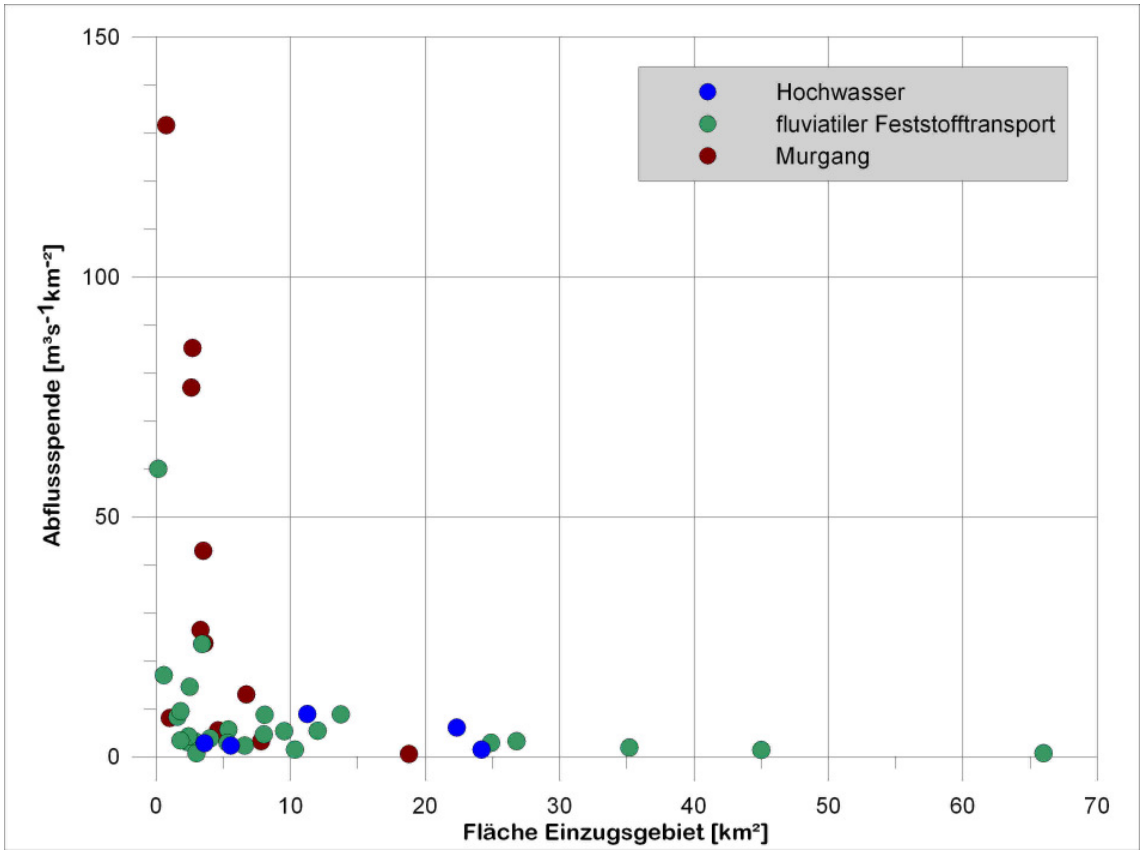


Abb. 6: Berechnung der spezifischen Abflussspende am Standpunkt der aufgenommenen Referenzprofile.

5. Diskussion und Ausblick

Die Ereignisdokumentationen der letzten beiden Jahre (HÜBL et al 2009, 2010) haben gezeigt, dass geschiebeführende Hochwässer in Wildbacheinzugsgebieten am häufigsten dokumentiert werden (2009 und 2010: 80%). Der Prozess Murgang wurde 2010 mit einem Anteil von 13% beobachtet (2009: 11%). Hochwasserereignisse ohne Feststofftransport spielen in Wildbacheinzugsgebieten eine untergeordnete Rolle (2009: 9% und 2010: 7%). Eine standardisierte Dokumentation der Wildbachereignisse ermöglicht es Vergleiche zwischen den Jahren anzustellen und mögliche Entwicklungen zu erkennen. Dafür ist eine flächendeckende Dokumentation unerlässlich. Bei Ereignissen mit überregionaler Ausdehnung ist die Koordination der Dokumentation für eine flächendeckende Aufnahme unerlässlich. Probleme bei der Interpretation der Prozessarten können insbesondere bei der Überlagerung von Prozessen auftreten. Daher spielt die Erfahrung und Ausbildung der Dokumentare eine entscheidende Rolle für die Qualität der Daten.

Literatur

HÜBL, J., KIENHOLZ, H. & LOIPERSBERGER A. (2002): DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas. International Research Society Interpraevent, Klagenfurt, Austria

HÜBL, J., HABERACK, H., KIENHOLZ, H., AGNER, P., GANAHL, E., MOSER, M., SCHEIDL, C., KERSCHBAUMEISTER,W. & SCHMID, F. (2006): Disaster Information System of Alpine Regions (Interreg III B: DIS-ALP): Methodik Teil 1 IAN Report 101, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur-Wien, im Auftrag des Lebensministerium, Abteilung IV/4 (unveröffentlicht)

HÜBL, J., CHIARI, M., KOGELNIG, A. & SCHEIDL, C.. (2009): Die Wildbachereignisse im Sommer 2009 Ereignisdokumentation (ERDOK09); IAN Report 133, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur-Wien (unveröffentlicht)

HÜBL, J., CHIARI, M., SCHEIDL, C., WIESINGER, T. & ANGELMAIER, G. (2010): Die Wildbachereignisse im Sommer 2010 Ereignisdokumentation (ERDOK 10-2); IAN Report 141, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur – Wien (unveröffentlicht)

RICKENMANN, D. (1990): Sediment transport capacity of slurry flows at steep slopes, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zurich, Nr. 103, 249 p.

ONR-24800 (2009): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung. Österreichisches Normungsinstitut.

ZAMG (2010a): Wetterrückblick Mai 2010. online: http://www.zamg.ac.at/klima/klima_monat/wetterrueckblick/?jahr=2010&monat=05, abgefragt am 8.9.2010

ZAMG (2010b): Unwetterbericht Mai 2010, online: http://www.zamg.ac.at/klima/klima_monat/unwetterbericht/?jahr=2010&monat=05, abgefragt am 8.9.2010

ZAMG (2010c): Wetterrückblick Juni 2010. online: http://www.zamg.ac.at/klima/klima_monat/wetterrueckblick/?jahr=2010&monat=06, abgefragt am 8.9.2010

ZAMG (2010d): Wetterrückblick Juli 2010, online: http://www.zamg.ac.at/klima/klima_monat/wetterrueckblick/?jahr=2010&monat=07, abgefragt am 8.9.2010

Einfluss periglazialer Deckschichten auf die oberflächennahen Fließwege am Hang - eine experimentelle Prozessstudie im Osterzgebirge, Sachsen

Katja Heller, Arno Kleber

Zusammenfassung
Der oberflächennahe Untergrund an Hängen ist in den europäischen Mittelgebirgen, dem Entstehungsgebiet zahlreicher Hochwässer, nahezu flächendeckend aus periglazialen Deckschichten aufgebaut. Haupt-, Mittel- und Basislage unterscheiden sich hinsichtlich ihrer sedimentologischen und bodenphysikalischen Eigenschaften. Die daraus resultierenden Unterschiede der hydraulischen Leitfähigkeit führen bevorzugt zu Zwischenabfluss. Diese Hypothese wird in einem kleinen Quelleinzugsgebiet im Osterzgebirge getestet. Die kontinuierlichen hydrometrischen Messungen zeigen, dass abhängig von der Bodenvorfeuchte unterschiedliche Fließwege im oberflächennahen Untergrund aktiviert werden. Die Basislage besitzt hydraulisch anisotrope Eigenschaften und begünstigt damit die Entstehung von Zwischenabfluss bei mittleren bis hohen Vorfeuchten.

1. Einführung

Die Vermeidung oder Minderung von Schäden durch Hochwasserereignisse ist nur auf der Basis ausreichender Informationen über die komplexen Prozesse bei der Entstehung und dem Abfluss von Hochwässern zu erreichen. Die Abflussbildungsprozesse des oberflächennahen Untergrundes sind jedoch noch nicht vollständig verstanden (SIVAPALAN et al. 2003, MCDONNELL et al. 2007), da physikalische und hydraulische Bodenparameter räumlich stark variieren (RESZLER et al. 2006) und meist nicht-lineare, raum-zeitliche Verknüpfungen zwischen oberflächennahem und unterirdischem Abfluss existieren (UHLENBROOK 2005, TILCH et al. 2006).

Nach GRAHAM et al. (2010) sind die Hänge die entscheidenden Einheiten hydrologischer Einzugsgebiete. Sie fungieren als Bindeglied zwischen der Atmosphäre und dem Vorfluter. Der oberflächennahe Untergrund an Hängen ist in den europäischen Mittelgebirgen, dem Entstehungsgebiet zahlreicher Hochwässer, aus quartären Hangsedimenten („Lagen“, „Deckschichten“) aufgebaut. Diese sind durch Solifluktion, Kryoturbation und teilweise durch Einarbeitung von Löss unter periglazialen Bedingungen im Pleistozän entstanden und kommen nahezu flächenhaft an Mittelgebirgshängen vor. Haupt-, Mittel- und Basislage unterscheiden sich aufgrund ihrer differenzierten Genese in ihren bodenphysikalischen und sedimentologischen Eigenschaften, wie z.B. Lagerungsdichte, Bodenart, Skelettgehalt und -einregelung (VÖLKEL et al. 2002b, AG BODEN 2005). Es gibt deutliche Hinweise, dass quartäre Hangsedimente eine wesentliche Steuergröße für hanghydrologische Prozesse darstellen. Aus zahlreichen Beobachtungen (EINSELE et al. 1986, SEMMEL 1991, KÖRNER 1996, KLEBER et al. 1998, KLEBER & SCHELLENBERGER 1998, ABDANK et al. 1999, SCHOLTEN et al. 1999, WENK 2000, SCHNEIDER et al. 2001, CASPER 2002, VÖLKEL et al. 2002a, KLEBER 2004, WENNINGER et al. 2004, CHIFFLARD et al. 2008) ist bekannt, dass an Mittelgebirgshängen mit periglazialen Deckschichten der Zwischenabfluss einen maßgeblichen Anteil am Gesamtabfluss einnehmen kann. Jedoch sind die Fließwege des

Wassers, sowie Speichereigenschaften und hydraulische Leitfähigkeiten des Deckschichtenkomplexes bisher nur unzureichend bekannt.

2. Material und Methoden

Arbeitsgebiet ist ein 0,06 km² großes Quelleinzugsgebiet im Osterzgebirge, Sachsen (Abbildung 1). Es liegt in einer Höhe von 521 m bis 575 m ü. NHN und wird ausschließlich forstwirtschaftlich genutzt. Die Jahresniederschlagssumme beträgt rund 930 mm und die mittlere jährliche Lufttemperatur liegt bei 6,6°C. Das anstehende Gestein ist Gneis. Das Quelleinzugsgebiet, das sich in einer nordostexponierten Hangdelle mit einer mittleren Hangneigung von rund 7° befindet, wird über einen Bach nach Nordosten in die Freiberger Mulde entwässert. Aus Gruslöss über Lehmschutt und Sandgrus sind Braunerden bzw. der Begleitbodentyp Pseudogley-Braunerde entwickelt.

Die Ausprägung der Deckschichten wurde kartiert und sedimentologische und bodenphysikalische Parameter der Lagen im Gelände und Labor ermittelt. Im quellnahen Bereich der Hangdelle wird die Saugspannung über 76 lagenspezifisch installierte Tensiometer im 10 min-Intervall erfasst und die Quellschüttung mit einem V-förmigen Messwehr ermittelt Die Messung der meteorologischen Einflussfaktoren erfolgt an einer nahe gelegenen Klimastation und im Bestand.

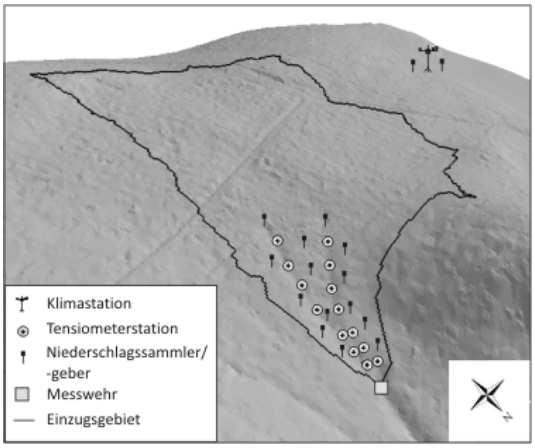


Abb. 1: Quelleinzugsgebiet mit Messeinrichtungen (nicht maßstabsgetreu; DGM 2 Landesvermessungsamt Sachsen 2007)

3. Ergebnisse

Der oberflächennahe Untergrund im Untersuchungsgebiet besteht aus zwei- bzw. dreigliedrig aufgebauten periglazialen Hangsedimenten. Die Eigenschaften der Lagen eines repräsentativen Leitprofils sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Hauptlage besitzt eine mittlere hydraulische Leitfähigkeit. Diese kann mit der geringen Lagerungsdichte und einer starken Durchwurzelung begründet werden. Demgegenüber hat die Mittellage mit einer höheren Lagerungsdichte, damit geringeren Porosität und einem höheren Bodenskelettgehalt eine wesentlich niedrigere hydraulische Leitfähigkeit. Die Basislage weist trotz der höchsten Lagerungsdichte die im Mittel höchste hydraulische Leitfähigkeit auf. Zu vermuten sind anisotrope, d.h. richtungsabhängige, hydraulische Eigenschaften auf-

grund des hangparallel eingeregelten Bodenskeletts der Basislage, wie es auch von KLEBER & SCHELLENBERGER (1998) beschrieben wurde.

Tab. 1: Eigenschaften der periglazialen Deckschichten eines repräsentativen Leitprofils

Lage	Tiefe (cm)	Bodenart	Bodenskelettgehalt (Vol.-%)	Porosität (%)	Lagerungsdichte (g/cm³)	feldgesättigte hydraulische Leitfähigkeit (cm/d)+
Hauptlage	0 - 45	Uls	~ 24	0,7	1,2	26
Mittellage	45 - 90	Uls	~ 33	0,5	1,5	8
Basislage	90 - 250	Sl2	~ 50	0,3	1,7	51

* = nach AG BODEN (2005); + = gemessen mit einem Compact Constant Head Permeameter

Der in Abbildung 2 dargestellte jahreszeitliche Verlauf der Saugspannung an der Tensiometerstation H1 zeigt, dass die Schichtung des oberflächennahen Untergrundes einen Einfluss auf die vertikale Feuchteverteilung hat. Die Saugspannung der Haupt- und Mittellage unterliegt im Jahresverlauf relativ großen Schwankungen. Im Sommerhalbjahr bewirkt die Erhöhung der Evapotranspiration eine Austrocknung, die jedoch durch Niederschlagsereignisse immer wieder unterbrochen wird. In der Basislage zeigt sich, vor allem im Winterhalbjahr, ein anderes Bild. Im oberen Bereich, in Tiefen zwischen 80 und 140 cm, entwickelt sich zwischen November und April eine fast durchgängig gesättigte Zone, die sich nach Niederschlagsereignissen geringfügig Richtung Mittellage und in tiefere Bereiche der Basislage ausweitet. Deutlich wird, dass die Quellschüttung nach Niederschlägen nur dann stark ansteigt, wenn diese gesättigte Zone in der oberen Basislage ausgebildet ist. Demgegenüber ist die Saugspannung im unteren Bereich der Basislage höher und unterliegt weitestgehend unabhängig von den Niederschlagsereignissen sehr geringen Schwankungen. Dies deutet auf eine vertikal stauende Wirkung der unteren Basislage hin. Die anschließende Analyse ausgewählter Niederschlags-Abfluss-Ereignisse soll Aufschluss darüber geben, welche Abflussbildungsprozesse im Untersuchungsgebiet zu den dargestellten Feuchtemustern und den entsprechenden Reaktionen des Quellpegels führten.

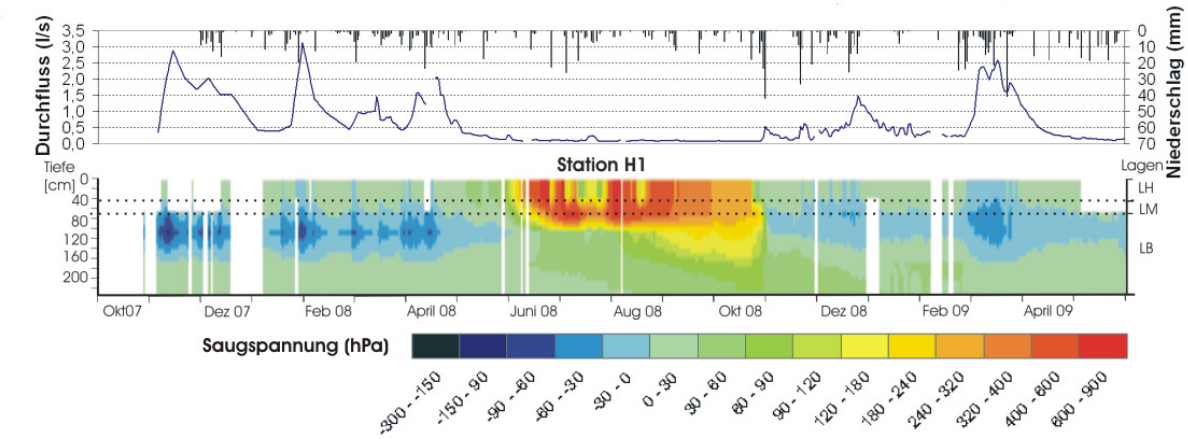


Abb. 2: Verlauf der Quellschüttung und des Niederschlags sowie Tagesmittel der Saugspannung in Abhängigkeit von der Tiefe und der Zeit an Station H1 für November 2007 bis Mai 2009.

Ein typisches Niederschlags-Abfluss-Ereignis mit geringer Vorfeuchte fand zwischen dem 3.7. und 5.7.08 statt (Abbildung 3). Vor dem Niederschlagsereignis (27 mm) war der Boden frisch bis mäßig frisch. Die Pegelspitzen der Quellschüttung fallen nahezu direkt mit den Niederschlagsmaxima zusammen. Bereits zwei Stunden nach Niederschlagende hat die Quellschüttung wieder ihr ursprüngliches Niveau erreicht. An der Hangstation H1 steigt das hydraulische Potential nur in der Hauptlage. Eine Infiltration bis in die Mittellage findet nicht statt, ist aber an anderen Stationen teilweise zu beobachten. Quellnah infiltriert das Wasser bis in die obere Basislage. Die geringe Durchflussvolumenerhöhung von nur 2 m³ und der Pegelverlauf lassen darauf schließen, dass die Pegelerhöhung durch Sättigungsoberflächenabfluss aus dem 75 m² großen Quellsumpf verursacht wird. Das im Einzugsgebiet infiltrierende Wasser füllt den Bodenspeicher bzw. verdunstet.

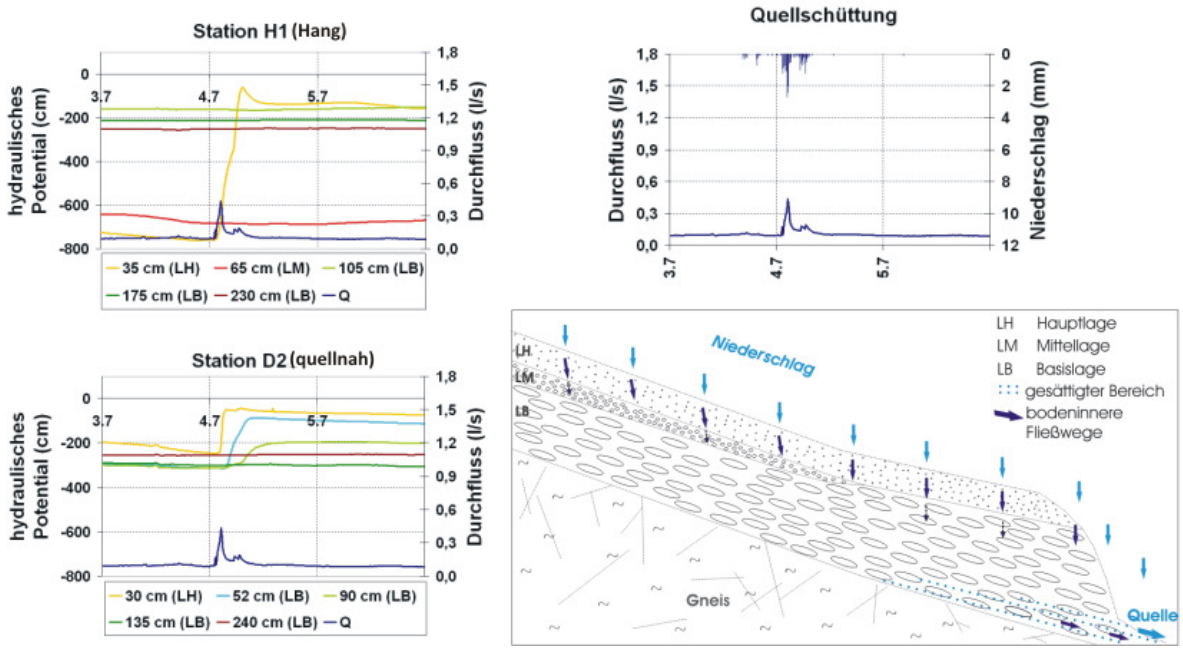


Abb. 3: Verlauf der hydraulischen Potentiale an den Stationen H1, D2 und der Quellschüttung für den Zeitraum vom 3.7. – 5.7.2008. Prozessmodell für N-A-Ereignis mit geringer Vorfeuchte.

Zwischen dem 27.10. und 2.11.08 konnte ein Niederschlags-Abfluss-Ereignis mit mittlerer Vorfeuchte beobachtet werden (Abbildung 4). Vor Einsetzen der Niederschläge (87 mm) war der oberflächennahe Untergrund mäßig feucht bis feucht. Die Quellschüttung steigt erst langsam und mit Einsetzen des vierten Niederschlagsabschnittes markant an. Am 1.11. folgt ein zweites kleineres Durchflussmaximum. Die Durchflusserhöhung beträgt 131 m³, erst nach 13 Tagen erreicht der Pegel wieder sein Ausgangsniveau. An Station H1 ist zu erkennen, dass die hydraulischen Potentiale zuerst in der Hauptlage, markant in der Mittellage und dann verzögert auch in der oberen Basislage ansteigen. Dabei korrespondieren die Potentialverläufe in der Haupt- und Mittellage und quellnah an D2 in 90 cm Tiefe sehr gut mit dem ersten Durchflussmaximum. Ein lateraler Abfluss in Haupt- und Mittellage ist wahrscheinlich. Die nachlaufende Welle am Pegel korreliert mit dem verzögerten Potentialanstieg in 105 cm an H1 sowie in 135 cm an D2, d.h. es entsteht zeitlich versetzt auch Zwischenabfluss in der oberen Basislage. Eine vertikale Versickerung in die tiefere Basislage tritt nur mäßig auf.

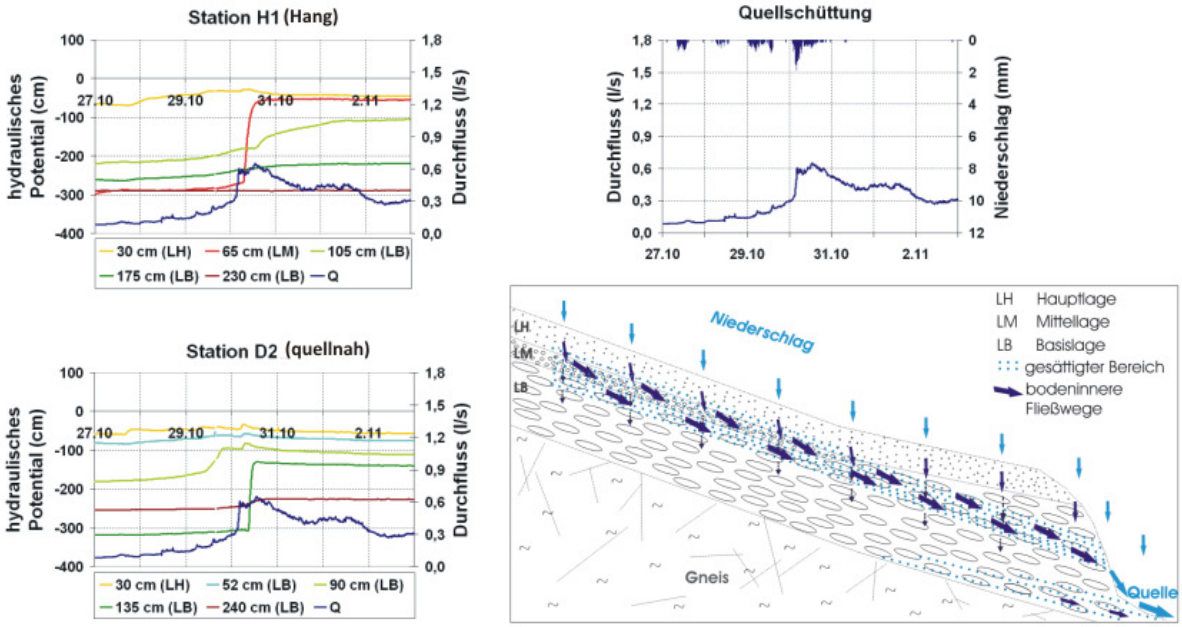


Abb. 4: Verlauf der hydraulischen Potentiale an den Stationen H1, D2 und der Quellschüttung für den Zeitraum vom 27.10. – 2.11.2008. Prozessmodell für N-A-Ereignis mit mittlerer Vorfeuchte.

Ein Niederschlags-Abfluss-Ereignis mit hoher Vorfeuchte fand zwischen dem 19.12. und 27.12.08 statt (Abbildung 5). Vor Niederschlagsbeginn war die Hauptlage sehr feucht bis nass.

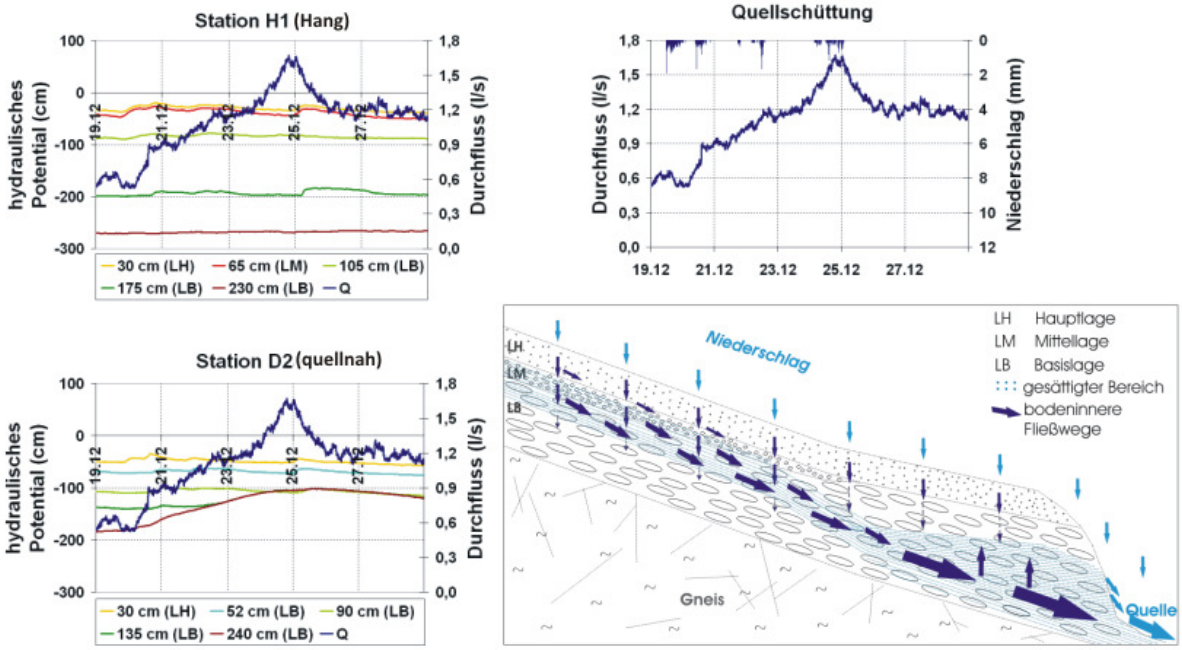


Abb. 5: Verlauf der hydraulischen Potentiale an den Stationen H1, D2 und der Quellschüttung für den Zeitraum vom 27.10. – 2.11.2008. Prozessmodell für N-A-Ereignis mit hoher Vorfeuchte

Im Hangbereich sind Mittel- und obere Basislage bereits gesättigt. Im quellnahen Bereich herrscht Sättigung in der tieferen Basislage. Mit Einsetzen des Niederschlags (69 mm) steigt

die Quellschüttung kontinuierlich an und erreicht am 25.12. ihr Maximum. Die Durchflusserhöhung beträgt 472 m³ und erst nach 17 Tagen erreichte der Pegel wieder die Höhe des Anfangsdurchfluss. In Haupt-, Mittel- und oberer Basislage steigen die Potentiale wellenförmig an. Die tiefste Basislage reagiert im Hangbereich nicht, d.h. der Potentialausgleich erfolgt lateral. Deutlich wird dies durch das kontinuierliche Ansteigen des hydraulischen Potentials in der tiefsten Basislage an der quellnahen Station. Es übersteigt das der darüberliegenden Schichten. Der Verlauf korreliert mit dem Anstieg des Pegels. Das Wasser infiltriert am Hang bis in die Mittel- und obere Basislage. Es gelangt als Zwischenabfluss in die tiefere Basislage des quellnahen Bereichs und führt dort durch die Einengung des Durchflussquerschnitts im unteren Bereich der Hangdelle zu einem Wasseraufstieg in darüberliegende Schichten. Die Quellschüttung steigt parallel dazu markant an und erreicht bei einer geringeren Niederschlagsmenge als beim vorher beschriebenen Ereignis einen mehr als 3,5-faches Abflussvolumen.

4. Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Niederschlags-Abfluss-Ereignisse zeigt, dass abhängig von der Bodenvorfeuchte unterschiedliche Fließwege im oberflächennahen Untergrund aktiviert werden und dabei die Schichtung einen maßgeblichen Einfluss ausübt. Die Basislage besitzt durch ihre hohe Lagerungsdichte vertikal wasserstauende, jedoch durch das hangparallel eingeregelte Bodenskelett lateral wasserleitende Eigenschaften. Bei mittleren bis hohen Vorfeuchten wird dadurch die Entstehung von Zwischenabfluss an Hängen begünstigt, der zu lang anhaltenden Pegelerhöhungen führt.

Literatur

ABDANK, H. et al. (1999): Präferentielle Fließwege - Ursache für schnellen Stoffeintrag im Festgesteinsbereich der Unterharz-Plateauflächen. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 91 (2), S. 731-734

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover

CASPER, M. (2002): Die Identifikation hydrogeologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). – Ph.D. Thesis Univ. Karlsruhe, 170 S.

CHIFFLARD, P. et al. (2008): Skalenübergreifende Prozess-Studien zur Abflussbildung in Gebieten mit periglazialen Deckschichten (Sauerland, Deutschland) – Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 13, S. 27-41

EINSELE G. et al. (1986): Niederschlag-Bodenwasser-Abflußbeziehungen bei Hochwasserereignissen im Keuper-Lias-Bergland des Schönbuchs. – In: Deutsche Forschungsgemeinschaft [Hrsg]: Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch, VCH-Verlag Friedrichs, S. 209-234

GRAHAM, C. et al. (2010): Hillslope threshold response to storm rainfall: (1) A field based forensic approach. Journal of Hydrology, DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.12.015

KLEBER, A. & A. SCHELLENBERGER (1998): Slope hydrology triggered by cover-beds. With an example from the Frankenwald Mountains, northeastern Bavaria – Zeitschrift f. Geomorphologie N.F. 42, S. 469-482

KLEBER, A. et al. (1998): Slope deposits and water paths in a spring catchment, Frankenwald, Bavaria, germany. – Nutrient Cycling in Agroecosystems 50, S.119-126

KLEBER, A. (2004): Lateraler Wasserfluß in Hangsedimenten unter Wald. In: Lorz, C, Haase, D (Hrsg.) (2004): Stoff- und Wasserhaushalt in Einzugsgebieten. Beiträge zur EU-Wasserrahmenrichtlinie und Fallbeispiele. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 7-22

KÖRNER, W. (1996): Abflussbildung, Interflow und Stoffbilanzierung im Schönbuch Waldgebiet. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C, Band 27, 211 S.

MCDONNELL, J.J. et al. (2007): Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. Water Resources Research, VOL. 43: W07301

RESZLER, Ch. et al. (2006): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50: S. 220-230

SCHNEIDER, R. et al. (2001): Untersuchungen zur Hochwasserentstehung im Labor und Gelände auf unterschiedlichen Skalenniveaus.- Mittlg. Dt. Bodenk. Ges. 96 /II, S. 653– 654

SCHOLTEN, T. et al. (1999): Die Bedeutung periglaziärer Lagen für Funktionen des Bodens im Ostharz. – Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 91 (2), S. 1096-1099

SEMMEL, A. (1991): Relief, Gestein, Boden, Grundlagen der Physischen Geographie I, Wiss. Buchges., Darmstadt, 148 S.

SIVAPALAN, M. et al. (2003): IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003 – 2012: Shaping an exciting future fort he hydrological sciences. Hydrological Sciences Journal 48(6), S. 857-880

TILCH, N. et al. (2006): Hydrologische Prozessforschung zur Hochwasserentstehung im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Kitzbüheler Alpen, Österreich). Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (2), S. 67-78

UHLENBROOK, S. (2005): Von der Abflussbildungsforschung zur prozessorientierten Modellierung – ein Review. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49 (1), S. 13-24

VÖLKEL, J. et al. (2002a): Zur Bedeutung kaltzeitlicher Hangsedimente in zentraleuropäischen Mittelgebirgslandschaften und zu Fragen ihrer Terminologie. Petermanns Geographische Mitteilungen, 146 (2), S. 50-59

VÖLKEL, J. et al. (2002b): Periglaziale Deckschichten in Mittelgebirgen – ein offenes Forschungsfeld. – Berichte z. dt. Landeskunde 76(2/3), S. 101-114

WENK, G. (2000): Zur Bedeutung unterirdischer Abflusskomponenten in hydrologischen Untersuchungsgebieten des Unterharzes. – In: Erfurter Geographische Studien. Bd. 9, Institut für Geographie der Universität Erfurt, S. 109-137

WENNINGER, J. et al. (2004): Experimental evidence of fast groundwater responses in a hillslope/floodplain area in the Black Forest Mountains, Germany. Hydrol. Process. 18, S. 3305-3322

Untersuchungen zum Abfluss im oberflächennahen Untergrund im Hochwasserfall

Robert Schwarze, Burkhard Beudert, Susanne Theiss

Zusammenfassung
Der kombinierte Einsatz isotopischer und chemischer Tracer, gemessen über alle Kompartimente von Niederschlag, Boden- und Grundwasser bis Abfluss, ermöglicht eine genaue Identifizierung von Herkunft, Fließwegen und Anteilen des Hochwasserabflusses. Vorgestellt werden Ergebnisse aus dem Einzugsgebiet der Großen Ohe im Bayerischen Wald.

1. Einleitung

Bei der Generierung eines Hochwasserereignisses sind sowohl direkt abfließendes Niederschlagswasser als auch die meist dominierende ereignisinduzierte Mobilisierung sogenannten Vorereigniswassers beteiligt. Das belegen insbesondere eine Vielzahl isotopenhydrologische Untersuchungen. Trotzdem diese Erkenntnis nicht neu ist, hinkt ihr die Berücksichtigung in der Prozessmodellierung noch immer hinterher. Wesentliche Ursache dafür sind die komplexen Abläufe des unterirdischen Abflusses im Hochwasserfall. Hier ist die Frage der Herkunftsräume und der Fließwege sowie der Abflussmechanismen in Abhängigkeit von der vertikalen und horizontalen Struktur der Böden, Deckschichten und der Geologie des Gebietsuntergrundes von besonderem Interesse. Ziel der Untersuchung ist, durch eine komplexe gekoppelte Analyse mittels verschiedener voneinander unabhängiger Verfahren, Abläufe des Abflussprozesses in Kleineinzugsgebieten zu erkennen. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse über den Prozessablauf können der Formulierung von neuen Ansätzen zur Prozessbeschreibung und zur Kalibrierung und Validierung hydrologischer Prozessmodelle dienen.

2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Große Ohe bis zum Pegel Taferlruck im Nationalpark Bayerischer Wald mit den Teileinzugsgebieten Markungsgraben und Forellenbach. In diesem bis vor ca. 15 Jahren voll bewaldeten Gebiet entwickelte sich zu Beginn der 1990er Jahre eine Borkenkäfermassenpopulation. Das hatte die Ausbildung einer fast lückenlosen Totholzzone in den Hochlagen zur Folge. Über die Auswirkungen dieses sehr schnellen Wandels der Vegetation auf den Wasserhaushalt wurde bereits in KLÖCKING et al. 2005, PUHLMANN & SCHWARZE 2007 sowie SCHWARZE & BEUDERT 2009 berichtet. In der vorliegenden Studie liegt der Fokus nunmehr auf Informationen zu Hochwassergenese und den maßgeblichen Herkunftsräumen und Fließwegen des Wassers, welche im Zusammenhang mit den Untersuchungen zum Borkenkäfereinfluss erhoben wurden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Gebietseigenschaften. Abbildung 1 zeigt die Lage am Kamm des Bayerischen Waldes. Der Untergrund besteht aus Biotitgranit und Cordierit - Gneisen und deren Verwitterungsprodukten. Bei den Böden dominieren mehr oder minder podsolierte Braunerden, in Hochlagen und erodierten Oberhanglagen vergesellschaftet mit Rankern (Syrosemen) und Podsolen. In Tälern oder Mulden kommen teils Moore und mineralische Nassböden vor. Die Braunerden sind ca. 60cm (max. 100cm) tief ausgebildet und von periglazialen Solifluktionsdecken unterlagert. Diese bestehen aus einer sandig-lehmigen, skelettreichen lockeren Deckschicht von 0,3 - 1,5m Mächtigkeit, der eine bis 5m

mächtige zementartig verfestigte lehmige Schicht folgt. Dieser Aufbau wirkt bei hohen Sickerraten nach Starkniederschlägen wasserstauend, was zu lateralen Flüssen oberhalb des Kluftgrundwasserhorizontes führt. Solifluktionsdecken erstrecken sich nach BEUDERT & BREIT 2004 nur bis in Höhen von 1050 m ü.NN. Oberhalb erreicht das Bodensickerwasser direkt das Kluftgrundwasser im Granit/Gneis.

Tab. 1: Naturräumliche Charakterisierung des Einzugsgebiets der Große

Einzugsgebiet	**Große Ohe GO**	**Markungsgraben MG**	**Forellenbach FB**
Pegel	Taferlruck	Rachel-Diensthütte	Schachtenau
Größe [km²]	19,1	1,1	0,7
Geländehöhe [m ü. NN]	982 (770 - 1435)	1128 (890 - 1355)	894 (787 - 1293)
Niederschlag [mm/a]	1670	1800	1630
Mittlerer Abfluss [m^3/s]	0,605	0,046	0,022

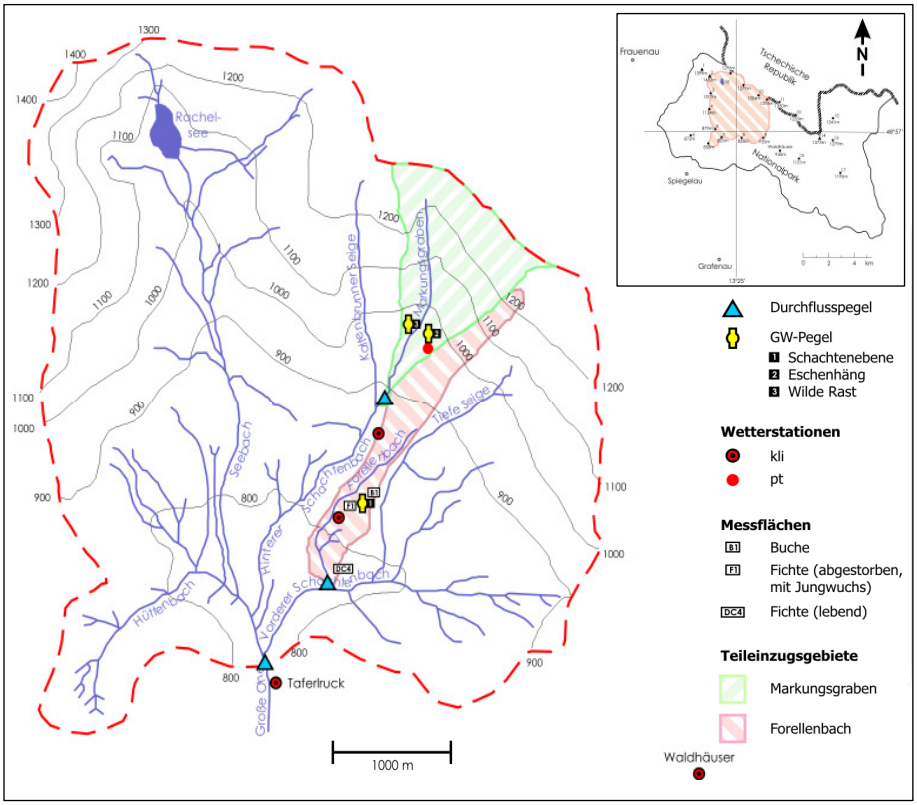


Abb. 1: Das Quellgebiet der Großen Ohe im Nationalpark Bayerischer Wald mit der Lage der einbezogenen Messstellen

2. Methodik

Die Prozessanalyse nutzt parallel verschiedene Verfahren (Abbildung 2). Die Erkundung der Prozessdynamik (Niederschlag, Abfluss, Retention, -zeiten, Herkunftsräume, Fließwege, -zeiten) erfolgt mittels einer Kombination von Verfahren zur wasserhaushaltsbilanzierten Trennung von Abflusskomponenten anhand langjähriger Niederschlags- und Durchflussmessreihen gekoppelt mit einer isotopenhydrologischen Abflusskomponententrennung und Verweilzeitbestimmung. Dieses Vorgehen wird eingebettet in eine Herkunftsraumanalyse. Diese umfasst eine kontinuier-

liche Beobachtung von Bodenfeuchte und Saugspannung in mehreren Tiefen sowie des Grundwasserstandes, verbunden mit einer Identifizierung des Prozessablaufes mittels weiterer hydrochemischer Tracer (Tabelle 2).

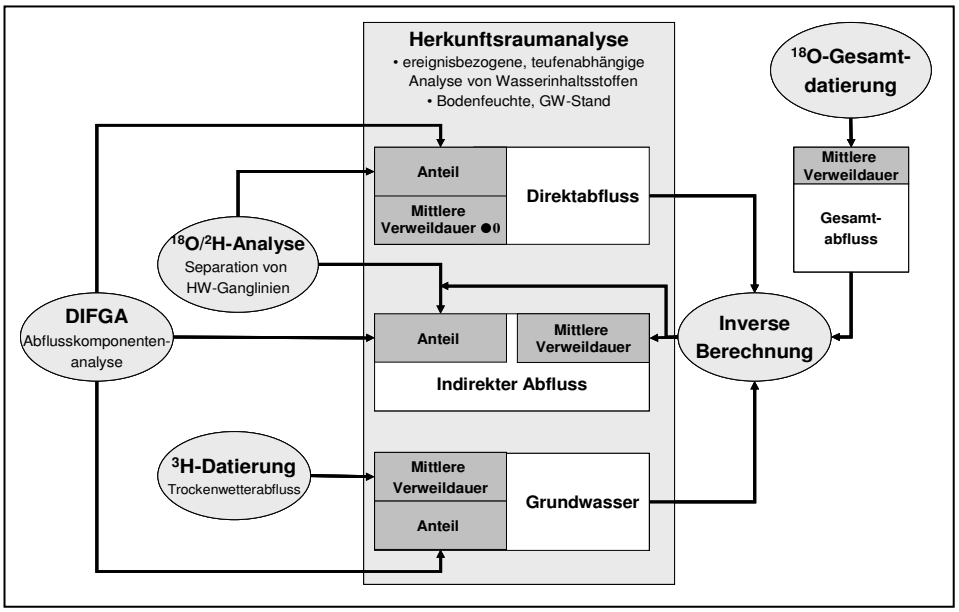


Abb. 2: Methodenkomplex zur Analyse von Herkunftsräumen, Fließwegen und Verweilzeiten

Tab. 2: Hydrochemisch / tracerhydrologisches Messprogramm

Anorganische Wasserinhaltsstoffe					
Kationen:	Alkalimetallionen	Na^+, K^+	Anionen:	Chloridionen	Cl^-
	Ammoniumionen	NH_4^+- N		Sulfationen	SO_4^{2-}
	Erdalkaliionen	Ca^{2+}, Mg^{2+}		Nitrationen	NO_3^-
	Aluminiumionen	Al^{n+}		Stickstoff	N
	Eisen-, Manganionen	Fe^{2+}, Mn^{2+}		Kieselsäure	SiO_2
Organische Wasserinhaltsstoffe			**Umweltisotope**		
DOC	Gelöster, organische gebundener Kohlenstoff		^3H ^2H ^{18}O	Tritium, Deuterium, Sauerstoff-18	

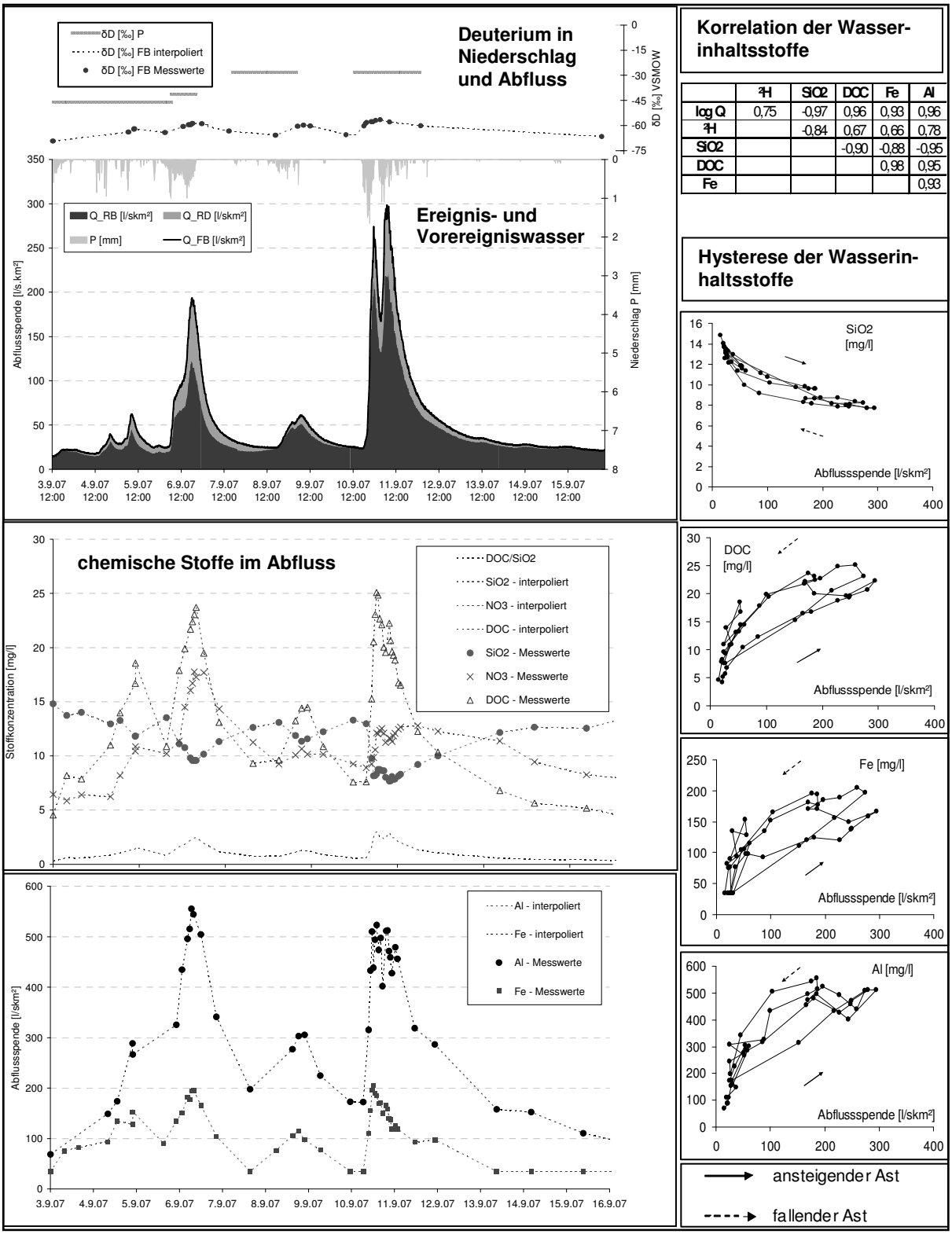
Die Analysen erfolgen für Freilandniederschlag, Bestandesdeposition, Bodenwasser, Grundwasser und Quellschüttung bzw. Abfluss. (Details SCHWARZE & BEUDERT 2009; Monitoringprogramm BEUDERT & BREIT 2004, FRIES & BEUDERT 2007). Niederschlag und Niederschlagsdeposition im Freiland (Isotope, chemische Inhaltsstoffe) werden am Taferlruck gemessen. Im Forellenbachgebiet existieren die Intensivmessflächen B1 (Buche, 100 Jahre alt) und F1 (Fichte, 110 Jahre alt). Dort werden Komponenten des wassergebundenen Stoffhaushalts (Bestandesniederschlag, Bodensickerwasser) und des biomassegebundenen Stoffhaushalts erfasst. Für das Bodenwasser werden auf den Intensivmessfeldern Wassergehalt und Saugspannung in 15, 30, 55, 85, 115 und 200 cm Tiefe bestimmt. Die Auflage- und Bodenwasserbeprobungen finden mit Humuslysimetern bzw. keramischen Saugkerzen in 40, 70 und 100 cm Tiefe statt. Grundwasserstandsmessungen bzw. -beprobungen erfolgen an den Messstellen Schachtenebene (GW1), Eschenhäng (GW2) und Wilde Rast (GW3). Zur Lage der Messstellen

siehe Abbildung 1. Messungen für drei Hochwasser im Sept. 2004 (KLÖCKING et al. 2005, SCHWARZE & BEUDERT 2009) sowie im Juni bis Okt. 2007 (SCHMIDT 2008) liegen vor.

3. Ergebnisse

Exemplarisch erfolgt die Darstellung der Ergebnisse für das HW im Sept. 2007, dessen Scheitel im Bereich eines HQ(5) liegt. Unter Nutzung von ^{2}H erfolgt im ersten Schritt eine isotopenhydrologische Separation von Ereignis- und Vorereigniswasser. Diese zeigt eine deutliche Dominanz des Vorereigniswassers. Der Anteil des direkten Abflusses RD liegt bei 11,8%, der des indirekten Abflusses RB bei 88,2% vom Gesamtabfluss R (vgl. Abbildung 3). Im nächsten Schritt werden weitere Wasserinhaltsstoffe auf ihre Eignung als Tracer für die Herkunftsanalyse des Vorereigniswassers überprüft. Entscheidend für die Auswahl sind ein möglichst konservatives Verhalten sowie ein hinreichend großer Unterschied zwischen Input- und Outputkonzentration. Diese Kriterien werden primär von SiO_2, Fe, Al und DOC erfüllt. Für diese vier Stoffe kann ausgehend vom langjährigen Monitoring (BEUDERT & BREIT 2004) die Zuordnung von Herkunftsräumen erfolgen. SiO_2 stammt in erster Linie aus der Mineralverwitterung im Grundwasserumsatzraum, insbesondere dem Granitzersatz. Kieselsäure kann als Tracer verwendet werden, da sie nicht in kurzer Zeit durch Mineralverwitterung nachgeliefert werden kann und im Konzentrationsniveau der Ökosystemkompartimente gut unterscheidbar ist. Während Kieselsäure in den tieferen Mineralboden- und Grundwässern in relativ hoher Konzentration gefunden wird, ist die Konzentration in den oberen Boden- und Auflageschichten gering. DOC ist ein eindeutiger Zeiger für die Beteiligung oberflächennaher Teilräume am Abflussgeschehen. Mit einsetzenden Niederschlägen wird DOC aus den Auflage- und obersten Bodenschichten mobilisiert und lateral zum Vorfluter transportiert. Dabei entleert sich der DOC-Speicher im Boden und die Konzentration an DOC geht zurück. DOC wird jedoch relativ schnell durch mikrobielle Aktivität neu gebildet, sodass die Ausgangskonzentration innerhalb kurzer Zeit wieder erreicht wird. Deshalb ist DOC nur bedingt als Tracer verwendbar. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass DOC während eines Niederschlagsereignisses auch aus den Feuchtflächen der Einzugsgebiete in die Vorfluter eingetragen wird. Diese Teilräume dürften mindestens ebenso hohe DOC-Konzentrationen wie Auflagesickerwässer aufweisen. Bei allen Hochwässern gelangt DOC mit oberflächennah lateral abfließendem Wasser in die Gewässer. Der Konzentrationsverlauf folgt weitgehend dem Verlauf der Hochwasserwelle. Al^{n+}-Ionen werden hauptsächlich in versauerten mineralischen Oberbodenhorizonten als austauschbares und Zwischenschicht-Al^{n+} freigesetzt und überwiegend als pH-abhängig geladene Komplexe verlagert. Der Niederschlagseintrag ist unbedeutend. Gleichzeitiges Auftreten hoher Konzentrationen von Al^{n+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} und DOC ist charakteristisch für Sickerwasser aus den organischen Auflagen nach deren Kontakt zum Mineralboden. Eisen kommt nur in Wasser aus der organischen Auflage vor, während die Konzentration in allen anderen Sickerwasserproben unterhalb der Nachweisgrenze liegt. Kommt es also zum Austrag von Eisen, repräsentiert es primär die organischen Auflagen und Kontaktbereiche zum Mineralboden. Zeitlich hochaufgelöste Messungen dieser Tracer werden zunächst einer Korrelationsanalyse und einer Auswertung von Hystereseerscheinungen unterzogen (Abbildung 3). Sie zeigen, dass während des Hochwassers Vorereignis- durch Ereigniswasser verdängt worden sein muss. Dies lässt sich besonders anhand hoher negativer Korrelationen zwischen Kieselsäure und DOC zeigen. Während die Konzentration der Kieselsäure mit zunehmender Hochwasserwelle sinkt,

steigt die des DOC an. D.h. schnell wirksam werdendes Niederschlagswasser, welches lediglich die oberen Auflage- bzw. Bodenschichten passiert, sich dort mit DOC anreichert und dann ins Gewässer eintritt, verdünnt kieselsäurereiches Vorereigniswasser. Auch Hysteresen zwischen chronologisch aufgetragen Konzentrationen und Abflüssen stützen die These. Die Konzentrationen von DOC, Fe^{2+} und Al^{n+} sind im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle niedriger als im abfallenden. Kieselsäure hingegen hat im abfallenden Ast deutlich niedrigere Konzentrationen als zu Ereignisbeginn. Dies bestätigt die Verdünnung kieselsäurehaltigen Wassers. Die hohen Al^{n+}-Werte ließen den Schluss zu, dass die Hochwasserwelle zu großen Teilen Wasser aus den Mineralbodenhorizonten enthält, was jedoch durch die gleichzeitig vorliegenden hohen DOC- und Fe^{2+}-Konzentrationen widerlegt wird. Vielmehr erhärtet sich die These, dass die Bäche während eines Hochwassers durch schnell wirksam werdendes Wasser aus der Auflage und den oberen Bodenschichten gespeist werden. Dabei hat das Wasser augenscheinlich sowohl mit organisch geprägtem als auch mit mineralisch beeinflussten Bodenschichten Kontakt und trägt deren chemische Signatur in die Bäche ein. Nachdem mit ^2H bereits eine Separation in Vorereignis- und Ereigniswasser erfolgte, sollen diese Thesen sowie die genaue Herkunft des Ereignis- bzw. Vorereigniswassers mit einer erweiterten tracerhydrologischen Separation bewertet werden. Eingesetzt werden die Verfahren von OGUNKOYA & JENKINS 1993 und HOEG et al. 2000. (Details: SCHWARZE & BEUDERT 2009 und SCHMIDT 2008). Die Separation nach OGUNKOYA (^2H + DOC bzw. SiO_2) zeigt, dass der isotopisch ermittelte Ereigniswasseranteil auch mittels chemischen Wasserinhaltsstoffe eindeutig nachbildbar ist. Der direkte Ereigniswasserabfluss beträgt ca. 17% vom Gesamtabfluss. Das Vorereigniswasser kann in Boden- (17%) und „Grundwasser“ (66%) getrennt werden. Eine eindeutige Zuordnung zu Bodenschichten bzw. Grundwasser ist jedoch nicht möglich, gelingt aber mit der Methode nach HOEG (Abbildung 4). Es ergeben sich zwei schnelle Abflusskomponenten: direkt abflusswirksamer Niederschlag QS-E (Oberflächenabfluss) und die schnelle Abflusskomponente QS-PE aus Auflage und oberen Boden. Der langsame Abfluss konnte unterteilt werden in Abfluss aus oberen Bodenschichten QU sowie Wasser aus den unteren bis tiefen Boden-/Grundwasserschichten QL. Die isotopisch separierten Komponenten Ereignis-/Vorereigniswasser können dabei mit Hilfe von DOC, SiO_2, Al und Fe identifiziert werden. Es zeigt sich, dass die Hochwässer zum einen aus Niederschlagswasser gebildet werden, welches organische Auflage und Grenzschicht zwischen organischer Auflage und mineralischen Boden schnell passiert. Dabei behält das Wasser den isotopischen Charakter des Ereigniswassers, nimmt jedoch zusätzlich die chemische Signatur der durchflossenen Einzugsgebietsteile an. Dieses Wasser weist eine sehr hohe DOC Konzentration auf, welches ausschließlich in organischer Auflage und oberen, organisch geprägtem Boden vorkommt. Gleichzeitig ist aber auch der Al - Gehalt hoch. Da Al mineralischen, versauerten Bodenschichten entstammt, in welchen DOC immobilisiert wird, lässt dies nur den Schluss zu, dass das Wasser schnell durch organische Auflageschichten hindurchsickert und in der leicht durchlässigen Grenzschicht zwischen organischen und mineralischen Bodenkompartimenten lateral zum Vorfluter gelangt. Damit besteht der oberflächennahe schnelle Abfluss QS sowohl aus Ereigniswasser QS-E als auch aus im Oberboden gespeichertem Vorereigniswasser QS-PE. Zum anderen sind Wässer tiefer Bodenschichten beteiligt. Der langsamere Bodenwasserabfluss besteht aus der Komponente QU (Tiefen bis 70 cm) und QL (Wasser tieferer Bodenschichten, am Ereignisende auch Grundwasser). Diese Wässer weisen einen sehr hohen SiO_2 Gehalt auf. Mit



	²H	SiO2	DOC	Fe	Al
log Q	0,75	-0,97	0,96	0,93	0,96
²H		-0,84	0,67	0,66	0,78
SiO2			-0,90	-0,88	-0,95
DOC				0,98	0,95
Fe					0,93

Abb. 3: Forellenbach – September-Hochwasser 2007 - Separation in Vorereigniswasser RB und Ereigniswasser RD mittels Deuterium (oben links), Ganglinien der Wasserinhaltsstoffe DOC, SiO_2, NO_3 und des Verhältnisses DOC/SiO_2 (Mitte links), Ganglinien von Al und Fe (unten links), Korrelation der Wasserinhaltsstoffe zum Abfluss und untereinander (oben rechts), Hystereseverläufe zwischen Abfluss und den Inhaltsstoffen SiO_2, DOC, Fe, Al

dem Ereignis sinkt der SiO_2 Gehalt stark ab und erreicht im abfallenden Ast die Konzentration bei gleichem Wasserstand im ansteigenden Ast nicht mehr. Dies spricht dafür, dass Vorereigniswasser aus tieferen Horizonten der Böden und der Grundwasserleiter durch schnell zufließendes Ereigniswasser und oberflächennahes Vorereigniswasser stark verdünnt wird. Die Verläufe der Saugspannungen im Boden und der GW-Stände bestätigen den Prozessablauf. Insbesondere bedingt durch Solifluktionsdecken wird der Hochwasserabfluss primär innerhalb der Bodenzone generiert. Der Grundwasserabfluss steigt erst ganz gegen Ende des Ereignisses an.

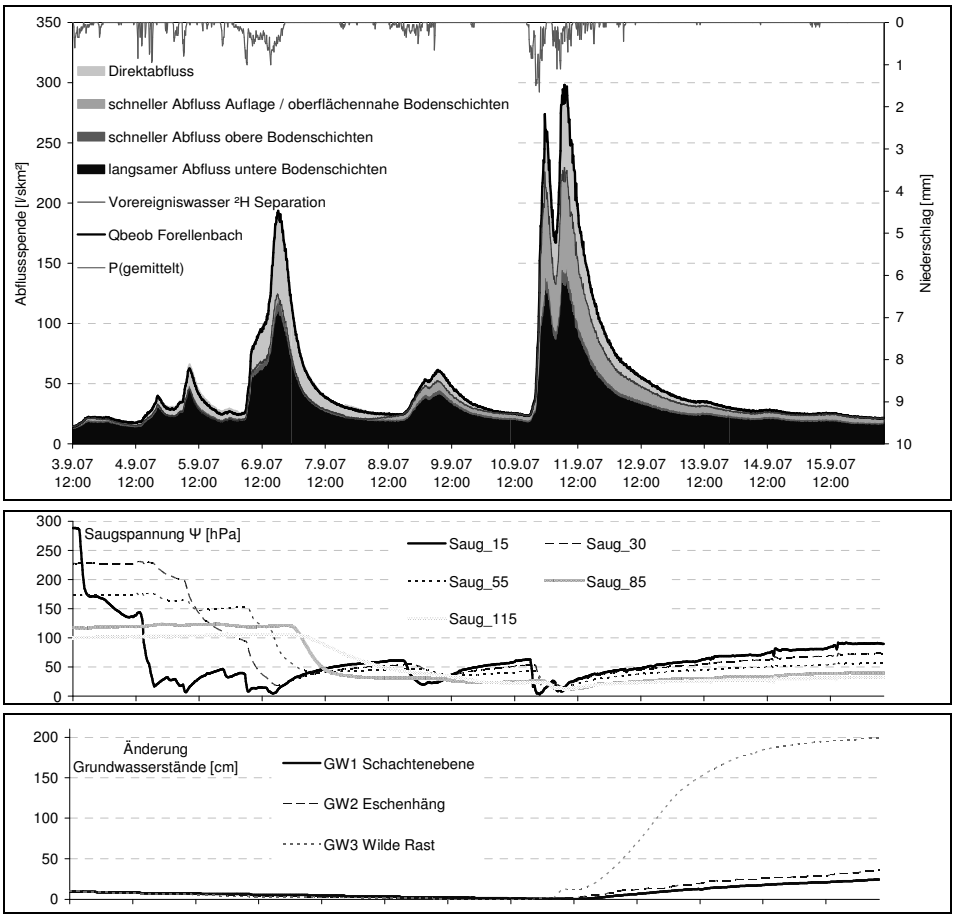


Abb. 4: Ergebnisse der Separation nach HOEG (oben), Saugspannung im Boden (Mitte) und GW-Stand (unten) für das Hochwasser vom September 2007 im Forellenbach

Literatur

BEUDERT, B. & W. BREIT (2004): Zwölf Jahre Integrated Monitoring-Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald, UBA-Fkz. 351 01 012; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, 307 S.

OGUNKOYA & JENKINS (1993): Analysis of storm hydrograph on flow pathways using a three Component hydrograph separation model. Jour. of Hydrol. 142; Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam 1993

FRIES, H. & B. BEUDERT (2007): Report on national ICP IM activities in Germany. In: KLEEMOLA, S. & FORSIUS, M. (eds.): 16th Annual Report 2007. International Cooperative

Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems. The Finish Environment 26/2007, S. 68-81, ISBN 978-952-11-2758-8, Helsinki

HOEG, S., S. UHLENBROOK, CH. LEIBUNDGUT (2000): Hydrograph separation in a mountainous catchment – combining hydrochemical and isotopic tracers. Hydrological Processes 14, S. 1199-1216

KLÖCKING, B., R. SCHWARZE, B. BEUDERT, F. SUCKOW, P. LASCH, F. BADECK, B. PFÜTZNER (2005): Auswirkungen des Borkenkäferbefalls auf den Wasser- u. Stoffhaushalt zweier Gewässereinzugsgebiete im Nationalpark Bayerischer Wald, Reihe „Wasserhaushalt u. Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet der Großen Ohe“, Bd. 8, ISSN 0937-0056

PUHLMANN, H. & R. SCHWARZE: Ed. German part (2007): Forest hydrology – results of research in Germany and Russia. Deutsches Nationalkomitee für das International Hydrological Programme der UNESCO und das Hydrology and Water Resources Programme der WMO. IHP/HWRP-Berichte Heft 6, Koblenz, 2007, 137 p., ISSN 1614-1180

SCHMIDT, S. (2008): Tracerhydrologische Untersuchungen zu Veränderungen im Wasser- und Stoffhaushalt von Einzugsgebieten im Nationalpark Bayerischer Wald infolge borkenkäferinduzierten Absterbens von Fichtenbeständen. Diplomarbeit, TU Dresden, Inst. F. Hydrologie und Meteorologie 2008

SCHWARZE, R. & B. BEUDERT (2009): Analyse der Hochwassergenese und des Wasserhaushalts eines bewaldeten Einzugsgebietes unter dem Einfluss eines massiven Borkenkäferbefalls. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HW53. 2009, H. 4, 236-249

Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung auf verschlämmungsgefährdeten Agrarflächen

Florian Winter, Markus Disse

Zusammenfassung

Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen beinhalten unter anderem die Förderung der Versickerung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bei konventioneller Bodenbearbeitung können dagegen durch die zeitweise fehlende Bodenbedeckung Starkniederschläge direkt auf die Bodenoberfläche auftreffen und eine verschlämmende Wirkung der obersten Bodenschicht bewirken. Das Verschlämmungsmodell von SCHRÖDER & AUERSWALD (2000) beschreibt den Prozess der verschlämmungsgesteuerten Infiltration mit einem modifizierten Infiltrationsansatz nach Horton. Die Modellparameter sollen hierbei durch leicht erfassbare Bodeneigenschaften und Parameter zur Bewirtschaftung geschätzt werden.

Eine Parametrisierung dieses Ansatzes wurde in das hydrologische Modellsystem WaSiM-ETH implementiert, um Abflussbildungsprozesse in der Mikroskale prozessorientiert simulieren zu können. Bei einer ersten Anwendung kann gezeigt werden, dass Beregnungsversuche in WaSiM-ETH unter Berücksichtigung des Verschlämmungsprozesses besser simuliert werden können als durch die Parametrisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften nach Mualem-van-Genuchten.

1. Einleitung

Zu den Maßnahmen eines nachhaltigen Hochwasserschutzes zählt auch der Wasserrückhalt in der Fläche. Eine Maßnahme des dezentralen Hochwasserschutzes ist unter anderem die Förderung der Versickerung auf landwirtschaftlichen Flächen, zum Beispiel durch angepasste Bewirtschaftungsformen (KOEHLER 2007). Auf agrarwirtschaftlich genutzten Flächen unterscheidet sich je nach Bearbeitungsform die Bodenbedeckung im Laufe eines Anbauzyklus (SCHRÖDER & AUERSWALD 2000). Dieser Brachzustand kann in Abhängigkeit der Kulturpflanze und Fruchtfolge unterschiedlich lang sein. Das Belassen von Ernterückständen auf der Bodenoberfläche, das sogenannte Mulchen, ist eine Technik der konservierenden Bodenbearbeitung. Durch den Wechsel von der konventionellen Wendung des Boden durch Pflugeinsatz zur nichtwendenen Bearbeitung wird das Bodengefüge stabilisiert und die Entstehung von Makroporen gefördert (SCHMIDT et al. 2007). Mit der Verwendung von Mulchsaat wird eine ganzjährige Bodenbedeckung angestrebt, so dass der Boden nicht der mechanischen Wirkung von Starkniederschlägen ausgesetzt ist. Ein hoher Bodenbedeckungsgrad begünstigt die Infiltrationsraten auf landwirtschaftlichen Flächen (ROTH 1992, AHUJA & SWARTZENDRUBER 1992, DULEY 1939).

Die nach einer Bodenbearbeitung lose aneinander liegenden Aggregate werden bei unbedeckten Böden durch Regenereignisse hoher Intensitäten zerschlagen und eingeebnet. Durch den mechanischen Tropfenaufprall werden Partikel abgewaschen und verlagert, was zu einer Umlagerung der zerstörten Aggregate und einer Verlegung durchlässiger Poren führt. Dieser als Verschlämmung bekannte Prozess führt zur Entstehung einer Schicht auf der Bodenoberfläche, die durch eine deutlich herabgesetzte hydraulische Leitfähigkeit charakterisiert ist. Dadurch wird die Infiltrationskapazität gehemmt sowie die Abflussbildung auf

der Oberfläche und die damit einhergehende Wassererosion der obersten Bodenschicht verstärkt (ROTH 1992). Durch eine Verringerung der Verschlämmungsanfälligkeit durch angepasste Bewirtschaftungsformen kann die Abflussbildung und das Abflussvolumen verringert werden (SCHMIDT et al. 2007).

2. Methodik

Im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „Einfluss der Bewirtschaftungsformen auf die Abflussbildung und –konzentration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten“ wurde eine Datenbank von Beregnungsversuchen erstellt, die mit vergleichbarer Methodik auf verschiedenen Standorten ackerbaulich genutzter Bodentypen durchgeführt wurden. Die Datenbank beruht auf der experimentellen Arbeit von MARTIN (1988), HAIDER (1994), GERLINGER (1997), SCHRÖDER & AUERSWALD (2000) und MICHAEL (2001). Für die Identifizierung der hydrologischen Prozesse und zur Erweiterung von WaSiM-ETH wurden die Datensätze der experimentellen Randbedingungen, der Bodeneigenschaften sowie der experimentellen Durchführung vereinheitlicht und aufbereitet (SEIBERT et al. 2011). Aus dieser Datenbank von insgesamt 728 Beregnungsversuchen (unterteilt in Trocken-, Feucht- und Nassläufe) wurde versucht, auf Grundlage eines Verschlämmungsmodells Transferfunktionen abzuleiten, die die verschlämmungsgesteuerte Infiltration prozessorientiert abbilden.
SCHRÖDER (2000) entwickelte das Verschlämmungsmodell H-KIN, welches folgende mathematische Formulierungen des Prozessverständnisses umsetzt:
Die Abnahme der Infiltrationsrate wird als negative Exponentialfunktion in Abhängigkeit der kumulativen Energie des Niederschlags umgesetzt.
Die Nutzungsabhängigkeit wird dadurch berücksichtigt, dass die mechanische Energie des Niederschlags um den Bedeckungsgrad durch Vegetation reduziert wird.
Die allmähliche Rückbildung der Verschlämmungsschicht in niederschlagsfreien Perioden oder nach einer landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung wird durch eine erneute Zunahme der Infiltrationsrate abgebildet.

Tab. 1: Zusammenfassung der einzelnen Komponenten der Beregnungsdatenbank, die weiter im Projekt untersucht wurde (SEIBERT et al. 2011).

Komponente	Gesamtanzahl
Abflussmessungen	21174
Experimente	728
Sequenzen	369
Plots/Böden	219

Das Modell von SCHRÖDER & AUERSWALD (2000) begründet sich auf einer modifizierten Formel nach dem Ansatz von HORTON (1939) zur Infiltration, bei dem nach MORIN & BENYAMINI (1977) die kumulierte kinetische Energie physikalisch gesehen die verschlämmungsgesteuerte Infiltration bestimmt.

Die potentielle Infiltrationsrate $i_{pot}(t)$ ergibt sich dann zu:

$$i_{pot}(t) = (i_0 - i_\infty) \cdot e^{-C_V \cdot E_{kin}(t)} + i_\infty \quad (1)$$

mit $i_{pot}(t)$ potentielle Infiltrationsrate [mm/h]
i_0 Anfangsinfiltrationsrate [mm/h]
i_∞ Endinfiltrationsrate [mm/h]
C_v Verschlämmungsneigung des Bodens [m²/J]
$E_{kin}(t)$ kumulative Niederschlagsenergie an der Bodenoberfläche zur Zeit t [J/m²]

Unter Einbeziehung der Bedeckung des Bodens durch Vegetation, Mulch, Steine u.ä. kann die kumulative Niederschlagsenergie bis zum Zeitpunkt t bestimmt werden als:

$$E_{kin}(t) = \int_{t_0}^{t} e_N(s) \cdot (1 - BBG(s))\, ds \quad (2)$$

mit $e_N(s)$ Energiedichte des Niederschlages zum Zeitpunkt s [J/(m2)]
$BBG(s)$ Bodenbedeckungsgrad zum Zeitpunkt s
t_0 Beginn des Niederschlagsereignisses

Für die beobachteten Beregnungsversuche wurden die spezifischen Energiedichten der Beregnungsanlagen von 12 – 20 J/(m2·mm) verwendet, bei natürlichen Regenereignissen wird die Energiedichte der Regentropfen nach der Beziehung von WISCHMEIER & SMITH (1958) bestimmt, die nach SCHWERTMANN et al. (1987) auch in Deutschland eingesetzt wird.
Nach ELA et al. (1992) sind Makroporen während eines Starkregenereignisses mit verschlämmender Wirkung kaum wirksam. Die Makroporen bleiben zwar in der Tiefe vorhanden, jedoch werden sie durch Teilprozesse der Verschlämmung derart gestört, dass sie am Infiltrationsprozess kaum einen Einfluss haben. Zu ähnlichen Ergebnissen kam ROTH (1992) in seinen Experimenten, der nur bei Regenwurmgängen von > 5 mm Durchmesser einen Einluss auf die Abflussminderung nachweist. Bei kleineren Durchmessern verschlämmen diese Makroporen.

3. Auswertung der Beregnungsdatenbank

Die Datenbank zeigt eine insgesamt sehr heterogene Zusammensetzung von verschiedenen Bodenkenngrößen. Die Körnungsfraktionen Sand, Schluff, Ton sind nach den geschätzten Dichtefunktionen der Datenbank gut repräsentiert (Abbildung 1). Versuche auf denselben Plots wurden zu Sequenzen (Trocken-, Feucht-, Nassläufe) zusammengefasst.
Die Bodenbedeckungsgrade der einzelnen Experimente liegen zwischen 0,4 und 95%, jedoch liegt das 90%-Quantil bei 20%. ROTH (1992) beobachtet im Bereich von 15-30% Bodenbedeckung eine überproportionale Abnahme an Oberflächenabfluss. Ein weiterer Parameter, der zur Parametrisierung von Bearbeitungsform und Oberflächenbeschaffenheit in die Datenbank mitaufgenommen wurde, ist TsT („Time since Tillage“). TsT bezeichnet die Tage seit der letzten Bodenbearbeitung, um Prozesse wie die Verdichtung des Bodens nach vor-

hergehender Bodenöffnung sowie die Verringerung des nutzbaren Porenraums als integrative Größe der obersten Bodenschicht zum Zeitpunkt der Beregnung zu repräsentieren. Der Zusammenhang zwischen TsT und der Trockenrohdichte des Bodens ist deutlich (r = 0,72).
Dass die Anfangsbodenfeuchte bei starken Regenereignissen einen deutlichen Einfluss auf die Verschlämmungsneigung von Böden hat, haben mehrere Untersuchungen gezeigt (ROTH 1992, GERLINGER 1997). Dennoch wurden nicht in allen Versuchsreihen die Anfangsverhältnisse der Wassergehalte aufgenommen.

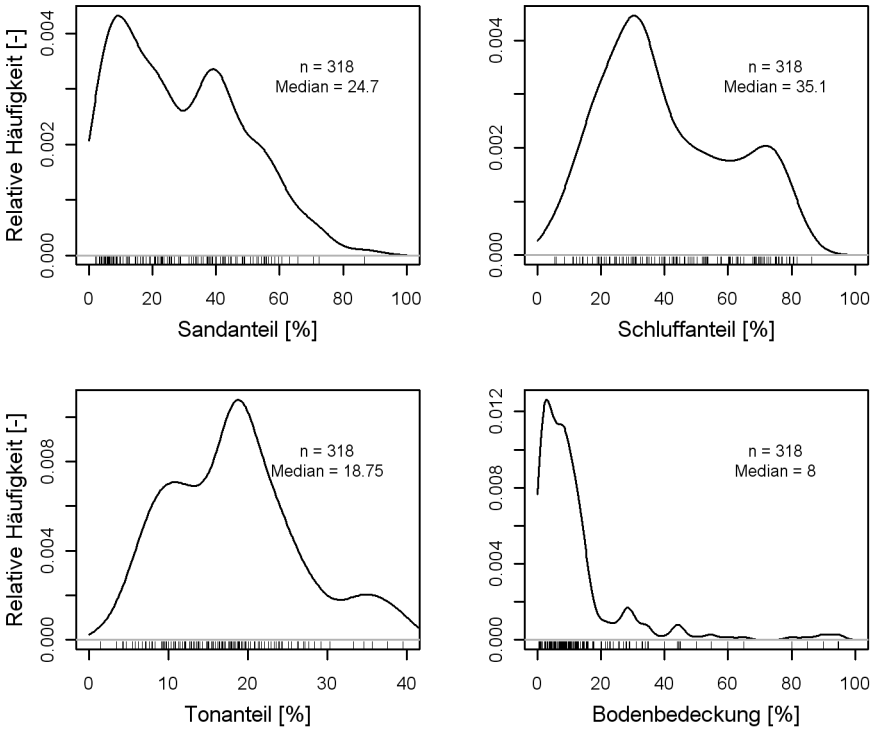


Abb. 1: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Korngrößen und des Bedeckungsgrades aus der Beregnungsdatenbank

Die Parameter der Gleichung des Verschlämmungsmodells H-KIN wurden mithilfe des Simulated-Annealing-Algorithmus geschätzt. Ausreißer wurden mittels der Methode nach Turkey bestimmt und aus den beobachteten Sequenzen entfernt. Die Box-Plots in Abbildung 2 zeigen die hohe Varianz vor allem bei der Anfangsinfiltrationsrate und der Verschlämmungsneigung, die wesentlich die numerische Form der Funktion beschreiben. Die potentielle Anfangsinfiltrationsrate nach Horton ist eine experimentell kaum nachweisbare Größe. Damit ist die Bestimmung und Optimierung schwierig zu realisieren.
Anhand von Varianzanalysen und durch die Anwendung von linearisierten Regressionsmodellen wurden Funktionen für die Horton-Parameter aus Gleichung 1 entwickelt, die den Infiltrationsverlauf aus Boden- und Bewirtschaftungseigenschaften abschätzen. Den größten Einfluss auf die Güte des Modells haben dabei der Sandgehalt, der geometrische Korngrößendurchmesser als integrative Größe der Korngrößenverteilung und die Tage seit Bodenbearbeitung.

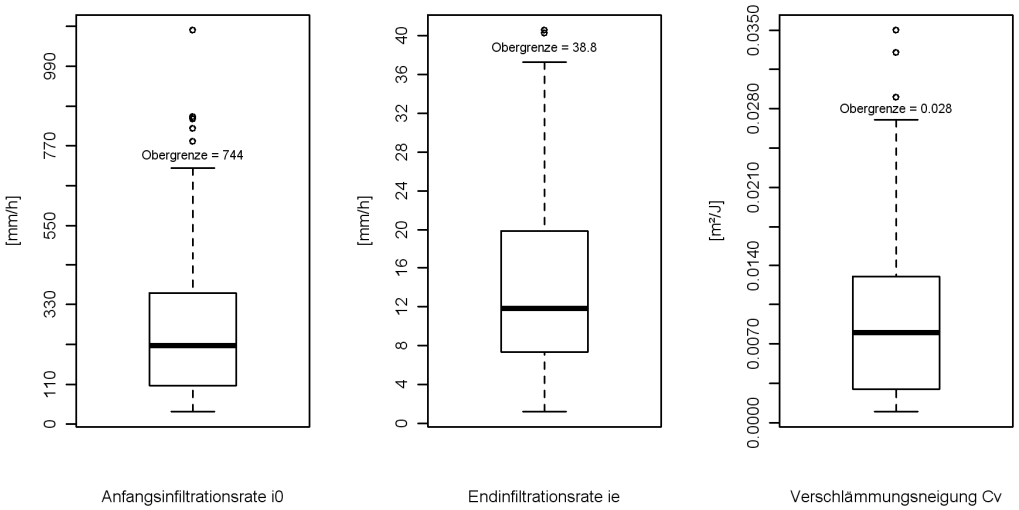


Abb. 2: Box-Plots der anhand der Beregnungssequenzen angepassten Variablen der modifizierten Horton-Gleichung mit Ausreißern

4. Modellerweiterung WaSiM-ETH

Der Ansatz von H-KIN und die Schätzung der Parameter aus Gleichung 1 wurde in das hydrologische Modellsystem WaSiM-ETH (SCHULLA & JASPER 2007) implementiert, um Abflussbildungsprozesse in der Mikroskale prozessorientiert simulieren zu können. Durch das Verschlämmungsmodul kann auf landwirtschaftlich genutzten Flächen der auftreffende Niederschlag aufgeteilt werden, indem der verschlämmungsbedingte Oberflächenabfluss abgetrennt wird und nicht in die ungesättigte Zone infiltriert. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Teilkomponenten des Abflussbildungsprozesses in der Modellerweiterung. Oberflächenabfluss kann demnach sowohl aus dem Verschlämmungsprozess als auch durch Sättigung der obersten Bodenschichten gebildet werden.

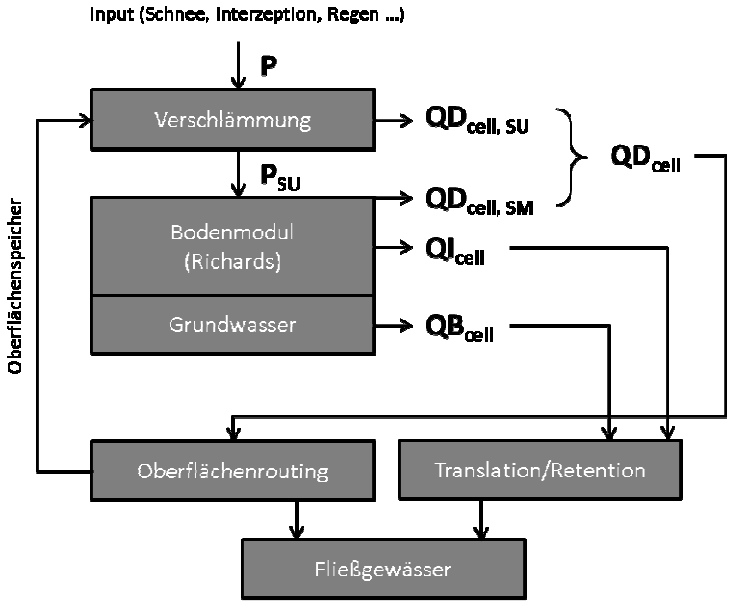


Abb. 3: Flussdiagramm der Abflusskomponenten und der Teilmodule der Modellerweiterung in WaSiM-ETH

In der ersten Anwendung der Modellerweiterung werden einzelne Beregnungsversuche der Datenbank in WaSiM-ETH (Version 8.09.05) simuliert.

5. Anwendung im Weiherbachgebiet

Das Einzugsgebiet des Weiherbachs (Kraichgau, Baden-Württemberg) war intensives Untersuchungsobjekt innerhalb des BMFT-Verbundprojekts: Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet (1989-1997), dessen Ergebnisse in PLATE & ZEHE (2008) umfangreich beschrieben werden.

Lössböden stellen aufgrund ihrer Korngrößenzusammensetzung und intensiven landwirtschaftlichen Nutzung besonders erosionsgefährdete Standorte dar. Aus der Arbeit von GERLINGER (1997) zeigt sich, dass die Erosionsneigung der lösshaltigen Böden im Einzugsgebiet des Weiherbachs vor allem von den Bodenparametern Tongehalt, organische Substanz sowie Wassergehalt abhängen. Die landwirtschaftlichen Flächen im Weiherbacheinzugsgebiet sind von konventioneller Bodenbearbeitung geprägt.

Die Beregnungsversuche des Teildatensatzes Weiherbach (GERLINGER 1997) wurden als Standortmodell in WaSiM-ETH simuliert (n=24). Die Zellengröße im Modell wurde der Fläche der Beregnungsplots angepasst, die Vorfeuchte wurde auf dem Standort für den dem Experiment vorangegangenen Zeitraum mit den meteorologischen Eingangsdaten der Klimadatenbank des Weiherbachprojektes berechnet. Die Bodenfeuchte wurde durch Entnahme von Stechzylindern (100 cm3) vor den Beregnungsversuchen aus einer Tiefe zwischen 5- 10 cm gravimetrisch bestimmt (Gerlinger 1997). Die Simulationsergebnisse der Bodenfeuchte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten (r^2 = 0,91).

Tab. 2: Parametrisierung der Bodenschichten (Mittelwerte und Standardabweichung) nach Schäfer (1999) für die Simulation der Beregnungsversuche mit Kalibrierung der van-Genuchten-Parameter und die Anzahl der Simulationen, bei denen die Kalibrierung an die Parametergrenzen stößt (min / max)

Löss-Kolluvium					Anzahl: 12					
Horizont Ap	Mittelw.	Stabw.	min	max	min	/	max	min%	/	max%
θ_{sat}	0,441	0,031	0,410	0,472	8	/	0	67	/	0
θ_{res}	0,055	0,035	0,020	0,090	7	/	1	58	/	8
α [1/m]	2,030	1,180	0,850	3,210	0	/	2	0	/	17
n	1,170	0,065	1,105	1,235	0	/	10	0	/	83
k_{sat} [m/s]	1,10E-06	8,58E-06	5,00E-08	9,68E-06	0	/	0	0	/	0

Pararendzina					Anzahl: 12					
Horizont Ap	Mittelw.	Stabw.	min	max	min	/	max	min%	/	max%
θ_{sat}	0,440	0,029	0,411	0,469	10	/	1	83	/	8
θ_{res}	0,049	0,033	0,016	0,082	6	/	2	50	/	17
α [1/m]	1,620	1,050	0,570	2,670	0	/	1	0	/	8
n	1,296	0,110	1,186	1,406	1	/	7	8	/	58
k_{sat} [m/s]	1,11E-06	1,11E-05	5,00E-08	1,22E-05	3	/	0	25	/	0

Da Abflussbildungsprozesse während simulierten Starkregenereignissen nur in den obersten Bodenschichten (< 30 cm) hydraulisch wirksam werden, wurde für die Simulation der Beregnungsversuche ein homogenes Bodenprofil mit durchgängigem Ap-Horizont angenommen. Die hydraulischen Bodenkennwerte nach Mualem-van-Genuchten (VAN GENUCHTEN 1980) wurden für die im Weiherbachgebiet vorkommenden Bodentypen bei SCHÄFER (1999) experimentell bestimmt. Zunächst wurde versucht, ohne die Modellerweiterung die Beregnungsversuche in Minutenzeitschritten zu simulieren. Dazu wurden die bodenhydraulischen Parameter innerhalb ihrer Unsicherheitsgrenzen an die Messwerte des Oberflächenabflusses angepasst. Zur Parameter-Optimierung wurde das globale Verfahren des Shuffled Complex Evolution Algorithmus (SCE-UA) verwendet (DUAN 2003). Der SCE-Algorithmus wurde mit WaSiM-ETH gekoppelt und kann anhand verschiedener Gütemaße das globale Optimum der zu kalibrierenden Parameter bestimmen.
Bei der Optimierung der Bodeneigenschaften unter den Randbedingungen der Beregnungsversuche lässt sich beobachten, dass selbst die gemessene Ergebnisse nicht simuliert werden können, da die Parameter der ungesättigten Bodenzone fast in der gesamten Stichprobe an ihre Grenzen streben (siehe Tabelle 2). In 75% der Simulationen wird der untere Grenzwert des gesättigten Wassergehaltes erreicht, dennoch erreichen die Simulationsergebnisse nicht die beobachteten Abflussbeiwerte. In 87,5% der Simulationen wird das Abflussvolumen unterschätzt.

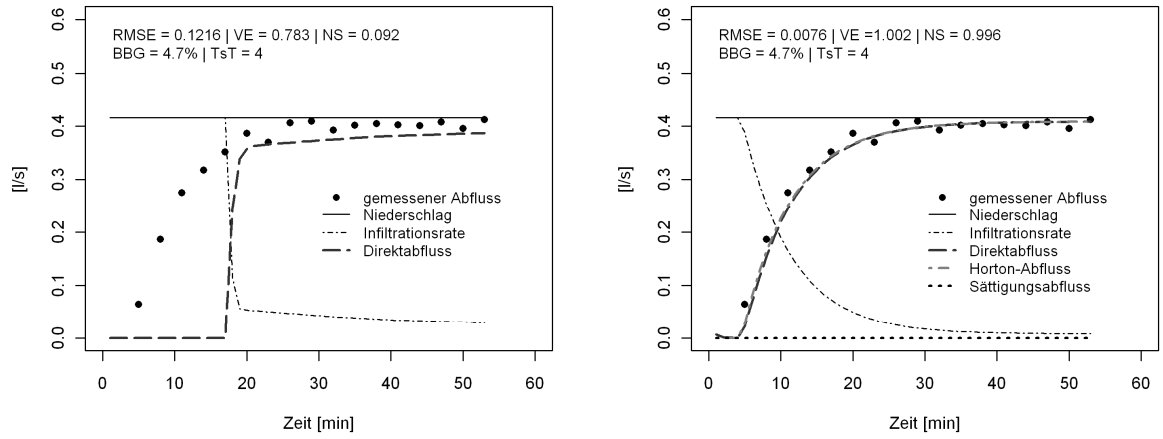


Abb. 4: Beispielhafte Modellierungsergebnisse eines Beregnungsversuches ohne (links) und mit (rechts) Modellerweiterung Verschlämmungsmodul; RMSE: Standardabweichung, VE: Volumenfehler, NS: Nash-Sutcliffe-Index, BBG: Bodenbedeckungsgrad, TsT: Zeit seit Bodenbearbeitung [d]

Bei der Simulation derselben Versuche mit der Modellerweiterung des Verschlämmungsmoduls wurden die hydraulischen Bodenkennwerte der Bodentypen als physikalische Größen im Modell mithilfe parametrisiert und nur die Koeffizienten der Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Horton-Parameter kalibriert. Dadurch können die Beregnungsexperimente weitaus besser dargestellt werden. In fast 2/3 aller Simulation verbessern sich die Gütewerte von RMSE, VE und NS. Ebenso verbessern sich die Variationskoeffizienten der Stichproben erheblich. Vor allem Versuche auf kürzlich bearbeiteten Böden mit nur geringer Bodenbede-

ckung werden durch die Abhängigkeit der Infiltration von der kinetischen Energie bei einem Teil der Simulationen besser dargestellt (Abbildung 4).

Tab. 3: Deskriptive Analyse der Gütemaße der Simulationen ohne und mit Erweiterung von WaSiM-ETH mit dem Verschlämmungsmodul; RMSE: Standardabweichung, VE: Volumenfehler, NS: Nash-Sutcliffe-Index

	ohne Modellerweiterung			mit Modellerweiterung		
	RMSE	VE	NS	RMSE	VE	NS
Mittelwert	0,042	0,869	0,277	0,021	1,044	0,864
Minimum	0,015	0,400	-2,686	0,005	0,749	0,310
Maximum	0,130	1,049	0,987	0,050	1,276	0,996
Spannweite	0,115	0,649	3,673	0,046	0,527	0,686
Variationskoeffizient	0,839	0,207	3,703	0,558	0,110	0,196

6. Diskussion und Ausblick

Es zeigt sich, dass gerade auf landwirtschaftlich genutzten Flächen eine Prozessbeschreibung der Oberflächenverschlämmung nötig ist, um das Verhalten verschiedener Bodenarten und Kulturpflanzen im Laufe eines Anbauzyklus unter Starkregenbedingungen zu simulieren. Allerdings zeigen bestehende Ansätze in prozessorientierten Modellsystemen Schwächen bei der Simulation des Prozesses. Durch die Beschreibung der Infiltration und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone mit Hilfe der Richards-Gleichung kann der Verschlämmungsprozess nur unzureichend beschrieben werden. Ein plausibel gewählter Parameterraum der Van-Genuchten-Parameter für die Bodenschichten reicht nicht aus, die Abflussbildung bei starken Niederschlägen auf der Mikroskale ausreichend darzustellen. Die Messergebnisse der Versuche konnten mit den bisherigen Modellansätzen nicht zufriedenstellend nachgebildet werden. Durch die Parametrisierung der Verschlämmung durch die Abhängigkeit von der auftreffenden kinetischen Energie der Regentropfen sowie der Infiltrationsparameter nach Boden- und Bearbeitungseigenschaften können die Beregnungsversuche im Einzugsgebiet des Weiherbaches zum größten Teil exakter simuliert werden.

In einer weiteren Modellerweiterung von WaSiM-ETH soll der durch den Verschlämmungsprozess gebildete Abfluss zum Oberflächenabfluss der Zelle addiert werden, der wiederum durch ein rauhigkeitsabhängiges Oberflächenabflussrouting bis zum Fließgewässer transportiert wird. Die Niederschlagsdynamik kann dadurch ebenso abgebildet werden wie eine Runon-Runoff-Infiltration, da der Oberflächenabfluss von Zelle zu Zelle weitergegeben wird. Dadurch soll die räumliche Variabilität der Bearbeitung und der Bodeneigenschaften berücksichtigt werden.

Literatur

AHUJA, L.R. & D. SWARTZENDRUBER (1992): Flow Through Crusted Soils: Analytical and numerical approaches. In: M.E. Sumner (Editor): Soil crusting. Chemical and physical process. Lewis, Boca Raton, pp. 93–122.

DUAN, Q. (2003): Calibration of watershed models. American Geophysical Union, Washington, DC.

DULEY, F. L. (1939): Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. Soil Science Society of America Proceedings 4, 60–64.

ELA, S. D., S. C. GUPTA & W. J. RAWLS (1992): Macropore and Surface Seal Iinteractions affecting Water Iinfiltration into Soil. Soil Science Society of America Journal 56 (3), 714–721.

GERLINGER, K. (1997): Erosionsprozesse auf Lößböden. Experimente und Modellierung. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1996. Inst. für Wasserbau u. Kulturtechnik, Karlsruhe.

HAIDER, J. (1994): Herbizide in Oberflächenabfluß und Bodenabtrag. Feldversuche mit simulierten Regen. Dissertation, TU München.

HORTON, R. E. (1939): Analysis of runoff plat experiments with varying infiltration capacity. Transactions of the American Geophysical Union 20, 693–694.

KOEHLER, G. (2007): Dezentraler Hochwasserschutz - Einführung und Grundlagen. In: K. Röttcher, G. Koehler, H.B. Kleeberg (Editors), Dezentraler Hochwasserschutz. Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und; Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall, Hennef, pp. 5–17.

MARTIN, W. (1988): Die Erodierbarkeit von Böden unter simulierten und natürlichen Regen und ihre Abhängigkeit von Bodeneigenschaften. Dissertation, Technische Universität, München.

MICHAEL, A.: Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D. Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Dissertation, Technische Universität Bergakademie, Freiberg.

MORIN, J. & Y. BENYAMINI (1977): Rainfall infiltration into bare soils. Water Resources Research 13, 813–817.

PLATE, E. & E. ZEHE (2008): Hydrologie und Stoffdynamik kleiner Einzugsgebiete. Prozesse und Modelle; mit 90 Tabellen. Schweizerbart, Stuttgart.

ROTH, C. H. (1992): Die Bedeutung der Oberflächenverschlämmung für die Auslösung von Abfluss und Abtrag. Zugl. Habil.schrift, Techn. Univ. Berlin, 1992. Fachgebiete Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Institut für Oekologie, Technische Universität, Berlin.

SCHÄFER, D. (1999): Bodenhydraulische Eigenschaften eines Kleineinzugsgebietes. Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Verfahren. Diss., Univ. Karlsruhe, 1999. Institut für Hydromechanik, Karlsruhe.

SCHMIDT, W., B. ZIMMERLING, O. NITZSCHE & S. ZACHARIAS (2007): Möglichkeiten der Hochwasserminderung in der Landwirtschaft. In: K. Röttcher, G. Koehler, H.B. Kleeberg (Editors), Dezentraler Hochwasserschutz. Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und; Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall, Hennef.

SCHRÖDER, R. & K. AUERSWALD (2000): Modellierung des Jahresgangs der verschlämmungsinduzierten Abflussbildung in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 41, 167–172.

SCHRÖDER, R. (2000): Modellierung von Verschlämmung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Asgard-Verlag, Sankt Augustin.

SCHULLA, J. & C. JASPER (2007): WaSiM-ETH Model Descritption. Water Balance Simulation Model ETH.

SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart.

SEIBERT, S., K. AUERSWALD & M. DISSE (2011): Data base of rainfall simulation experiments for infiltration, runoff and erosion research. Lehrstuhl für Grünlandlehre, Technische Universität München. http://www.wzw.tum.de/gruenland/people/Au_d-Dateien/au_publ.htm

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci Soc Am J 44 (5), 892–898.

Ganzheitlicher kommunaler Hochwasserschutz und Hochwasserkompetenz für alle - Hochwasserschutzkonzept und HochwasserKompetenzCentrum in Köln

Reinhard Vogt

Zusammenfassung

Nachdem der Kölner Rat vor 15 Jahren das Hochwasserschutzkonzept einstimmig(!) beschloss, wurde in Köln Pionierarbeit im Gesamtspektrum des Hochwasserschutzes geleistet. Im Bereich des vorsorgenden Hochwasserschutzes wurde in Köln mit dem Bau von etwa 10 km mobilen Schutzwänden, mit der Einrichtung einer Hochwasserschutzzentrale und der Herausgabe neuartiger Hochwassergefahrenkarten, Meilensteine im ganzheitlichen Hochwasserschutz gesetzt. Ein Programm zur Sensibilisierung der Bevölkerung entstand, das als Expo 2000 Projekt anerkannt und als europäisches „best practice" Projekt ausgezeichnet wurde. Mit der Gründung des HochwasserKompetenzCentrums in Köln (HKC), wurde jetzt das I-Tüpfelchen auf beispielhafte Hochwasserschutzarbeit gesetzt. Das internationale Netzwerk wird über alle fachlichen und kommunalen Grenzen hinaus für alle Betroffenen und Akteure im Hochwasserschutz, Theorie und Praxis, unterschiedlichste und umfangreiche „winwin"- Ergebnisse bringen.

1. Hochwasserschutzkonzept Köln

Trotz großer Betroffenheit durch Häufung von mittleren Hochwasserereignissen war in Köln das Problembewusstsein bis Ende der 80er Jahre unterentwickelt und die Hochwasserereignisse wurden nach dem Motto „Et kütt wie et kütt" hingenommen. Es fehlte an dem Prinzip der Nachhaltigkeit, um zukünftig, unter dem Einsatz vereinter Kräfte aus Politik, Verwaltung und Bevölkerung, Hochwasserereignisse und Hochwasserschäden zu verringern und zu vermeiden. Dies änderte sich schlagartig nach den beiden Jahrhunderthochwassern im Dezember 1993 und im Januar 1995, die den Kölnern zeigten, wie kurz Jahrhunderte in Sachen Hochwasser sein können (Abbildung 1). Damals ist Köln nur knapp an einer absoluten Hochwasserkatastrophe mit über hunderttausenden von Betroffenen, überschwemmten Krankenhausbetten, vollgelaufenen U-Bahnschächte und riesigen Umweltkatastrophen vorbeischrammt. Die Ford-Autowerke, die Messe, der Zoo, große Chemiebetriebe und sogar die Einsatzzentralen von Feuerwehr und Polizei wären bei wenigen Zentimetern höherem Wasserstand betroffen gewesen. Die eben überstandene Gefahr hatte denn doch aufgeschreckt und innerhalb von wenigen Monaten entstand das Hochwasserschutzkonzept Köln, dass vor Beschlussfassung im Rat am 1. Februar 1996 in unzähligen Veranstaltungen präsentiert, diskutiert und optimiert wurde. In diesen von Verwaltung, Politik, Bürgerinitiativen und -vereinen gemeinsam getragenen Hochwasserschutzkonzept wird beschrieben wie der anscheinende Gegensatz eines vorsorgenden, ökologisch ausgerichteten Hochwasserschutz mit dem Ausbau technischer Hochwasserschutzanlagen zum verbesserten Schutz der Kölner Bevölkerung geleistet werden kann.

Nach der Beschreibung der Ursachen der Rheinhochwasser werden die Grundgedanken des vorsorgenden Hochwasserschutzes wie Flächenfeihaltung, natürliche Wasserrückhaltung, Verminderung des Schadenspotentials, Bewusstmachung der verbleibenden Hochwasserge-

fahr mit den Hauptaspekten der Hochwasserabwehr, des baulichen Hochwasserschutzes, des Hochwassermanagements und der kompetenten Eigenvorsorge verknüpft.
Die ständige Sensibilisierung der Bevölkerung, die deutliche Verringerung der Schadenspotentiale und die Berücksichtigung der Interessen der anderen Rheinanlieger sind wichtigste Bestandteile der Gesamtkonzeption, die unter dem Gesamtmotto steht: Global denken, überregional initiieren, kommunal handeln.

Abb. 1: Bei den Jahrhunderthochwässern Mitte der 1990er Jahre entging Köln nur knapp teuren Umweltschäden

2. Vorsorgender regionaler Hochwasserschutz

Trotz geringer Freiflächen in Köln befinden sich zwei Hochwasserrückhalteräume derzeit in der Umsetzung. Der gesteuerte Rückhalteraum im Kölner Süden (Rückhaltevolumen 4,5 Mio. m³) wird derzeit gebaut und der Rückhalteraum im Kölner Norden (Rückhaltevolumen ca. 29,2 Mio. m³) ist zurzeit im Genehmigungsverfahren. Nicht nur die Rückhalteräume werden von den meisten Bürgern, Politikern und Medien in Köln unterstützt, sondern auch die Rückverlegung von Deichlinien, die Freihaltung und Reaktivierung von Überschwemmungsflächen, die Entsiegelung und Versickerung von Niederschlagswasser, die Überprüfung von Bebauungsplänen auf ihre Hochwasserkompatibilität und die umfangreiche Berücksichtigung des Hochwasserschutzes im Städtebau sowie in der Regionalplanung. Der Gebietsentwicklungsplan, in dem das 500 jährliche Hochwasser ausgewiesen ist, die Projekte Rheinboulevard, die Musterauenlandschaft Flittarder und Westhovener Aue und Wohnen am Strom sowie entfallene bzw. geänderte Bebauungspläne sind hervorragende Beispiele der Hochwasservorsorge in der regionalen Bauleit- und Objektplanung.

Abb. 2: Hochwasserschutzkonzept

Abb. 3: Retentionsraum Westhovener Aue

Abb. 4: Baulicher Hochwasserschutz – mobile Wände

3. Baulicher Hochwasserschutz

Für den oberirdischen Hochwasserschutz (Deiche, Mauern und mobile Wände) und der Sicherung des Kanalnetzes mit Schiebern, Pumpwerken und modernisierte Kläranlagen werden bis Ende diesen Jahres 400 Millionen Euro in Köln investiert. Dieser hohen Investitionssumme steht aber bei einem 200 jährlichen Hochwasser ein verhinderter Schaden von Milliarden Euro gegenüber. Die volkswirtschaftlichen Folgeschäden wie z.B. Produktionsausfällen, Standortverlegung, etc. in mindestens doppelter Höhe sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Aus meist städtebaulichen Gründen und der Berücksichtigung von Sicht und Wegeverbindungen werden 10 km mobile Wände erstellt, die im Hochwassereinsatz und -vorbereitung eine große Logistik erfordern.

4. Eigenvorsorge, Gefahren- und Risikobewusstsein

Die potentiell Betroffenen müssen intensiv mit der Gefährdung durch Hochwasser oder Grundwasser vertraut gemacht werden, damit sie entsprechende Eigenvorsorge betreiben.
Grundlage für optimale Bau- und Verhaltungsvorsorge ist genaues Wissen über Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten, Wasserdruck etc. bei verschiedenen Wasserständen. In vielen Informationsveranstaltungen mit Baufachleuten wurden die Hochwassergefahrenkarten in Köln vorgestellt und Vorsorgemaßnahmen, wie die Höherlegung von Stromverteilerkästen, Sicherungsmöglichkeiten für Öltanks u.a. sowie das Hochwassermerkblatt mit Verhaltenstipps erläutert.
Auf den Internetseiten der Hochwasserschutzzentrale Köln (www.hochwasserinfo-koeln.de) kann sich jeder Kölner über die Adresseingabemaske oder durch Mausklick parzellengenau die Hochwassergefährdung seines Grundstückes anschauen und sich über die unterschiedlichen Vorsorgemaßnahmen detailliert informieren. Ein immer aktueller Rheinwasserstand am Kölner Pegel, eine ständig aktualisierte Hochwasservorhersage und viel Wissenswertes zum Hochwasserschutz komplettieren die Internetseite.

5. Hochwassermanagement vor Sensibilisierung

Eine Hochwasserdauerausstellung, ein Hochwasserfilm (u.a. in Sendung mit der Maus) ein Hochwasserspazier- und Radweg, Informationsveranstaltungen für Schüler und Erwachsene und verschiedene Events wie Hochwassertage und -messen dienen der ständigen Bewusstseinsbildung für den Hochwasserschutz in Köln. Diese Sensibilisierungsarbeit wurde als Expo 2000 Projekt weltweit bekannt und gilt in Europa als ein „best practice“ Projekt. Für seine Öffentlichkeitsarbeit wurde der Leiter Hochwasserschutzzentrale Köln im Jahr 2006 mit dem Hydrologie Preis der Fachgemeinschaft hydrologische Wissenschaften ausgezeichnet

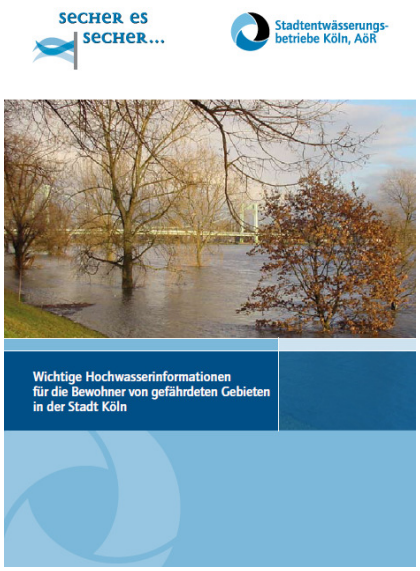


Abb. 5: Hochwassermerkblatt

Abb. 6: Sensibilisierung auf kölsche Art

6. Hochwassermanagement

Die Vielzahl der Hochwasserschutzmaßnahmen bei einer über 60 km langen Hochwasserschutzlinie und 5000 Einzelmaßnahmen vom Kanalschieber bis zum Fährdienst sind im „Hochwasserkochbuch“ mit Verantwortlichkeiten, Lagebezug, Durchführungspegelstand, Zeitbedarf etc. verzeichnet. Im EU-Projekt NOAH ist ein Flutinformations- und Warnsystem (FLIWAS) kurz vor der Fertigstellung, das ein elektronisches „Hochwasserkochbuch“ mit einer Wasserstandsvorhersage koppelt. Das Motto ist: „Die richtige Maßnahme am richtigen Ort zur richtigen Zeit!“

Ein neu entwickeltes Entscheidungs- und Unterstützungssystem mit tausenden hochwassersensiblen Objekten steht zudem den Entscheidern zur Verfügung. Die bereits abmontierten Warnsirenen wurden jetzt neu in den hochwassergefährdeten Beeichen zur schnellen Warnung installiert. Für die etwa 10 km mobilen Wände sind Versagensszenarien erstellt worden. Gefahren- und Sperrzonen werden vor und hinter mobilen Elementen zum Schutze der Bewohner und Anlieger in ordnungsbehördlichen Verordnungen ausgewiesen.

7. HochwasserKompetenzCentrum (HKC e.V.)

Innovativ, informativ, kompetent, …!

Das HKC verbindet seit dem 17.09.2007 in einem internationalen Netzwerk „Theorie und Praxis“ im Hochwasserschutz. Dieser in seiner Art bisher einmalige Verein bezieht sämtliche betroffenen und interessierten Kreise (Bürger, Wissenschaftler, Planer, Unternehmer) ein. Die Entwicklung, Vorhaltung, Bereitstellung und Vermittlung von Fachkompetenz wird gefördert. Schwerpunktaufgaben sind die Informationsweitergabe sowie die Vorbereitung, Entwicklung und Durchführung von Projekten, Forschungsvorhaben und Studien zum nachhaltigen, wirtschaftlichen und praxisgerechten Umgang mit dem Thema Hochwasser. Das HKC trägt dazu bei über den Status Quo hinaus zielgerichtete Entwicklungsimpulse zu geben, um auch vor dem Hintergrund von Risikobewertungen und Zukunftsperspektiven wirtschaftlich sinnvolle und praxisnahe Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Das Netzwerk verbindet Forschungsinstitute, Firmen und Dienstleister, Versicherungen, Bürger, Verbände, Betreiber, Verwaltungen und Ministerien und alle weiteren am Hochwasserschutz Interessierten zu neuen Kooperationen und Partnerschaften, um die Grundlage für einen gegenseitigen Wissenstransfer und eine Kompetenzsteigerung für alle Akteure zu schaffen. In den drei Beiräten „Grundlagen des Hochwasserschutzes“, „Hochwassermanagement“ und „Risikomanagement und Strategien“ werden Projekte, Kooperationen und Zusammenwirken im Gesamtspektrum des Hochwasserschutzes initiiert. Das Besondere ist hier das tatsächliche Zusammenwirken der unterschiedlichsten Ebenen aus Theorie und Praxis. Bürger, Firmenvertreter, Verwaltungsangehörige aus Kommunen und übergeordneten Behörden, Ingenieurbüros, Finanzfachleute, etc. kennen hier keine Berührungsängste. Hier heißt es: Alle in einem Boot und gemeinsam in die richtige Richtung rudern – für einen besseren Hochwasserschutz!

8. Fazit

Dass die Aussagen und Aktivitäten des bereits 15 Jahre alten Kölner Hochwasserschutzkonzeptes nicht so falsch sein können, sieht man darin, dass sie sich heute in vielen Bereichen des überregionalen Hochwasserschutzes, im nationalen Hochwasserschutzgesetz und in der europäischen Hochwasserrahmenrichtlinie wiederfinden.

Hochwasserschutz ist vorsorgender Umweltschutz per exellence. Wir müssen lernen mit dem Hochwasser zu leben, denn Hochwasser lassen sich nicht abschaffen - sie werden häufiger!

Differenzierung der Hochwassergeschichte des bayerischen Alpenvorlandes

Oliver Böhm, Karl-Friedrich Wetzel

Zusammenfassung

Die Hochwassergeschichte des bayerischen Alpenvorlandes wurde anhand historischer Quellentexte ab dem 13. Jh. und amtlicher Pegelangaben ab 1826 AD erhoben und in der Datenbank IBT (Inundationes Bavariae Thesaurus) organisiert. Der Untersuchungsraum umfasst die Flüsse Iller, Lech mit Wertach, Isar und Inn mit Salzach. Von Westen nach Osten nimmt der nivale Einfluss auf das Abflussgeschehen zu. Die größte Hochwasserwahrscheinlichkeit tritt im Gegensatz zu weiten Teilen Mitteleuropas während der Sommermonate auf. Eine große Bedeutung für das Entstehen schadensträchtiger Hochwasser kommt meridionalen Störungssystemen zu, die der Zyklonenzugbahn „Vb“ folgen. Die Hochwasserhäufigkeit unterliegt periodischen Schwankungen, die mit Sonnenfleckenzyklen in Verbindung gebracht werden können. Innerhalb des Gebietes werden räumliche Unterschiede im Hochwassergeschehen selbst bei direkt benachbarten Flussgebieten beobachtet. Die Ursachen dafür sind in atmosphärischen Rahmenbedingungen zu suchen, die zu einer unterschiedlichen Niederschlagsverteilung am Alpenrand führen. Mit Hilfe rekonstruierter Bodenluftdruckfelder ab 1500 AD wurden die wichtigsten hochwasserbegleitenden Strömungskonfigurationen untersucht und exemplarisch Unterschiede für einzelne Flusssysteme aufgezeigt.

1. Einleitung

Die großen Flüsse, die durch das bayerische Alpenvorland zur Donau hin entwässern, ähneln sich unter hydrologischen Gesichtspunkten. Sie weisen ein nival geprägtes Abflussregime mit niedrigen Abflüssen im Winter und durch Schneeschmelze erhöhten Abflüssen von April bis einschließlich Juni auf. Auch die Hochwasseraktivität von Iller, Lech mit Wertach, Isar, Inn und Salzach beschränkt sich vor allem auf die Sommermonate (vgl. BÖHM & WETZEL 2006), wie die großen Hochwasser ab 1997 gezeigt haben. Im Rahmen eines DFG-geförderten Projektes wurde eine umfangreiche Datenbasis zu den historischen Hochwasserereignissen für das bayerische Alpenvorland erstellt. Eine räumliche und zeitliche Differenzierung der Hochwasseraktivität für diesen Raum kann daher unter Einbeziehung von historischen Ereignissen der letzten 500 Jahre vorgenommen werden. Der folgende Beitrag fokussiert auf diese Differenzierung und geht folgenden Fragen nach:

- In welcher Jahreszeit treten die Hochwasserereignisse in den einzelnen Flussgebieten auf und welche Unterschiede können beobachtet werden?
- Wie unterscheiden sich die 31-jährigen Hochwasserhäufigkeiten der Einzugsgebiete?
- Welche Ursachen können für die Unterschiede zwischen den einzelnen Flussgebieten gefunden werden und welche Zusammenhänge bestehen hinsichtlich mesoskaliger atmosphärischer Zirkulationsprozesse?

2. Die Datenbasis

Die Hochwassergeschichte des bayerischen Alpenvorlandes wurde aus deskriptiven Quellentexten sowie den Daten der EIP (Early Instrumental Period) und der MIP (Modern Instru-

mental Period) zusammengestellt und in der GIS-gekoppelten Datenbank IBT (Inundationes Bavariae Thesaurus) organisiert. Anhand eines semiquantitativen Index (vgl. STURM et al. 2001) wurden die deskriptiven Daten für statistische Auswertungen in Zahlenwerte überführt. Der dreistufige Index basiert auf Schadensparametern, die die Hochwasserereignisse von leicht über mittel bis schwer klassifizieren. Die Quellenlage ist aufgrund von historisch bedeutsamen Orten (z.B. Kempten, Augsburg, Passau, München) günstig. Ab 1826 existieren für alle Flüsse amtliche Lattenpegeldaten, von denen für jeden Fluss eine Messstelle mit möglichst homogener Datenreihe ausgewählt wurde. Die Instrumentendaten wurden den dreistufigen Schadensklassen der deskriptiven Periode zugeordnet. Ein Überlappungszeitraum von ca. 50 Jahren zwischen den deskriptiven Informationen und der EIP gewährleistet eine weitgehende Homogenität der verschiedenen Datengrundlagen. Darüber hinaus wurde die Datenbank für eine großräumige synoptische Interpretation um historische Hochwasserereignisse Mitteleuropas erweitert. Die Daten dafür stammen hauptsächlich aus den Kompilationen WEIKINNs (1958-1963) und der HISKLID (Historische Klimadatenbank Deutschland, vgl. GLASER 2008).

3. Ergebnisse

Die jahreszeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse

Innerhalb des Untersuchungsraumes lässt sich ein West-Ost Gradient erkennen, der vom alpinen Anteil und der Lage der einzelnen Flussgebiete hinsichtlich der wetterwirksamen Strömungsverhältnisse geprägt ist. Dieser Einfluss spiegelt sich in einer zeitlichen Verschiebung der Abflussmaxima und der Bedeutung der Schneeretention wider. Iller und Wertach besitzen nur geringe alpine Anteile und haben ihr Abflussmaximum bereits im Mai bzw. April. Lech und Salzach haben das jährliche Maximum im Juni, am Inn tritt das Maximum im Juni und Juli auf. Die jeweiligen Anteile an alpinen Lagen drücken sich auch in den Regimeganglinien der Flüsse aus. In Tabelle 1 sind die Anteile der Jahreszeiten an den Hochwasserereignissen der über 500-jährigen Datenreihe nach Einzugsgebieten differenziert zusammengestellt.

Tab. 1: Jahreszeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse in den einzelnen Flussgebieten in Prozent.

	Iller	Wertach	Lech	Isar	Inn	Salzach
Sommer	42%	39%	57%	58%	79%	73%
Frühling	16%	20%	14%	14%	10%	6%
Winter	28%	23%	12%	12%	2%	7%
Herbst	14%	18%	17%	16%	9%	14%

Sommerhochwasser sind im bayerischen Alpenvorland an Iller und Wertach am seltensten, sodass die Anteile der anderen Jahreszeiten an Bedeutung gewinnen. Der hohe Anteil an Winterhochwasser ist einerseits dem relativ geringen Alpenanteil und andererseits der räumlichen Lage im Westen des Alpenvorlandes geschuldet. Nach der naturräumlichen Gliederung (MEYNEN 1961) befinden sich die Einzugsgebiete von Iller und Lech in einem Grenzbereich zwischen zu- bzw. abnehmender Maritimität / Kontinentalität, was sich auch im Nie-

derschlagsregime zeigt (vgl. BECK 2000). Eine stärkere alpine Prägung erklärt den knapp 60%-igen Anteil der Sommerhochwasser am Hochwassergeschehen an Lech und Isar (vgl. Tabelle 1). Inn und Salzach haben hohe alpine Gebietsanteile, wodurch sich vor allem die geringe Anzahl von Winterereignissen erklärt. Mit zunehmendem Flächenanteil des alpinen Raumes am Inngebiet dominieren die Sommerhochwasser das Hochwassergeschehen mit fast 80%.

Die Hochwasserhäufigkeit der Flüsse

In Abbildung 1 ist die 31-jährige gleitende Hochwasserhäufigkeit für das bayerische Alpenvorland zusammen mit der Anzahl der jährlichen Hochwasserfälle (rote Säulen) dargestellt. Mit dem Ende des Mittelalters und dem Beginn der Renaissance um 1500 nehmen die historischen Quellen deutlich zu. Die Kurve der gleitenden 31-jährigen Häufigkeit zeigt einige markante Abschnitte, wie den Übergang vom mittelalterlichem Klimaoptimum zur frühneuzeitlichen Temperaturdepression, der sog. kleinen Eiszeit (vgl. z.B. WANNER et al. 2000). Mit dem Ende der kleinen Eiszeit um 1850 beginnt die Klimaphase der Moderne mit bis heute andauerndem Temperaturanstieg (vgl. GLASER 2008). Für die ganze Kurve lassen sich Phasen erhöhter und verminderter Hochwasseraktivität erkennen. Insgesamt treten sieben hochwasserreiche Phasen auf, die in Zeitabständen von 60 bis 80 Jahren wiederkehren. Eine besonders hochwasserarme Phase findet um 1700 AD statt. Dieser Zeitabschnitt, das Maunder Minimum (1645-1715), ist der kälteste Abschnitt der kleinen Eiszeit und fällt in eine Periode stark verminderter Sonnenfleckenrelativzahl (vgl. z. B. Schönwiese 2008). Um 1800 AD folgt mit dem Daltonminimum ein weiteres Sonnenfleckenminimum, das ebenfalls mit einem Rückgang der Hochwasseraktivität einhergeht. Um 1850 AD ist ein ungewöhnlicher Anstieg der Hochwasseraktivität zu beobachten, der durch verschiedene Ursachen zu erklären ist. Neben der stark verbesserten Datengrundlage (EIP ab 1826) beginnen erste systematische bauliche Eingriffe in die Flusssysteme. Diese anthropogenen Einflussfaktoren dürfen bei der Analyse der Hochwassergenese nicht außer Acht gelassen werden, dominieren jedoch die Entwicklung der Hochwasserfrequenz nicht, wie ein Vergleich der Hochwasserhäufigkeiten nach historischen Printmedien und frühen Instrumentendaten ergab. Der extreme Anstieg muss im Rahmen natürlicher Klimavariabilität in der Übergangsphase zwischen der kleinen Eiszeit und der Klimaphase der Moderne gesehen werden. Die ausgeprägte Häufung von Hochwasserereignissen in diesem Zeitraum ist für weitere Teilräume Mitteleuropas belegt (vgl. PFISTER 1999, GLASER 2008).

Innerhalb des Untersuchungsgebietes kommt es zu deutlichen Unterschieden zwischen den gleitenden Hochwasserhäufigkeiten der einzelnen Einzugsgebiete, wie die Korrelationen in Tabelle 2 zeigen.

Die höchste Korrelation besteht zwischen den Hochwasserhäufigkeiten von Iller und Inn, die geringste zwischen Lech und Isar. Auf den ersten Blick ist dieser Zusammenhang kaum zu erklären, denn während am Inn Sommerhochwasser mit ca. 80% Anteil dominieren, liegt dieser Anteil an der Iller bei etwa 40%. Als Erklärung können vielmehr Jahre mit positiver Niederschlagsanomalie herangezogen werden. Solche Jahre bewirken auch hohe Schneemengen, die im Gebiet der Iller u. U. zu anderen Zeitpunkten zu Hochwasser führen, als das aufgrund der ausgeprägten Schneeretention im Inngebiet der Fall ist.

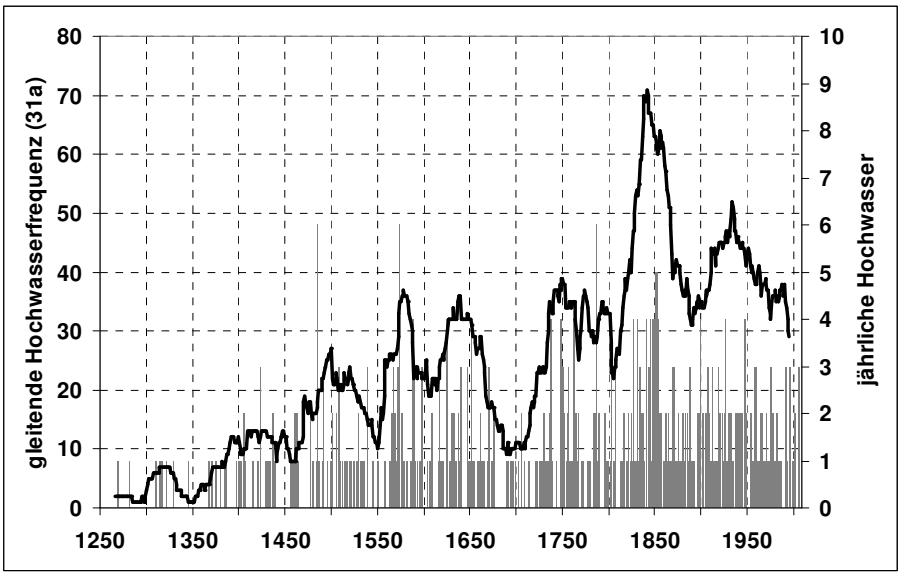


Abb. 1: Zeitreihe der 31-jährigen gleitenden Hochwasserhäufigkeit (in blau) und die Anzahl der jährlichen Hochwasserereignisse (rote Säulen) für das bayerisches Alpenvorland zwischen 1280 und 1995 (nach eigenen Daten)

Tab. 2: Korrelationsmatrix (Pearson) der Hochwasserhäufigkeiten der Flussgebiete des bayerischen Alpenvorlandes. Hervorgehobene und mit Stern versehene Koeffizienten korrelieren auf einem Signifikanzniveau von 0,05 bei ca. 180 Werten pro Gebiet.

	Iller	Lech	Isar	Inn	Salzach
Iller	**1**	**0,45***	**0,48***	**0,71***	0,37
Lech	**0,45***	**1**	**0,38***	0,21	0,26
Isar	**0,48***	**0,38***	**1**	**0,56***	0,26
Inn	**0,71***	0,21	**0,56***	**1**	**0,57***
Salzach	0,37	0,26	0,26	**0,57***	**1**

Mit R = 0,38 ist die Korrelation der Hochwasserhäufigkeiten der direkt benachbarten Flüsse Lech und Isar denkbar schlecht. In Abbildung 2 ist die standardisierte 31-jährige gleitende Hochwasserhäufigkeit von Lech und Isar gegenübergestellt. Trotz der räumlichen Nähe kommt es zu auffälligen Unterschieden, die teils durch unterschiedliche Charakteristika der Einzugsgebiete begründet sind (vgl. BÖHM & WETZEL 2006).

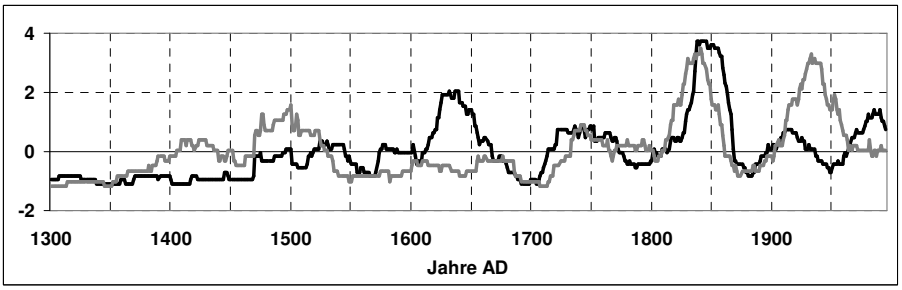


Abb. 2: Gegenüberstellung der standardisierten 31-jährigen gleitenden Hochwasserhäufigkeit des Lechs (in blau) und der Isar (in grau) (nach eigenen Daten)

Es zeigt sich jedoch auch die Lage in unterschiedlichen hygrischen Regionen (vgl. BECK 2000). Betrachtet man die Zeitreihen, ist vor allem im 17. Jh. aber auch im 20. Jh. ein gegenläufiges Verhalten der Hochwassertätigkeit zu beobachten. Auch rezent zeigen die Niederschlagsverteilungen großer Hochwasser unterschiedliche Raummuster auf. Bei den Ereignissen von 1999 und 2005 wurde vor allem das westliche Alpenvorland getroffen; 1954 und 2002 lag das Niederschlagszentrum im Osten des Alpenvorlandes. Das Hochwasser von 1940 ist ein Beispiel für ein Ereignis, das den Alpennordrand zentral getroffen hat. Je nach Verteilungstyp der Niederschläge sind entweder das Isar- oder das Lechgebiet oder beide Gebiete betroffen.

Zirkulationsdynamische Aspekte und Hochwasserhäufigkeit

Der Großteil der Sommerhochwasser lässt sich atmosphärischen Störungen mit meridionalen Zugbahnen zuordnen. Diese Erkenntnis basiert auf den raumzeitlichen Schadensbildern nach Daten der IBT, die im Vergleich mit rezenten Hochwasserereignissen synoptisch interpretiert wurden. Auffallend häufig folgen die Tiefdruckgebiete der Zyklonenzugbahn „Vb“, die sich aus dem nordadriatischen Raum an den östlichen Alpen vorbei in Richtung Ladogasee bewegt. „Vb-Zyklonen“ können aus vielen Großwetterlagen entstehen. Rekonstruktionen auslösender atmosphärischer Begleiterscheinungen sind nur begrenzt möglich. Mittels t-modaler Hauptkomponentenanalyse (PCA) (JACOBEIT et al. 2003) der rekonstruierten Bodenluftdruckverhältnisse (SLP), die in saisonaler (1500-1658) und monatlicher (1659-1999) Auflösung für den östlichen Nordatlantikraum und Europa vorliegen (LUTERBACHER et al. 2002), lassen sich für Bodenluftdruckfelder im Hochwasserfall auf zeitlich übergeordneter Skala atmosphärische Rahmenbedingungen der Hochwassergenese aufzeigen. Diese atmosphärischen Rahmenbedingungen werden im Folgenden für die Gebiete von Lech und Isar gegenübergestellt. Die jeweils hochwasserbegleitenden Strömungskonfigurationen sind durch die Scores der einzelnen Hauptkomponenten für den Sommer in Abbildung 3 dargestellt. Die Strömungskonfigurationen mit den größten Erklärungsanteilen sind sehr ähnlich und entfallen mit ~44% (Lech) bzw. ~41% (Isar) jeweils auf das Muster West. Die anderen Zirkulationsmuster sind auch jeweils ähnlich, allerdings ist der Erklärungsanteil für beide Gebiete verschieden.

Das Muster „Hoch Fennoskandien“ (PC#3 Lech, PC#2 Isar) hat offenbar in beiden Flussgebieten unterschiedliche Erklärungsanteile an der Hochwassergenese. Dies kann mit einem Häufigkeitsindex (Index-H) dargestellt werden, der die führende 31-jährige gleitende Ladungen der PCA angibt. Der Verlauf von Index-H für das Muster „Hoch Fennoskandien“ zeigt die zumeist geringe Bedeutung dieser Konstellation für beide Flussgebiete (Abbildung 4). Nur in der Mitte des 18. Jh. bekommt dieses Muster für den Lech eine Bedeutung, während es an der Isar nur in der ersten Hälfte des 20. Jh. eine größere Rolle spielt.

4. Schlussfolgerungen

Das Hochwassergeschehen im bayerischen Alpenvorland unterliegt einer ausgeprägten Variabilität. Für die vergangenen 500 Jahre konnte eine zeitliche und räumliche Differenzierung nachgewiesen werden. Die Unterschiede im jahreszeitlichen Auftreten der Hochwasser hängen vor allem vom Anteil alpiner Gebiete an den Einzugsgebieten der Flüsse ab. Dabei

treten mit wachsendem alpinen Anteil verstärkt sommerliche Hochwasser auf. Auch bei direkt benachbarten Flussgebieten sind z.T. schlechte Übereinstimmungen von Hochwasserereignissen zu beobachten, wie das Beispiel von Lech und Isar zeigt. Die Ursachen dafür liegen neben den atmosphärischen Rahmenbedingungen für die Hochwassergenese auch in naturräumlichen Aspekten begründet. Trotz ähnlicher hochwasserbegleitender Strömungskonstellationen, können die Niederschlagsfelder verschieden ausgeprägt sein und auch in benachbarten Gebieten zu unterschiedlichem Hochwasser führen.

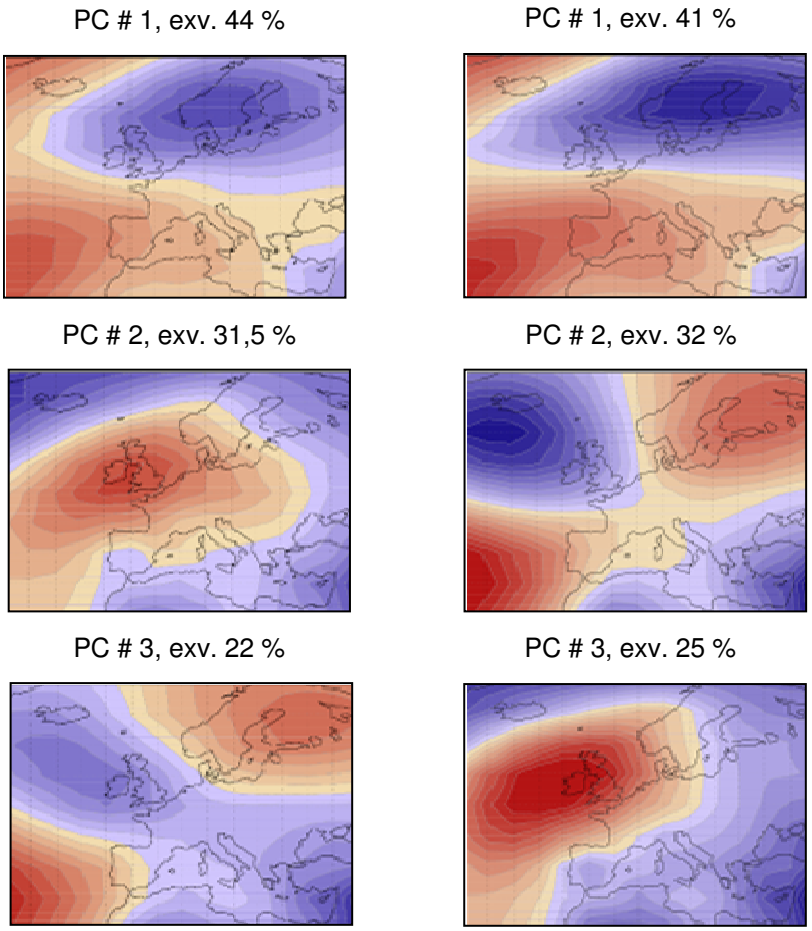


Abb. 3: Scores der hochwassergebundenen Hauptkomponenten für Lech (links) und Isar (rechts) für die Jahreszeit Sommer (JJA) 1500-1999 (exv. = Erklärungsanteil an der Gesamtvarianz)

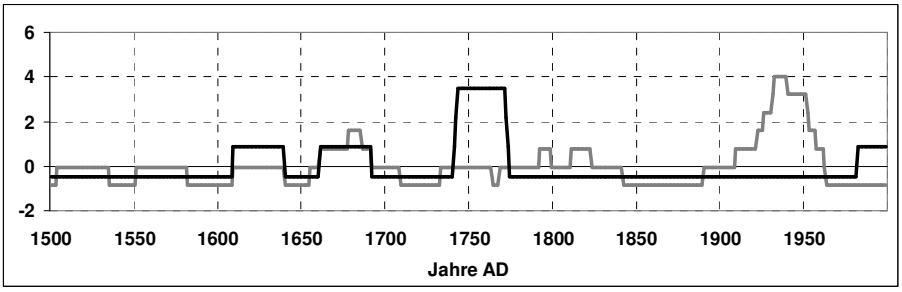


Abb. 4: Der zeitliche Verlauf von Index-H in standardisierter Form für das Muster „Hoch Fennoskandien“ (Lech blaue, Isar rot Kurve) Sommer (JJA) 1500-1999

Danksagung
Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Für die finanzielle Unterstützung sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

BECK, CH. (2000): Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780. – Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 95.

BÖHM, O. & K.-F. WETZEL (2006): Flood history of the Danube tributaries Lech and Isar in the Alpine foreland of Germany. – Hydrological Sciences Journal 51, S. 784-798.

GLASER, R. (2008): Klimageschichte Mitteleuropas, 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. – 2. Auflage, Darmstadt.

JACOBEIT, J. et al. (2003): Links between flood events in Central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. – Geophysical Research Letters 30, S. 1173-1175.

LUTERBACHER, J. et al. (2002): Reconstruction of Sealevel Pressure fields over the eastern North Atlantic and Europe back to 1500. – In: Climate Dynamics 18, S. 545 – 561.

MEYNEN, E. (1961): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. – Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen.

PFISTER, C. (1999): Wetternachhersage. – Verlag Haupt, Bern.

SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Klimatologie. – 3. Auflage, UTB Stuttgart.

STURM, K. et al.. (2001): Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. – In: PGM, 145, S. 14 - 27.

WANNER, H. et al. (2000): Klimawandel im Schweizer Alpenraum. - vdf Hochschulverlag, Zürich.

WEIKINN, C. (1958-1963): Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitenwende bis zum Jahre 1850. – Band I-IV. Akademieverlag Berlin.

Estimation of changes of the flood regime caused by river engineering works using multilinear flow routing

Jan Szolgay, Michaela Danáčová, Peter Šúrek

Abstract

The attenuation of flood waves on alluvial reaches of rivers is usually influenced by the reduction of flood plain areas. This study presents a simple framework that can be used for estimation of changes of the flood regime in consequence of such effects when a small set of flood waves, from the periods before and after the river engineering works were realised, are available. The applicability of the methodology is demonstrated on two case studies on the Morava and Danube Rivers in Slovakia. Patterns observed in the travel-time vs. peak-discharge relationships from both periods were analysed by fitting a multilinear conceptual flow routing model to larger floods. The travel-time parameter of the multilinear model was allowed to vary with the input discharge into the river reach according to a piecewise linear relationship. The parameters of that relationship were estimated by genetic optimisation on flood waves from the pre- and post-river training periods using the performance of the multilinear model as the optimization criterion. The resulting travel-time vs. discharge relationships were compared against those detected in the empirical data. It was shown that changes in the travel-times of flood peaks detected by the genetic optimisation exhibit the same tendencies as found in the empirical data. Since the changes detected in the attenuation of floods peaks were included in the parameterisation of the multilinear model, the changes in the flood regime can be assessed by frequency analysis of flood peaks gained by the simulation of the attenuation of a series of flood waves for pre- and post-river training conditions.

1. Introduction

Sufficient data describing both present and historical morphologic and hydraulic channel characteristics of trained rivers are rather rare. Especially in the past, detailed field investigations, which would supply these data, were not conducted. This hinders the application of hydraulic models for flood routing in engineering design for the estimation of changes in the flood regime due to river engineering works. This study presents a simple general framework that can be used for estimation of changes of the flood regime in consequence of such works by a multilinear hydrologic routing model on a small set of flood waves from periods before and after the river engineering works are available. The methodology is demonstrated on two case studies on the Morava and Danube Rivers in Slovakia.

2. Methodology

The multilinear routing model consists of a series of n linear reservoirs. Each reservoir is allowed to have an external input. In the first reservoir of the series, this accounts also for the inflow to the cascade at the inlet cross section of the modelled reach. In the subsequent reservoirs it stands for lateral inflow (or water withdrawal) into the corresponding reservoir along the reach. All the inputs to the model are considered constant during the sampling interval

(stepwise constant function). Due to the limited space in this paper the reader is referred to the references cited below for a more thorough review of the theoretical background of the methods used. In these studies we showed that empirical relationships between the travel-time of flood peaks and the corresponding peak discharges can be used to parameterize this model. In DANÁČOVÁ & SZOLGAY (2006a), such empirical models attributed to pre- and post- river training periods were used to assess changes in the attenuation of flood waves on the Morava River. In SZOLGAY & DANÁČOVÁ (2006b), SZOLGAY et al. (2006) and SZOLGAY & DANÁČOVÁ (2008), a piecewise linear model of the relation between the travel time of the flood peaks and the discharge was considered. The parameters of that relationship were fitted by the optimisation of the multilinear routing model's performance on one large flood wave with the help of a genetic algorithm.

Here we summarise these results to demonstrate how these frameworks can be used to detect changes in the flood wave-speed/travel-time vs. discharge relationships due to river training. Again no a-priori shapes of the relationships between the wave-speed/travel-time and discharge were considered in the model. Instead, a flexible semi-empirical framework was set up to find the approximate shape and parameters of such relationships. For each model run it was expected that the travel-time discharge relationship could be approximated by a chain of successive linear segments of equal lengths. The parameters of these segments were estimated with the help of a genetic algorithm using the multilinear routing model's performance measured by the Nash-Sutcliffe coefficient as the optimization criterion. The number of successive linear segments remained pre-selected for a given optimisation run, but varied between runs in order to investigate the robustness of the approach. The resulting wave-speed/travel-time vs. discharge relationships were compared against those detected in the empirical data.

3. Case studies

PRICE (1973) postulated a wave-speed and discharge relation which can be interpreted as consisting of two power functions describing the main channel and the over-bank flow respectively, joined by an S-shaped transition curve. Wave-speed and discharge investigations carried out by WONG & LAURENSON (1983) on six Australian river reaches showed consistent variations of wave speeds with discharges and were considered an empirical confirmation of the relation postulated by PRICE (1973). In their studies wave-speeds were determined as the reach length divided by the travel-time of the flood peaks. These were plotted against the average of the peak discharges at the two ends of the reach. The main feature of these empirical relations is that the wave-speed first increases rapidly with discharge, then decreases sharply, and finally increases at a slower rate.

In the first case study presented here empirical data on the travel time of the flood peaks were collected from a set of flood waves between Bratislava and Medveďov both from periods before and after the completion of the Gabčíkovo hydropower scheme (for a description of the setup and operation of this system, see, e.g., SZOLGAY (1991)), and plotted as wave-speeds against discharges. Unlike in WONG & LAURENSON (1983 here the values of the input flow in Bratislava was chosen as the independent corresponding discharge.

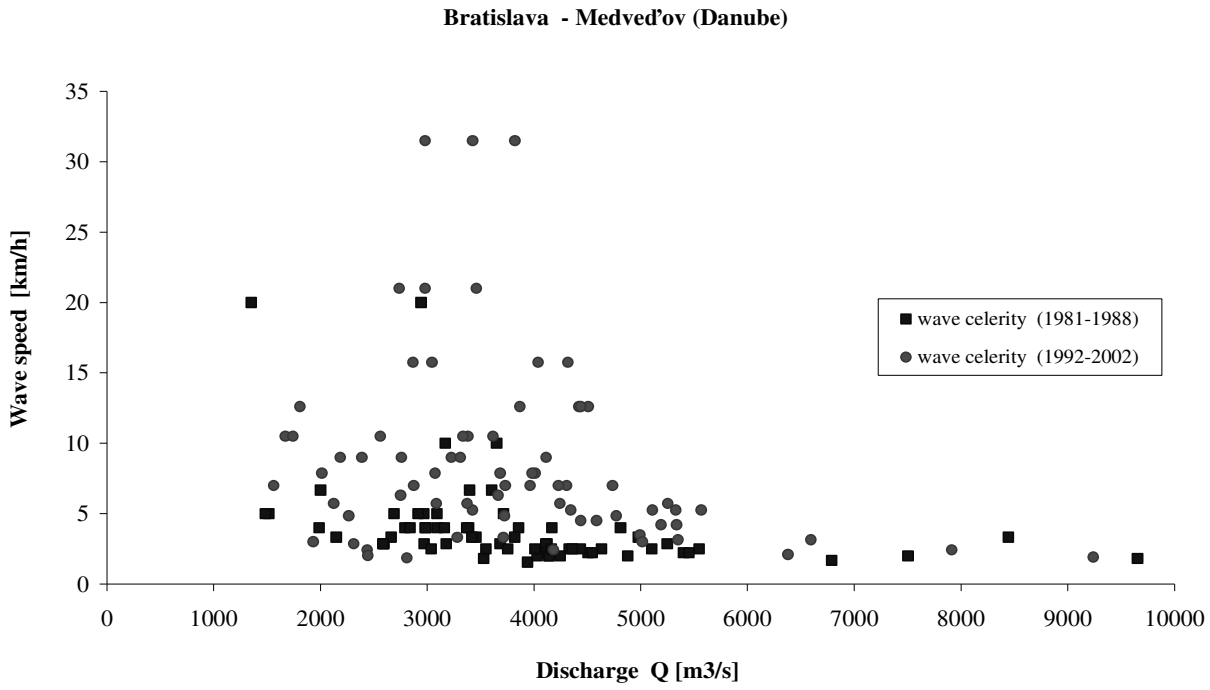


Fig. 1. Relationships between the wave speed and discharge on the Danube between Bratislava and Medveďov.

The resulting wave sped discharge relationships for both periods are shown in Figure 1. The bank-full discharge, which was between 2500 and 3000 m^3s^{-1} in the given reach before the completion of the hydropower scheme, falls into the transition region as described by PRICE (1973, 1977) and verified by WONG & LAURENSON (1983). Note that for the present flow conditions, the data implicitly includes the effect of the operating rules of the hydropower scheme on the attenuation of the flood waves and therefore shows a significantly higher variation of the wave speed in the flow range from 2000 to 4000 m^3s^{-1}. From a comparison of the data patterns of the two periods, it can be deduced that the smaller floods (in a range between 2000 and 5000 m^3s^{-1}) seem to accelerate, whereas the behavior of the few large floods available for this study does not show significant changes in wave speed. These findings can be explained by the fact that smaller flood waves are mostly routed through the derivation/navigation channel with a capacity of approx. 4000 m^3s^{-1}, which is shorter and smoother than the original natural river bed, whereas significant portions of large floods are released into the original river bed and its floodplains.

The second case study presented here is based on discharge data from the Morava River between Moravský Svätý Ján and Záhorská Ves, which was used in SZOLGAY & DANÁČOVÁ (2006b) and SZOLGAY et al. (2006). For the analyses of the wave-speed/travel-time discharge relationships, hourly discharge data from a set of flood waves from the period 1992 to 2002 were used in order to describe the post-development conditions and historical floods from the period 1901 to 1916 in order to characterise the pre-development flow routing regime. The resulting travel-time discharge relationships for both periods are shown in Figure 3. The pattern described in the literature is fully recognisable

from the empirical data. The changes in the travel time of flood waves are well readable, it can be seen, that due to the loss of flood plains and shortening of the length of the river, the travel-time is decreasing in general in all the discharge ranges.

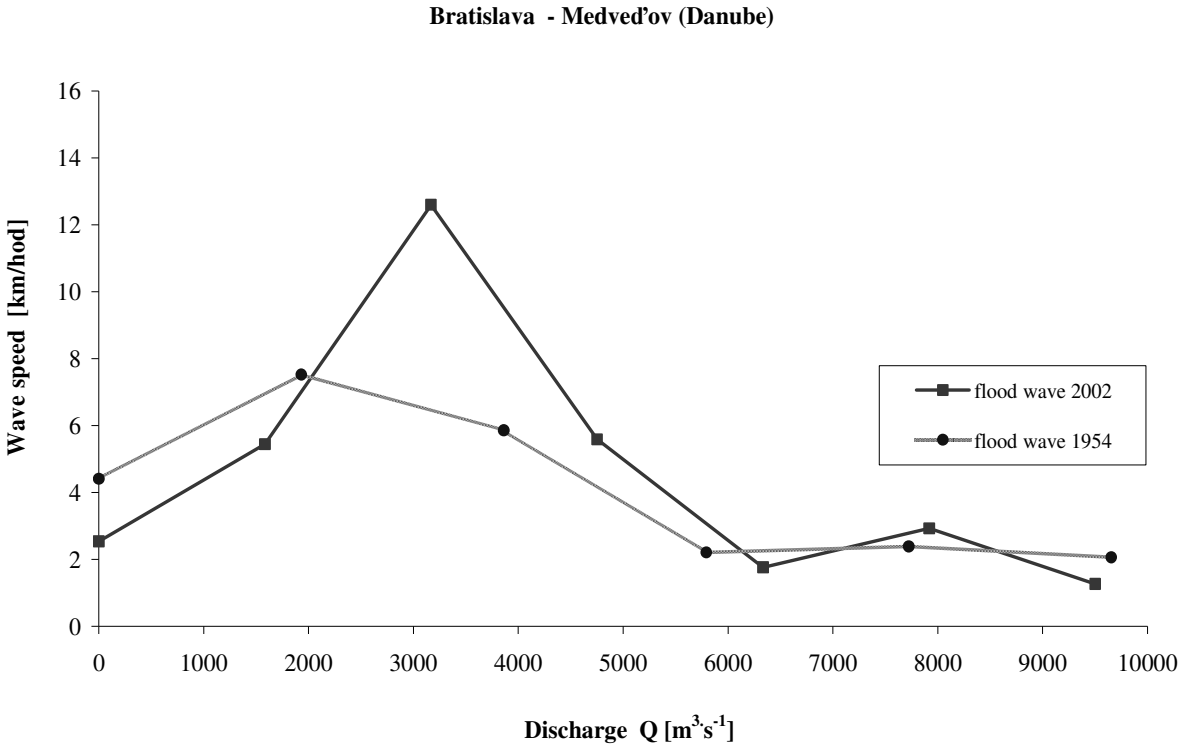


Fig. 2. Comparison of the piecewise linear relationships between the wave speed and discharge on the Danube as estimated by optimising the multilinear model performance for the two periods.

Selected wave-speed/travel-time vs. discharge relationships estimated for the pre- and post-development conditions by the genetic optimisation of the multilinear model for both rivers are shown in Figures 2 and 4. With regard to the change in the travel-time of the flood waves due to river training, the same conclusions can be drawn from these relationships as from the comparison of the empirical data.

4. CONCLUSIONS

The relationship between flood wave-speed and discharge was studied on a reach of the Morava River between Moravský Svätý Ján and Záhorská Ves and the Danube between Bratislava and Medvedov for flow conditions before and after the completion of a major river training schemes. Flood wave speeds for pre- and post-river developments were compared using empirical data, and the flood wave-speed/travel-time discharge relationships which were obtained by optimising the multilinear version of the Kalinin Miljukov flood routing model's performance on small set of floods representing pre- and post–river training conditions, respectively. It was shown that changes in the wave speed detected by the genetic optimisation exhibit the same behaviour as that of the empirical data. Since the detected changes are included in the parameterisation of the multilinear model, the change in the at-

tenuation of the flood peaks due river training can be assessed by a simulation of the transformation a series of floods for pre- and post-river training conditions.

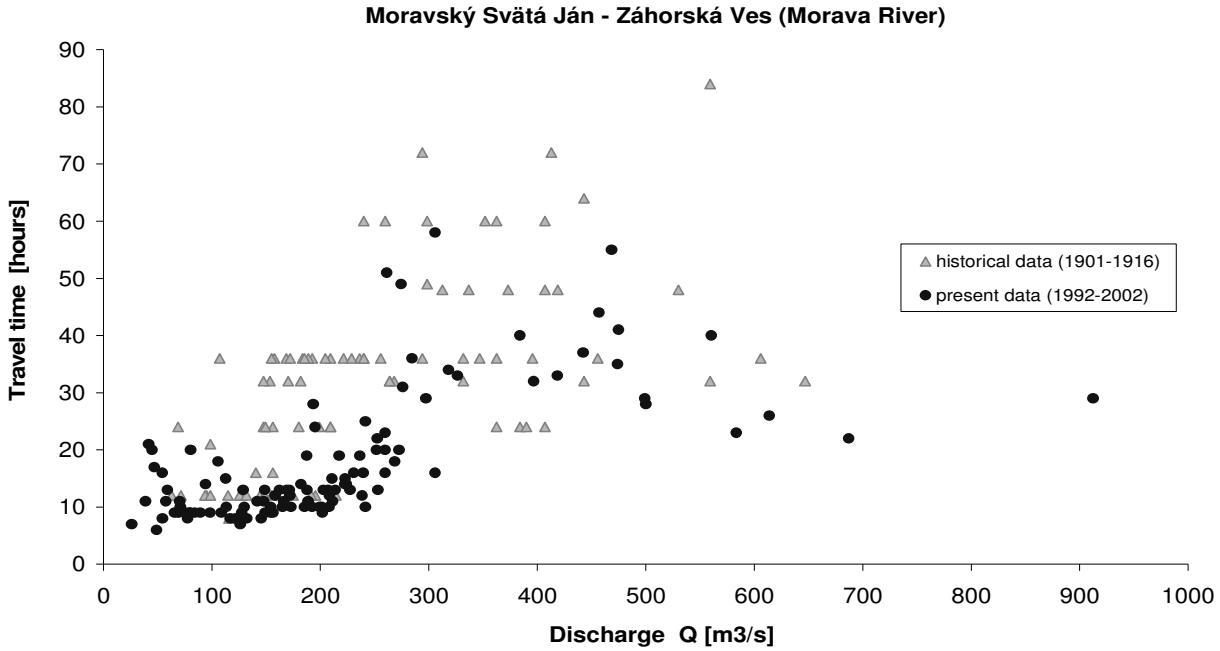


Figure 3. Comparison of travel – time vs. peak discharge data for pre- and post-river training conditions on the Morava River between Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves.

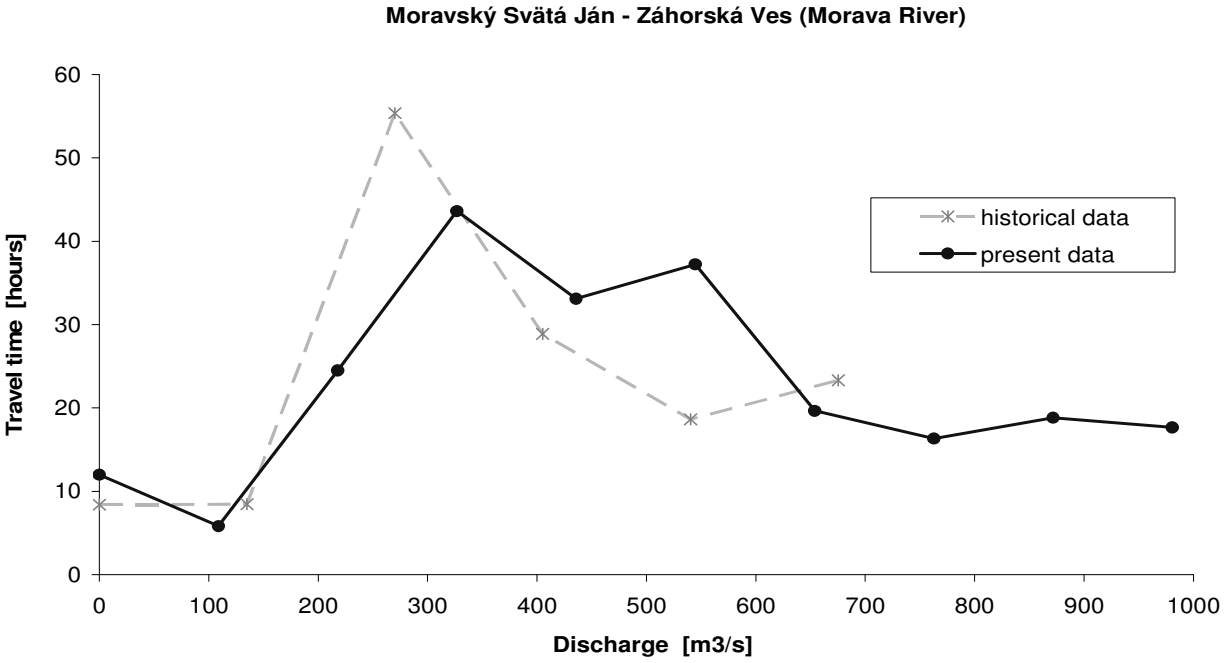


Fig. 4. Comparison of the piecewise linear approximations of flood peak travel–time vs. peak discharge relationship on one large flood for each period on the Morava River.

Acknowledgement.
This work was supported by the VEGA Agency under Grant No. 1/0894/10. The support is gratefully acknowledged.

References

DANÁČOVÁ, M. & J. SZOLGAY (2005): Detection of changes in the flood regime on the lower Morava. In Slovak. Acta Hydrologica Slovaca, Vol.6, No., 191 – 201.

PRICE, R. K., (1973): Flood routing methods for British rivers, Proc. Inst. Civ. Eng., 55, 913-930.

SZOLGAY, J. (1991): Prediction of river runoff changes due to hydropower development on the Danube at Gabcikovo, IAHS Publ. No. 201, 209 – 218.

SZOLGAY, J. & M. DANÁČOVÁ (2006a): Evaluation of changes in flood attenuation on the lower Morava during 1922 and 2002. In Slovak. Acta Hydrologica Slovaca, Vol.7, N.1, 108-118

SZOLGAY, J. & M. DANÁČOVÁ (2006b): Estimation of flood peak travel-time on the Morava River. 23rd Conference of the Danube Countries, Belgrade. 11 p.

SZOLGAY, J., M. DANÁČOVÁ & Z. PAPÁNKOVÁ (2006): Constrained optimisation of the travel-time flood peak relationship using multilinear routing and evolutionary algorithm. Meteorological Journal, Vol. 9, No. 3,165-170.

SZOLGAY, J. & M. DANÁČOVÁ (2007): Detection of changes in the flood celerity by multilinear routing on the Danube. In: Meteorological Journal. Vol.10. No. 4, 219-224.

SZOLGAY, J. & M. DANÁČOVÁ (2008): Detection of changes in the flood celerity by multilinear routing on the Morava river. In: XXIVth Conference of the Danubian Countries Bled, Slovenia, 2.- 4.6.2008. 8p.

WONG, T. H. F. & E. M. LAURENSON (1983): Wave speed-discharge relations in natural channels, Water Resources Res., 19, 701-706.

Ensemble Modellierung der Abflusscharakteristik der oberen Donau unter Klimaszenarien

Harald Kling, Martin Fuchs, Maria Paulin

Zusammenfassung

Die Abflusscharakteristik hängt stark von klimatischen Bedingungen ab. Daher bedeuten Unsicherheiten im zukünftigen Klima auch Unsicherheiten im zukünftigen Abfluss. In dieser Studie verwenden wir Simulationsläufe von 23 regionalen Klimamodellen für das Emissionsszenario A1B aus dem Projekt ENSEMBLES. Dies ermöglicht, die Unsicherheiten in der Veränderung des Abflusses im oberen Einzugsgebiet der Donau bis Wien (101,871 km²) bis zum Ende des 21. Jahrhundert mit einem Wasserbilanzmodell zu untersuchen. Die Ensemble Modellierung des zukünftigen Abflusses zeigt die große Bandbreite der möglichen (1) Verflachung der Saisonalität aufgrund von veränderten Schneeprozessen, (2) Abnahme des mittleren Jahresabflusses wegen größerer Verdunstung und (3) Verstärkung der Niederwasser-Situation am Ende des Sommers. Diese signifikanten Veränderungen vergrößern sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts.

1. Einleitung

Seit ca. 1980 steigt die globale Temperatur signifikant an. Im oberen Einzugsgebiet der Donau zeigen zudem auch der Niederschlag und Abfluss systematische saisonale Trends (KLIWA 2003, FÜRST et al. 2007). Die weitere Entwicklung dieser Trends in den nächsten Jahrzehnten ist z.B. für die Energieerzeugung oder die Schifffahrt auf der Donau bedeutend. Es liegen verschiedene hydrologische Studien zum Thema Klimawandel für die Region vor (z.B. NACHTNEBEL & STANZEL 2010, MAUSER & PRASCH 2010, BLÖSCHL et al. 2011). Da einzelne Klimamodelle bis zum Ende des 21. Jahrhunderts teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, ist es nicht möglich, deterministische Aussagen über den zukünftigen Abfluss in der Donau zu treffen. Vielmehr ist eine Betrachtung einer ganzen Bandbreite – oder Ensembles – von Klimaszenarien erforderlich, um Unsicherheiten abzuschätzen (GRAHAM et al. 2007).

Ziel dieser Studie ist, den Einfluss der Klimaänderung auf die Abflusscharakteristik im oberen Donau-Einzugsgebiet bis Wien (101.871 km²) mit einem möglichst großen Ensemble von regionalen Klimamodellen zu untersuchen. Wir verwenden ein Wasserbilanzmodell, das die wichtigsten kausalen Zusammenhänge zwischen den Komponenten des Wasserkreislaufes (Niederschlag, Abfluss, Verdunstung, Speicheränderung) berücksichtigt. Das Wasserbilanzmodell wird mit beobachteten Daten kalibriert. Die Simulation eines langen historischen Zeitraumes (1887-2007) ermöglicht eine Evaluierung unter historischer Klima-Variabilität. Durch die relativ grobe räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modells kann mit vertretbarem Aufwand auch eine große Anzahl an Klimaszenarien untersucht werden.

2. Wasserbilanzmodell

Die hydrologische Simulation erfolgt auf Basis eines Wasserbilanzmodells, das schon zur Bestimmung der saisonalen Wasserbilanz im Hydrologischen Atlas Österreichs (KLING et al.

2007) sowie für langfristige Trendstudien (FÜRST et al. 2007) zur Anwendung kam. Das Modell berücksichtigt Schneeprozesse, Verdunstung, Bodenspeicherung und verschiedene Abflusskomponenten. Eine genaue Modellbeschreibung findet sich in KLING (2006). Für die vorliegende Studie wurde das Modell um ein Gletscher-Modul erweitert. Außerdem sind auch die 14 größten künstlichen Speicher im Donaueinzugsgebiet (insgesamt 1400 hm³ Nutzraum) inklusive ihrer Betriebsregeln und Errichtungsjahre - erst ab diesen sind sie wirksam - im Modell abgebildet.
Als zeitliche Diskretisierung dienen Monatsschritte und als räumliche Diskretisierung kommt ein halb-verteilter Ansatz zur Anwendung. Die wichtigsten Zubringer zur Donau werden in 16 Teilgebieten erfasst (Abbildung 1), welche wiederum durch Höhenzonen mit einer Abstufung von 500 m untergliedert sind. Die Parameter des Wasserbilanzmodells werden soweit möglich aus Gebietseigenschaften geschätzt (siehe auch KLING 2006). In einem zweiten Schritt erfolgt eine Optimierung ausgewählter Parameter mit beobachteten Abflüssen der Periode 1961 bis 1990.

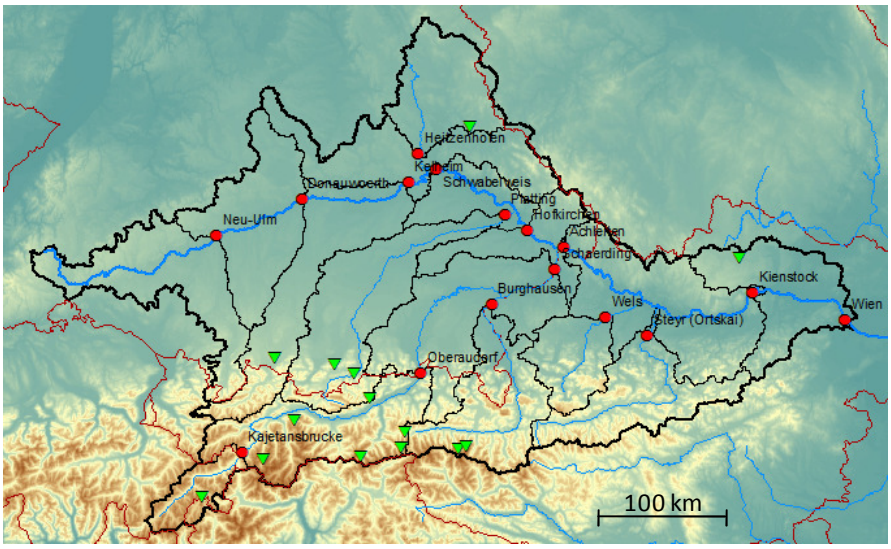


Abb. 1: Oberes Donau-Einzugsgebiet bis Wien und Unterteilung in 16 Teilgebiete. Rote Kreissymbole: Pegel mit Abflussdaten. Grüne Dreiecke: berücksichtigte künstliche Speicher.

3. Datengrundlage

Die benötigten Eingangsdaten in das Modell sind Monatswerte von Niederschlag, Temperatur und potentieller Verdunstung. Abflussdaten ermöglichen eine Evaluierung der Simulation. Der historische Simulationszeitraum ist von 1887 bis 2007, also 121 Jahre. Wir verwenden einerseits Zeitreihendaten über Niederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer von Stationen aus der HISTALP Datenbank (BÖHM et al. 2009), andererseits Karten über mittlere Jahreswerte (1961-1990) von Niederschlag (KLING et al. 2005, HOLKO et al. 2005), um ein räumliches Muster auf die Zeitreihen aufzuprägen. Die Temperatur wird alleine aus Stationsdaten mit der Seehöhe regionalisiert. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung der Monatsschritte erfolgt nach der Methode von Turc. Abflussdaten liegen bei den meisten der 16 Pegel spätestens ab 1951 vor - mit der längsten Zeitreihe ab 1893 für die Donau bei Wien.

Eine ganze Reihe von Klima-Simulationen mit regionalen Klimamodellen (RCMs) steht über das ENSEMBLES Projekt (HEWITT & GRIGGS 2004) für Europa zur Verfügung. Die RCMs haben eine horizontale Auflösung von 25 x 25 km und sind von sieben verschiedenen globalen Klimamodellen (GCMs) für das IPCC Emissionsszenario A1B („mittleres“ Szenario, IPCC 2007) angetrieben. Insgesamt verwenden wir 23 Klimaszenarien. Der allgemeine Simulationszeitraum in ENSEMBLES ist von 1951 bis 2100 - von sieben RCMs liegen Daten aber nur bis 2050 vor.

Abbildungen 2 und 3 stellen die Entwicklung des Niederschlags und der Temperatur im oberen Donau-Einzugsgebiet von 1887 bis 2100 dar. Auffallend beim Niederschlag ist, dass die historischen Jahres-Niederschläge sehr konstant sind. Bis zum Jahr 2100 zeigen die RCMs keine einheitlichen Trends - sowohl Abnahme (bis zu -10%) als auch Zunahme (bis zu +20%) werden simuliert. Bei der Jahres-Temperatur zeigen alle RCMs eine Zunahme, die bis zum Jahr 2100 zwischen +2°C und +5°C liegt. Bemerkenswert ist, dass die beobachtete Temperatur-Erwärmung ab 1960 im obersten Bereich der RCM Simulationen liegt.

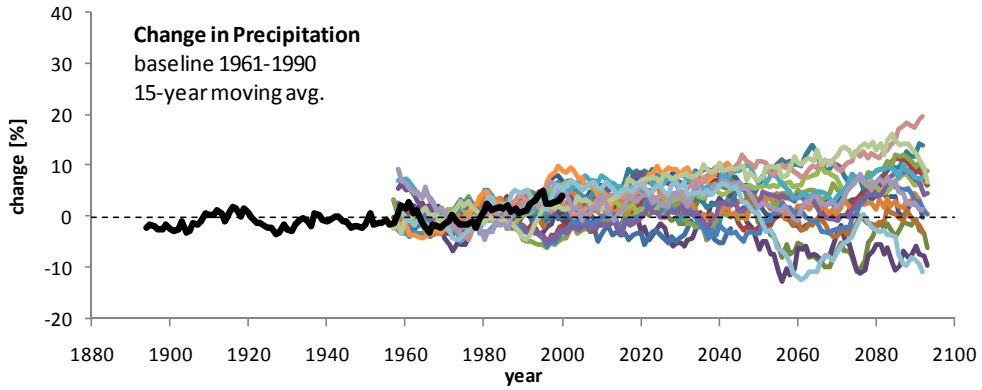


Abb. 2: Veränderung des Jahres-Niederschlags im oberen Donau-Einzugsgebiet bezogen auf 1961-1990. 15-jähriges gleitendes Mittel. Schwarz: Beobachtung 1887-2007. Bunt: RCM Daten.

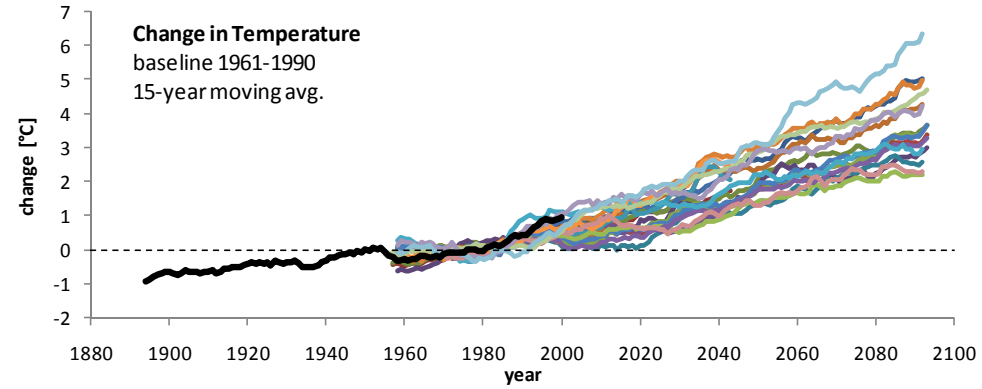


Abb. 3: Veränderung der Jahres-Temperatur im oberen Donau-Einzugsgebiet bezogen auf 1961-1990. 15-jähriges gleitendes Mittel. Schwarz: Beobachtung 1887-2007. Bunt: RCM Daten.

4. Historische Simulation

Die historische Simulation des Abflusses dient zur Kalibrierung und Evaluierung des Wasserbilanzmodells. Im allgemeinen ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit beobachteten

Abfluss-Daten in allen 16 Teilgebieten, sowohl in der Kalibrierungsperiode 1961 bis 1990 (Abbildung 4), als auch in den separat evaluierten Perioden 1901-1930, 1931-1960 und 1991-2007, sowie in den jeweils zehn wärmsten, trockensten und feuchtesten Jahren zwischen 1893 und 2007. Die gute Abfluss-Simulation ist weniger das Ergebnis des gewählten Modells, sondern vielmehr dadurch bedingt, dass auf großen raum-zeitlichen Skalen die Wasserbilanz einfach zu simulieren ist. In allen Perioden liegt die Korrelation simulierter und beobachteter monatlicher Abflüsse der Donau bei Wien bei über 0.9 und der mittlere Fehler ist kleiner zwei Prozent. Eine wichtige Eigenschaft ist, dass die beobachtete Veränderung in der Saisonalität des Abflusses richtig simuliert wird - exemplarisch anhand der beiden Perioden 1901-1930 und 1991-2007 in Abbildung 5 dargestellt. Diese Veränderungen sind durch Niederschlag (saisonale Veränderung) und Temperatur (Zunahme), aber auch durch den Bau der großen Speicher (Aufhöhung des Winter-Niederwassers um ca. vier Prozent) verursacht. Der Einfluss der Gletscher ist für den Abfluss der Donau marginal. Beim Pegel Oberaudorf am Inn ist der Einfluss der negativen Massenbilanz der Gletscher größer (+4% im Sommer), aber der Speicherbetrieb beeinflusst den Abfluss noch deutlicher – +25% beim Winter-Niederwasser und -10% beim Abfluss im Mai und Juni.

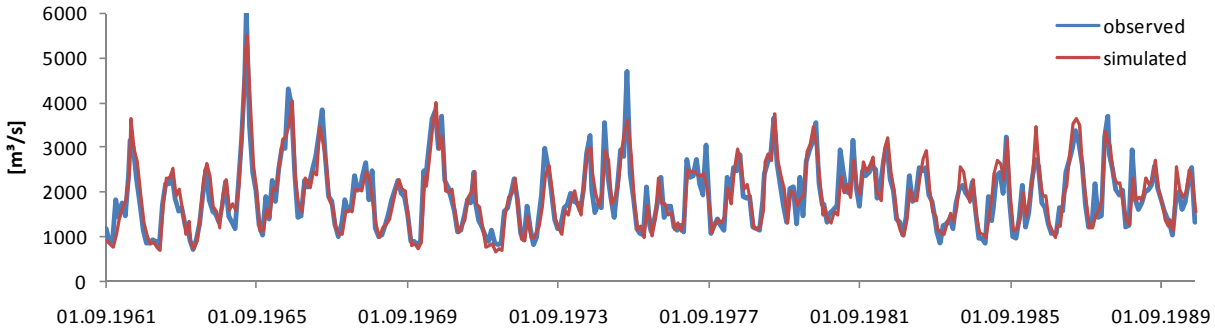


Abb. 4: Ganglinie des simulierten (rot) und beobachteten (blau) Abflusses der Donau bei Wien. Kalibrierungs-Periode 1961-1990.

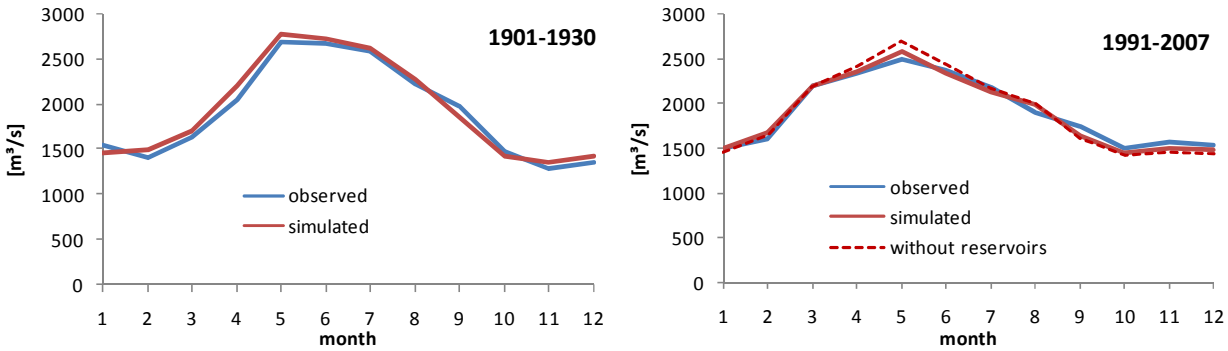


Abb. 5: Saisonaler Abfluss der Donau bei Wien außerhalb der Kalibrierungs-Periode 1961-1990. Blau: beobachtet. Rot: simuliert. Links: 1901-1930. Rechts: 1991-2007, inklusive Simulation ohne künstliche Speicher (strichlierte Linie).

5. Simulation unter Klimaszenarien

Insgesamt stehen 23 Klimaszenarien zur Verfügung. Zwei RCMs mussten wegen zu großer systematischer Fehler unter historischen Bedingungen (1961-1990) ausgeschieden werden. Aber auch die restlichen RCMs sind nicht frei von systematischen Fehlern und wir verwenden daher nur die Änderungssignale bzgl. Niederschlag und Temperatur bezogen auf die Referenzperiode 1961-1990. Zusätzlich wendeten wir bei drei ausgewählten RCMs auch die Korrektur-Methode Quantile-Mapping (PIANI et al. 2010) an, konnten aber keine wesentlichen Unterschiede in den Simulationsergebnissen mit dem Wasserbilanzmodell feststellen.
Die simulierte mittlere jährliche Wasserbilanz ist in Tabelle 1 für verschiedene Perioden aufgelistet. Dabei bilden wir Mittelwerte über alle Klimaszenarien, um die Ergebnisse grob zusammenzufassen. Die Temperatur steigt deutlich an, während der Niederschlag gleich bleibt. Als Folge der höheren Temperatur nimmt die Verdunstung zu und der Abfluss ab – um -15% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Tabelle 1: Mittlere jährliche Wasserbilanz des oberen Donau-Einzugsgebietes. 1961-1990: beobachtete Daten. 2021-2051: Mittelwert von 21 RCMs. 2071-2100: Mittelwert von 16 RCMs.

Periode	[°C] Temperatur	[mm] Niederschlag	[mm] Abflusshöhe	[mm] Verdunstung
1961-1990	6.3	1137	597	541
2021-2051	7.9	1188	570	618
2071-2100	9.8	1161	505	658

In der weiteren Darstellung der Ergebnisse beschränken wir uns auf den Abfluss der Donau bei Wien, obwohl natürlich Auswertungen in allen 16 Teilgebieten und für eine Vielzahl von Variablen möglich sind. Abbildung 6 stellt die Saisonalität im Abfluss für 21 (2021-2050) bzw. 16 (2071-2100) Klimaszenarien dar. Die Ergebnisse mit verschiedenen RCMs streuen stark. Hier wird deutlich, dass bei Verwendung von nur einem einzigen RCM das Endergebnis vom Zufall beeinflusst wäre. Die größte Ursache für die Streuung zwischen den RCMs sind Unterschiede im Niederschlag, wobei diese Veränderungen im Niederschlag in verschiedenen Monaten auftreten. Dies schlägt sich natürlich deutlich auf die Abfluss-Simulation durch. In Abbildung 7 ist die Streuung zwischen den RCMs in farblich abgestimmten Bändern zusammengefasst. Es ergibt sich ein relativ schmales Band, innerhalb dessen die Hälfte aller Simulationen liegt. Generell nimmt der Abfluss im Sommer ab, vor allem in der Periode 2071-2100. Dies ist durch die Zunahme der Verdunstung aber auch früheres Einsetzen der Schneeschmelze bewirkt.
Die Ergebnisse für die Dauerline zeigt Abbildung 8. Für 2021-2050 ergibt sich keine deutliche Veränderung. Erst für 2071-2100 sind ein Absinken des Mittelwertes und eine größere Streuung zwischen den RCMs zu beobachten. Auffallend ist, dass die Ergebnisse zwischen den RCMs für die Dauerlinie weniger stark streuen als bei der Saisonalität (vergleiche mit Abbildung 7). Dies liegt darin begründet, dass für die Dauerlinie das zeitliche Auftreten einer Veränderung des Abflusses irrelevant ist, solange insgesamt wieder eine ähnliche Verteilung erhalten wird.

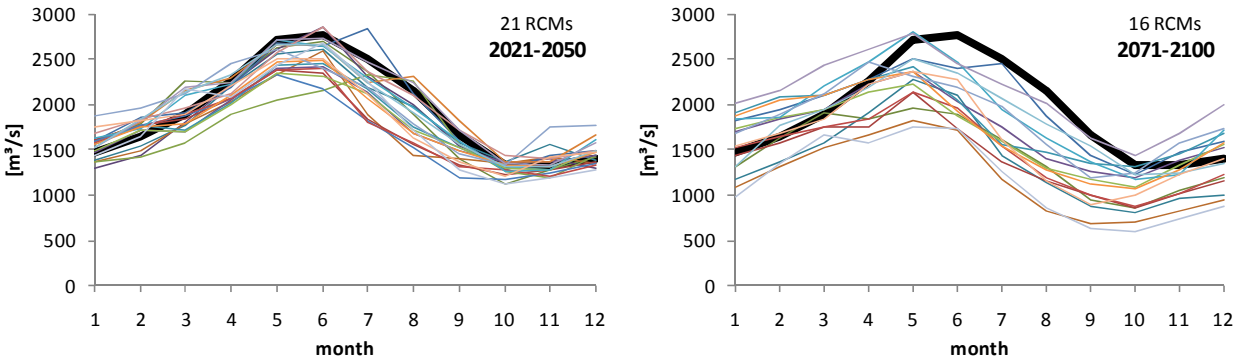


Abb. 6: Saisonalität des Abflusses der Donau bei Wien. Schwarz: 1961-1990. Bunt: RCMs.

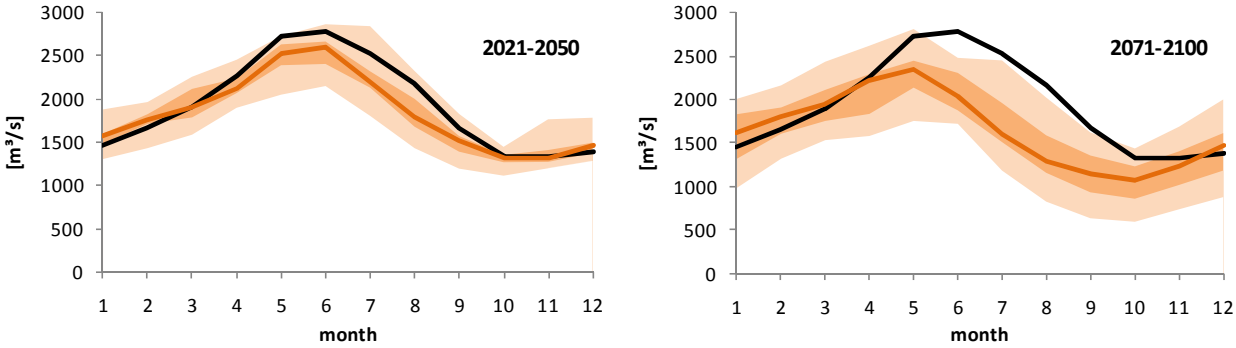


Abb. 7: Saisonalität des Abflusses der Donau bei Wien. Schwarze Linie: 1961-1990. Rote Linie: Median aller RCMs. Helle Schattierung: unteres und oberes Viertel aller RCMs. Dunkle Schattierung: 25 bis 75 Prozent aller RCMs.

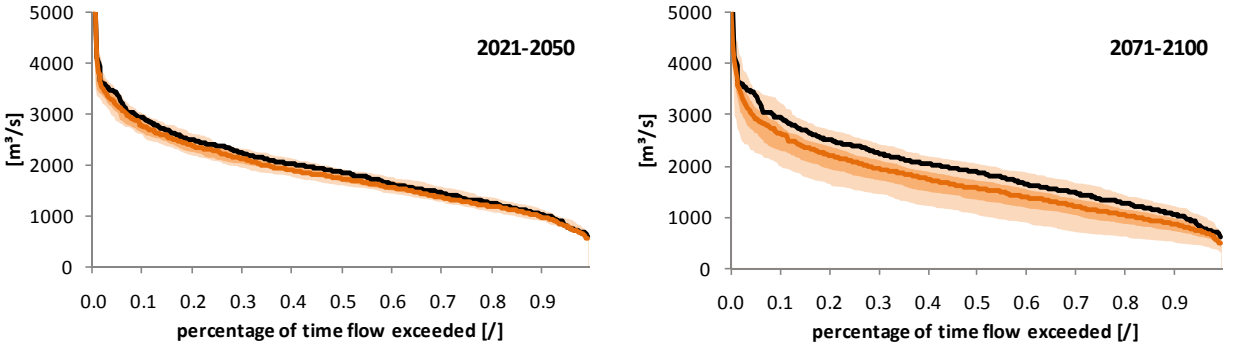


Abb. 8: Dauerlinie des Abflusses der Donau bei Wien. Farbliche Kodierung wie in Abbildung 7.

6. Schlussfolgerungen

Die Simulation des Abflusses im oberen Donau-Einzugsgebiet unter historischer Klima-Variabilität von 1887-2007 stimmt gut mit Beobachtungen überein – so wird z.B. die Veränderung in der Saisonalität gut wiedergegeben. Insofern kann die Annahme getroffen werden, dass das Wasserbilanzmodell zur Anwendung unter Klimaszenarien geeignet ist und die Unsicherheiten aufgrund des hydrologischen Modells – inklusive Zeit-invarianter Parameter - klein sind.

Bei der Wasserbilanz-Simulation mit Daten von 21 verschiedenen regionalen Klimamodellen ergibt sich eine große Bandbreite der möglichen Verflachung der Saisonalität des zukünfti-

gen Abflusses. Und dies obwohl alle Klimamodelle für das selbe Emissionsszenario angewendet wurden. Dies veranschaulicht, dass die Verwendung von nur einem einzigen Klimamodell nicht zweckmäßig ist, da das Endergebnis vom Zufall beeinflusst wäre. Hingegen streuen die Ergebnisse weniger stark bei der Auswertung für die Dauerlinie. Hier werden Unterschiede zwischen den Klimamodellen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts bedeutsam. Generell ergibt sich eine Verringerung des mittleren Abflusses aufgrund größerer Verdunstung, welche wiederum von der Größe der Temperatur-Erwärmung abhängt.
Beunruhigend ist, dass der beobachtete Temperatur-Anstieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts im obersten Bereich der von Klimamodellen simulierten Erwärmung liegt. Hinzu kommt, dass die Simulationen der Klimamodelle womöglich auf einem zu optimistischen CO2-Emissionsszenario (A1B) für das 21. Jahrhundert beruhen. Eine größere Erwärmung - mit noch stärkeren Auswirkungen auf den Abfluss in der Donau - ist also nicht auszuschließen.

Literatur

BLÖSCHL, G. et al. (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 1-2/11, S. 1-10

BÖHM, R. et al. (2009): Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. In Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage, 7-20

FÜRST, J., H. KLING, T. HÖRHAN & H.P. NACHTNEBEL (2007): Seasonal trends in the water balance. In Hydrological Atlas of Austria, BMLFUW (ed.), 3rd edition, map sheet 7.3, Wien, ISBN 3-85437-250-7

GRAHAM, L.P, J. ANDREASSON & B. CARLSSON (2007): Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. Climatic Change 81, S. 293–307

HEWITT, C.D. & D.J. GRIGGS (2004): Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. Eos 85, S. 566

HOLKO, L., Z. KOSTKA & P. MIKLANEK (2005): Maps of mean annual precipitation, actual evapotranspiration and runoff 1961-1990. Report of the Institute of Hydrology SAS, Bratislava, Slovakia

IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, S. 1-18

KLING, H., H.P. NACHTNEBEL & J. FÜRST (2005): Mean annual areal precipitation using water balance data. In Hydrological Atlas of Austria, BMLFUW (ed.), 2nd edition, map sheet 2.3, Wien, ISBN 3-85437-250-7

KLING, H. (2006): Spatio-temporal modelling of the water balance of Austria. Dissertation, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria

KLING, H., J. FÜRST & H.P. NACHTNEBEL (2007): Seasonal water balance. In Hydrological Atlas of Austria, BMLFUW (ed.), 3rd edition, map sheet 7.2, Wien, ISBN 3-85437-250-7

KLIWA (2003): Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte Heft 3, www.kliwa.de

MAUSER, W. & M. PRASCH (2010): Klimawandel im Alpenraum – Ergebnisse von GLOWA Danube. In: Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich, ÖWAV, Wien, S. 89-100

NACHTNEBEL, H.P & P. STANZEL (2010): Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und Extremwerte. In: Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich, ÖWAV, Wien, S. 115-128

PIANI, C., J.O. HAERTER & E. COPPOLA (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theoretical and Applied Climatology 99, S. 187-192

Vergleich von anthropogenen Eingriffen mit zu erwartenden Klimaeinflüssen auf den Wasserhaushalt

Hans Peter Nachtnebel

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich von Veränderungen im Wasserhaushalt, die durch direkte anthropogene Eingriffe verursacht werden, mit bereits beobachteten und zu erwartenden Veränderungen der Klimaeinflüsse. Während der Niederschlag und Temperatur als klimabedingte Größen anzusehen sind, zeigen sich im Abfluss zusätzlich die anthropogenen Einwirkungen, die durch den Speicherbetrieb, durch die Wirkung von Ausleitungen, durch flussbauliche Maßnahmen und durch Landnutzungsänderungen verursacht sein können. Die einzelnen Einflussfaktoren sind regional unterschiedlich wirksam.

Klimabedingt zeigt sich generell im Süden Österreichs ein bereits länger andauernder negativer Trend im Jahresniederschlag und eine Abnahme des Abflusses, während eine leichte tendenzielle Zunahme des Abflusses im Alpenraum festzustellen ist. Ebenso ist über die letzten 50 Jahre eine Erhöhung der Winterabflüsse in weiten Teilen Österreichs klar erkennbar. Für die Beurteilung der zukünftigen Klimaveränderungen wird das hochauflösende regionale Klimamodell REMO-UBA herangezogen, das ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell antreibt. Saisonal zeigt sich eine deutliche Erhöhung des Winterabflusses, der in den alpinen Gebieten um über 30% ansteigt, während der Sommerabfluss zurückgeht. Die Jahreswasserbilanz zeigt insgesamt infolge der erhöhten Temperatur und Verdunstung fallende Tendenz.

Ein Vergleich der direkten anthropogenen Eingriffe mit den Klimaeffekten zeigt, dass in vielen alpinen Einzugsgebieten die Wirkungen der Maßnahmen mit Klimaauswirkungen vergleichbar sind bzw. diese dominieren. Kritisch zu beurteilen ist der Umstand, dass im Hinblick auf die saisonale Wasserbilanz beide Effekte addieren. Mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes dominieren dann Klimaeffekte, was aber nicht verallgemeinerbar ist. Auf globaler Ebene liegt eine Reihe von Beispielen vor, wo der direkte anthropogene Effekt die Klimafolgen dominiert.

1. Einleitung

Zur Beschreibung der Veränderungen von hydrologischen Prozessen wird von einem Zustandsmodellkonzept ausgegangen (Abbildung 1), das letztlich auch die Basis für alle numerischen Modelle bietet. Angewandt auf ein hydrologisches System, wie ein Einzugsgebiet, können direkte anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt in folgenden Systemelementen wirksam werden:

- Veränderung in den Randbedingungen durch Beileitungen
- Beeinflussung des Systemzustandes infolge der Entwicklung der wasserbaulichen Infrastruktur, sowie durch Landnutzungsänderungen.
- Die Gleichungen der Zustandstransformation und der Outputfunktion werden direkt durch die Bewirtschaftungsregeln beeinflusst.

- Schließlich verursachen Klimaänderungen, die im „unkontrollierbaren Input“ abgebildet werden, unmittelbar einen geänderten Systemzustand, indem z.B. der Wasserrückhalt in der Schneedecke reduziert wird, und damit auch einen geänderten Output.

All diese Veränderungen sind durch Parametrisierungen, die sich z.B. auf die Infiltrationsrate oder die Oberflächenrauigkeit beziehen, modellmäßig abzubilden.

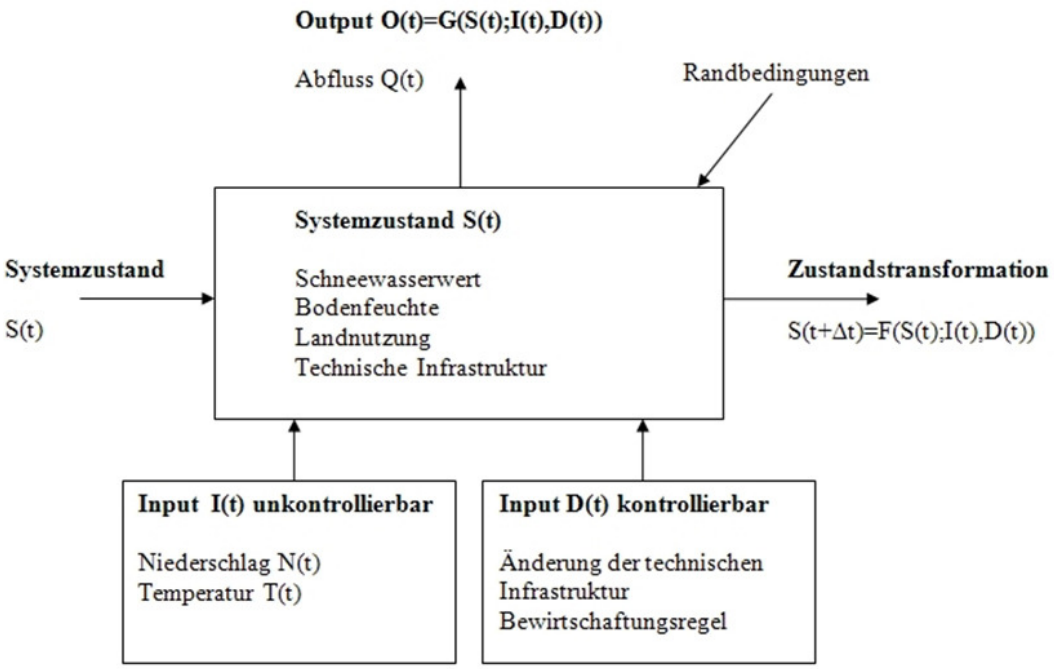


Abb.1: Modellelemente im Zustandsraum

2. Anthropogen bedingte Veränderungen in den Einzugsgebieten

Laut Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 (BMLFUW 2010a) bestehen in Österreich 2544 Wasserkraftanlagen plus etwa 2000 Mikroanlagen. Die Restwasserstrecken sind mit 3158 km ausgewiesen, was 10% des gesamten Gewässernetzes entspricht. In Abbildung 2 sind die Wasserkraftwerke mit einer Leistung größer als 5 MW und die großen Speicher ausgewiesen. Die durch den Flussbau strukturell veränderten Fließgewässer betragen 8206 km, wobei zusätzlich das Gewässerkontinuum noch durch insgesamt 28815 Querbauwerke, bzw. 0,9 Querbauten/Flusskilometer, unterbrochen wird. Angaben zu weggefallenen Retentionsräumen im gewässernahen Bereich liegen keine vor.

Im Hinblick auf die Flächennutzung zeigen sich seit 1830 ebenfalls drastische Veränderungen (KRAUSMANN 2000). Betrug die landwirtschaftliche Nutzfläche im Jahr 1830 1,3 ha/capita, so beträgt sie heute knapp 0,4 ha/capita. Die Siedlungsflächen vergrößerten sich von 1% im Jahre 1830 auf 8% im Jahre 1995 (rund 3000 km^2). Im Grünen Bericht (BMLFUW 2010b) werden geringfügig unterschiedliche Zahlen angegeben. Demnach beträgt 2009 die landwirtschaftlich genutzte Fläche 3,191.000 ha und auf die forstwirtschaftlich genutzte Fläche 3,341.000 ha. Von der landwirtschaftlich genutzten Fläche sind 1,731.000 ha Dauergrünland und 1,389.000 ha Ackerland.

Gemäß ÖROK (2008) wird bis 2030 der Grünflächenanteil weiter schrumpfen, während der Waldanteil zwischen 2-6% bis 2030 zunehmen sollte. Die Siedlungsfläche wird in diesem Zeitraum zwischen 5 und 20% steigen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Veränderungen in der Landnutzung und die intensivierte Wassernutzung, insbesondere die Wasserkraftnutzung, auch Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in den Einzugsgebieten haben.

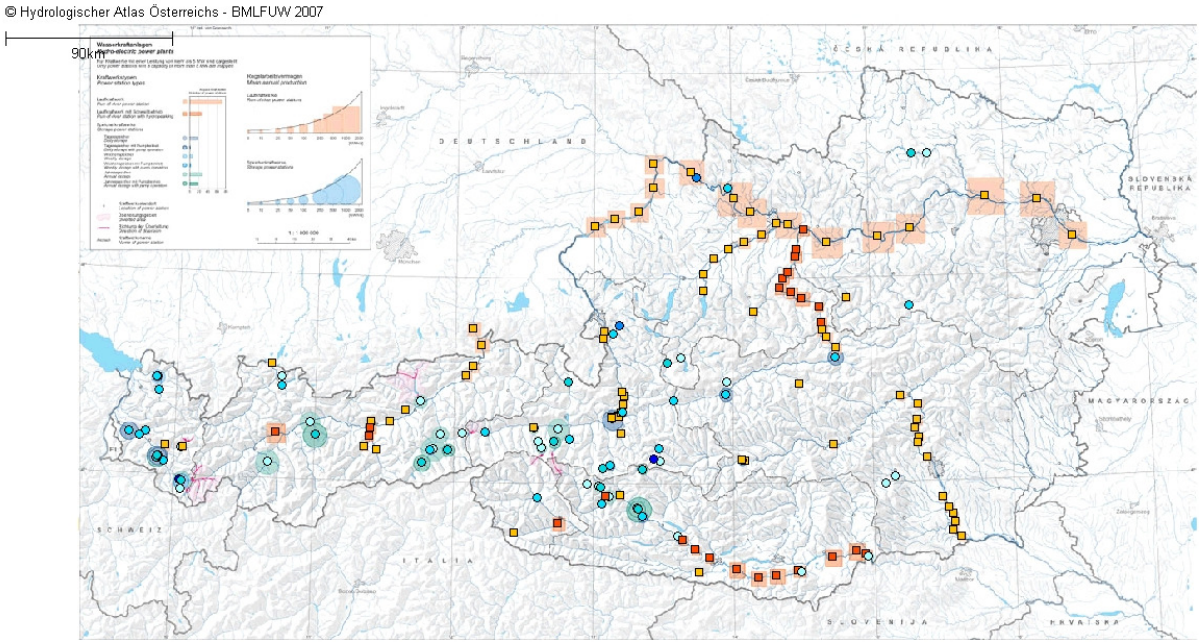


Abb. 2: Wasserkraftwerke (>5MW) und Speicher in Österreich (BMLFUW 2007)

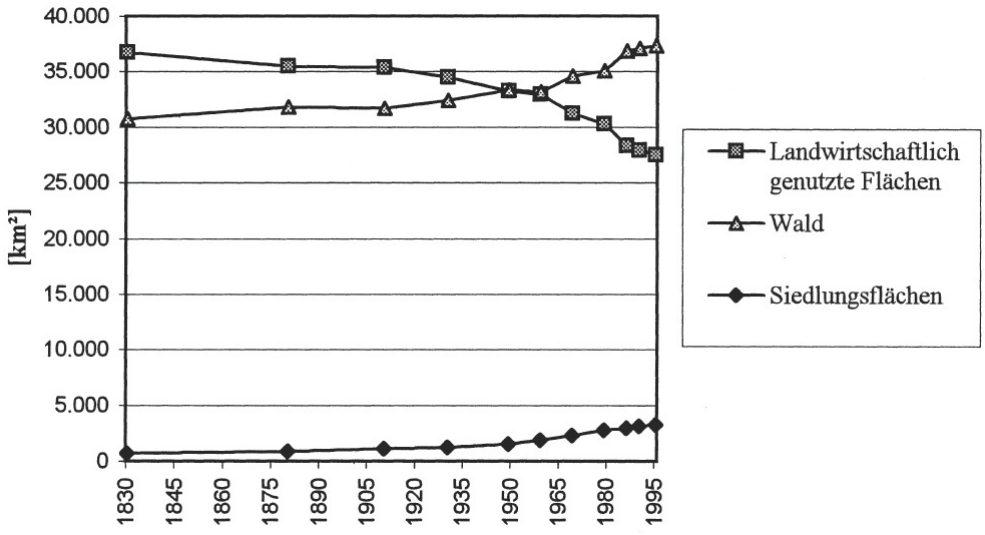


Abb. 3: Die Entwicklung der Landnutzung in Österreich, 1830 bis 1995. (KRAUSMANN 2000).

3. Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf den Wasserhaushalt

Zuerst wird die Veränderung in den Wasserhaushaltsgrößen dargestellt. Dann werden die Einflüsse der Speicherwirtschaft, durch Laufstaue, durch den Flussbau und die Landnutzung

quantifiziert. Die Veränderungen im Wasserhaushalt können durch statistische Parameter beschrieben werden, die auf Trendanalysen der mittleren Jahresabflüsse beruhen, sowie das saisonale Verhalten beschreiben. Weiters kann aus Extremwertanalysen und aus dem dynamischen Verhalten auf anthropogene Einflüsse geschlossen werden. Letztere Größe vergleicht die Abflussspitze mit dem zugehörigen Tagesmittel. Die Arbeitshypothese nimmt an, dass durch die flussbaulichen Maßnahmen Retentionsräume weggefallen sind und dass das Abflussgeschehen durch den Flussbau und durch Laufstaue beschleunigt wurde.
In FÜRST et al. (2008) wurde eine Auswertung aller Niederschlags- und Abflussdaten Österreichs für den Zeitraum 1951-2000 durchgeführt. In der langfristigen Entwicklung des Niederschlages sind geringe Trends im Jahresniederschlag erkennbar, wobei die meisten nicht statistisch signifikant sind. Generell lässt sich eine leichte Zunahme nördlich des Alpenhauptkammes erkennen, während im Süden eher abnehmende Niederschlagsmengen zu beobachten sind. Im Sommerhalbjahr ist im Alpenraum eine leichte Zunahme erkennbar, während im übrigen Gebiet der Niederschlag abnimmt. Die Winterniederschläge nehmen ausgenommen südlich der Alpen zu.
Die Berechnung der Wasserbilanzen erfolgte für 1044 Teileinzugsgebiete, wobei ein räumlich verteiltes Modellkonzept angewandt wurde (NACHTNEBEL & FUCHS 2004; STANZEL & NACHTNEBEL 2010). Als Inputdaten werden Temperatur- und Niederschlagsdaten verwendet.

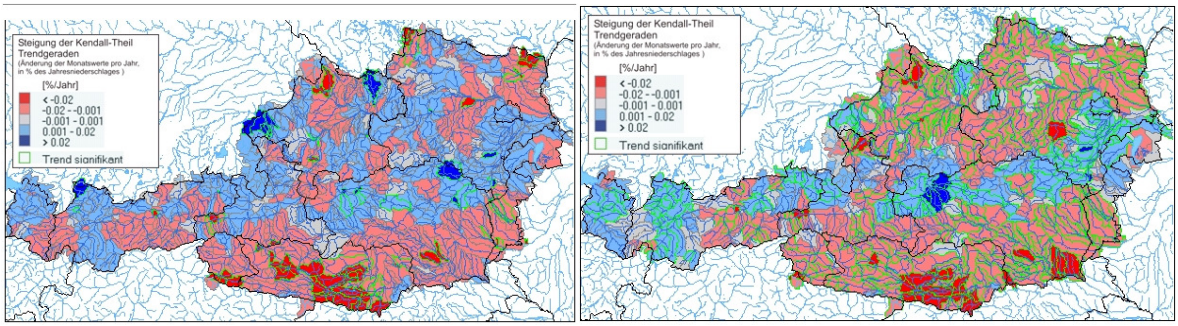


Abb. 4: Trends im Niederschlag (links) und Abfluss (rechts) für den Zeitraum 1961-1990 (aus Fürst et al, 2008)

Beim Abfluss zeigt sich überwiegend eine abnehmende Tendenz, die in 55% der Staatsfläche statistisch abgesichert ist. Die Ursache dafür liegt primär in der erhöhten Verdunstung infolge steigender Temperaturen. Zum Teil mag auch die geänderte Landnutzung einen Anteil haben. Saisonal betrachtet zeigt sich jedenfalls eine Abnahme des Niederschlages und besonders des Abflusses im Sommerhalbjahr, während das Winterhalbjahr Zuwächse aufweist.
Der Speicherbetrieb führt zu einer saisonalen Verlagerung im Abfluss und bewirkt an etlichen Pegelstellen einen negativen Trend im Sommer und einen positiven Trend im Winter. Dies kommt auch in einer reduzierten Varianz der Monatsabflüsse zum Ausdruck. Die meisten Trends zeigen sich an Abflussmessstellen in der Höhenzone von 700-1700 m, wobei wieder das unterschiedliche N-S-Verhalten zu beobachten ist. LEOPOLD (1992) untersuchte die durch Speicher bewirkten Abflussveränderungen. Er weist für den österreichischen Inn und

die Salzach Aufhöhungen im Winter und Abminderungen im Sommer nach, die an einigen Pegelstellen bis zu 30% der monatlichen Mittelwasserführung erreichen. An den Abflussmessstellen der Donau fällt der Einfluss auf etwa 5% der Monatsmittelwerte.
Der Einfluss von flussbaulichen Maßnahmen auf den Wellenablauf wurde mehrfach diskutiert und evaluiert (HELMS et al. 2002, LAMMERSEN et al. 2002, NACHTNEBEL & DEBENE 2005). So ist an der österreichischen Donau bei kleineren und mittleren Hochwässern eine Verschärfung der Hochwasserhäufigkeiten sowie eine Verkürzung der Fließzeiten und eine Verschärfung der Dynamik der Hochwasserwellen festzustellen.

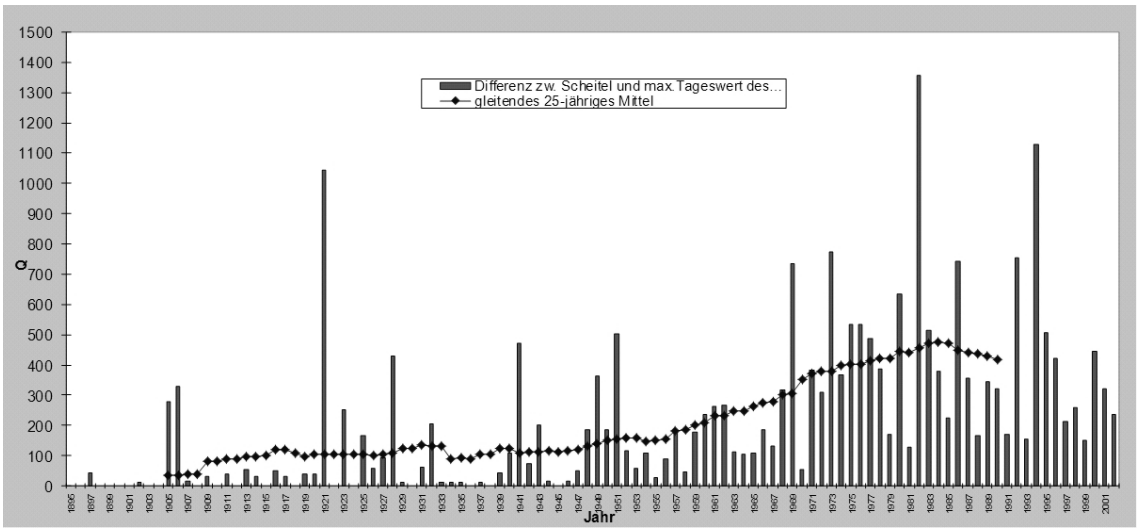


Abb. 5: Differenz zwischen Qmax und maximalen Tagesmittel (Pegel Kienstock, Donau)

Nach einer Untersuchung der Wasserstraßendirektion im Jahre 1996 nahmen die Laufzeiten der Hochwasserscheitel an der Donau deutlich ab. Betrug die Fließzeit von Ybbs nach Wien, was etwa einer Distanz von 100 km entspricht, im Jahre 1954 54-56 Stunden, so betrug diese 1991 nur mehr 16 Stunden. Der Grund liegt in der Errichtung einer nahezu geschlossenen Kette von Laufstauen und dem damit verursachten Verlust an Retentionsräumen. Aus Abbildung 5 ist klar ersichtlich, dass der Unterschied zwischen QMax und dem maximalen Tagesmittel immer größer wird, was ebenfalls auf ein beschleunigtes Abflussverhalten hinweist.
Der Effekt von flussbaulichen Maßnahmen auf die Hochwasserhäufigkeit wurde auch im Einzugsgebiet der Lassnitz untersucht (GURA 1996). Das Einzugsgebiet liegt im Süden Österreichs und weist eine Gesamtfläche von 494,4 km^2 auf. Der ursprünglich mäandrierende Flusslauf der Lassnitz wurde zwischen 1958 bis 1979 über eine Länge von 52 km in Form eines Regeltrapezprofils reguliert und begradigt. Durch diese Maßnahmen wurde eine Gewässerstrecke von 52 km auf knapp 34 km verkürzt. Der Ausbaudurchfluss wurde über längere Gewässerabschnitte auf ein HQ_{50}, abschnittsweise auch auf HQ_{25} ausgelegt. In Ortsgebieten wurden höhere Schutzgrade realisiert. Verbunden mit dem Gewässerausbau erfolgten umfangreiche Entwässerungsmaßnahmen und Geländekorrekturen zur Förderung der Landwirtschaft, wodurch sich auch die Landnutzungsstruktur deutlich veränderte. Als Ergebnis all dieser Maßnahmen wurde die Abflussdynamik beschleunigt, und es traten durch Wegfall der Retentionsräume verstärkt Hochwässer auf, ohne dass eine signifikante Änderung im Niederschlags- und Starkregengeschehen zu beobachten gewesen wäre. Die zeitliche Verände-

rung in der Auftrittshäufigkeit der Hochwässer ist in Form einer partiellen Reihe in Abbildung 6 dargestellt.

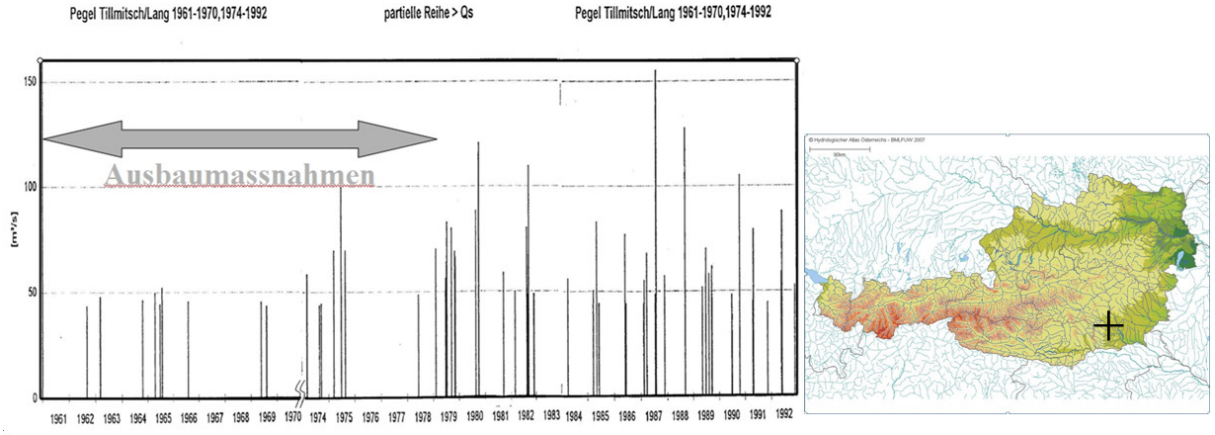


Abb. 6: Partielle Hochwasserreihe am Pegel Tillmitsch (Lassnitz, Steiermark), GURA (1996)

Im Hinblick auf die Wirkung von Landnutzungsänderungen (NIEHOFF 2002) auf das Abflussgeschehen wurde das Einzugsgebiet der Traisen (DEBENE 2006) herangezogen. Seit 1880 erhöhte sich der Waldanteil deutlich und liegt derzeit bei 80%. Die Waldweide mit einem lockeren Baumbestand, meist Mischwald, betrug 1880 rund 50% und wurde zunehmend durch Nadelwälder, teilweise auch durch Laubwälder ersetzt. Der Ackerflächenanteil reduzierte sich von mehr als 10% auf 0,5% der Fläche. Der Versiegelungsgrad ist auch heute noch sehr gering. Die Landnutzungsänderungen wurden primär durch die Wasserentnahme aus den einzelnen Bodenschichten parametrisiert, wobei bei Laubwald eine tiefere Durchwurzelung als bei den dominierenden Fichtenbeständen angenommen wurde. Weiters wurde die Oberflächenrauigkeit im Wald höher angesetzt als auf den vormaligen Weideflächen. Insgesamt zeigten die Simulationen infolge der Zunahme der Waldfläche ein erhöhtes Rückhaltevermögen, wodurch die kleineren Hochwasserereignisse um ca. 30% gedämpft werden. Mit höherer Jährlichkeit nimmt dieser Abfluss dämpfende Effekt ab und beträgt bei HQ_{100} noch etwa 10-15% in der Abflussspitze. Dieser Effekt konnte durch die Simulation eines historischen Ereignisses gut belegt werden. Der Einfluss der flussbaulichen Maßnahmen kompensierte teilweise die Speicherwirkung des Waldes.

4. Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

Für die Beurteilung von hydrologischen Klimafolgen wurden die Daten des regionalen Klimamodell REMO-UBA (UBA 2008) des Hamburger Max-Planck-Institutes für Meteorologie mit einer räumlichen Auflösung von 10x10 km verwendet. Dabei wurden drei verschiedene Szenarien, das A1B, das A2 und das B1 Szenario (IPCC2007) berücksichtigt. Diese drei Emissionsszenarien decken einen weiten Bereich von möglichen Entwicklungspfaden ab. Aufgrund der beträchtlichen Unterschiede zwischen den Modellergebnissen des Kontrolllaufs und den Beobachtungen mussten die Remo-UBA Daten regional korrigiert bzw. angepasst werden. Es wurde der „delta-change“-Ansatz verwendet, um Inputdaten für die Simulation des Wasserhaushalts zu generieren.

Mit diesen Daten wurden hydrologische Szenarien (STANZEL &NACHTNEBEL 2010) für alle Einzugsgebiete Österreichs berechnet. Die räumliche Auflösung des Modells beträgt 1x1 km, womit die Topografie realistisch abgebildet werden kann. Die mit diesem Modell ermittelten Abflusshöhen für 1961 bis 1990 dienten als Referenz für die Veränderungen in den Szenariensimulationen für den Zeitraum 2000 bis 2100.
In alpinen Lagen nehmen tendenziell die Sommer- und Herbstabflüsse ab und die Winterabflüsse steigen. Dabei wurden in einigen Regionen für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts Zunahmen im Winterabfluss von 30-50% berechnet. Obwohl die Klimasimulationen um die Mitte dieses Jahrhunderts zufällige höhere Niederschläge ausweisen, liegen die Jahresabflüsse bereits in größeren Gebieten, insbesondere im Süden, unter jenen zwischen 1961-1990, was durch die erhöhten Verdunstungsverluste zu erklären ist. Für die Zentralalpen sowie für den gesamten Norden, Osten und Nordosten wurden auch für diese Periode im Mittel noch etwas höhere Jahresabflüsse als im Referenzzeitraum simuliert. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für das A1B-Szenario schließlich eine Abnahme des Abflusses für den Großteil des Staatsgebiets prognostiziert. Für große Bereiche im Westen und Süden wurden dabei Abnahmen von 10-20% berechnet.
In den anderen beiden Szenarien wurden für den Jahresabfluss grundsätzlich vergleichbare Trends ermittelt. Auch die räumliche Verteilung in den Änderungen im Abflussverhalten stimmt in den drei Szenarien weitgehend überein. Im Westen und Süden Österreichs ist demnach mit einer Abnahme des Abflusses zu rechnen, im Norden und Nordosten mit einer Zunahme, wobei dies sowohl mengenmäßig sehr gering ist. Der Beitrag der Gletscher zum Abfluss zeigt in den Simulationen ein Maximum zwischen 2050 und 2070 und geht dann rasch zurück, da die Gletscher zunehmend abschmelzen.

5. Zusammenfassender Vergleich anthropogener Eingriffe mit Klimaeinflüssen

Die Wirkungen anthropogener Eingriffe in den Wasserhaushalt sind beträchtlich und zeigen sich sowohl im saisonalen Abflussverhalten als auch in den Extremwerten. Tendenziell nehmen die Wirkungen mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes ab, doch ist auch an den größeren Fließgewässern eine Veränderung, wie in der Abflussbeschleunigung, nachweisbar.
Ähnlich wie durch den Speicherbetrieb, der eine saisonale Abflussumlagerung vom Sommer auf den Winter zur Folge hat, wirkt sich der Klimaeinfluss aus. Der Speicherbetrieb verursacht an Inn und Salzach in den Wintermonaten eine Aufhöhung, die je nach Größe des betrachteten Einzugsgebiets bis zu 35% betragen kann, während im Sommer eine Reduktion um 10-12%, gemessen wird. Ebenso zeigen beide Einflussgrößen eine Reduktion der Varianz in den Monatsabflüssen. Örtlich ist zusätzlich noch der Einfluss von Gletschern zu berücksichtigen, die bis etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts einen erhöhten Beitrag zum Sommerabfluss liefern, der nachfolgend rasch abnehmen sollte.
Die Topografie bestimmt entsprechend den kleinräumigen Klimamodellen ganz wesentlich das zukünftige Verhalten. Im Gegensatz zum Süden ist nördlich der Alpen eine leichte Zunahme des Niederschlages zu erwarten. Durch die erhöhte Temperatur wird aber der Abfluss insgesamt reduziert. Die Abnahme ist Westen und Süden des Landes würde nach dem Simulationsläufen zwischen 10-20% liegen. In den alpinen Regionen, wo die Abflussminima

im Winter auftreten, sollten zukünftig höhere Niederwässer auftreten. Ein Effekt, der auch durch die Speicherwirtschaft verursacht wird. Infolge der großen Unsicherheiten in den Klimamodellen konnten keine klaren Aussagen zu Veränderungen in der Häufigkeit von Hochwasserereignissen getroffen werden. Insgesamt kritisch zu beurteilen ist der Umstand, dass etliche Wirkungen von anthropogenen Eingriffen und Klimaeffekte die gleiche Tendenz aufweisen und sich verstärken.

Literatur

BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.

BMLFUW (2010a): Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 (BMLFUW-UW.4.1.2/0011-I/4/2010)

BMLFUW (2010b): Grüner Bericht; Kapitel 3 Agrarstrukturen und Beschäftigung; S. 64, 2010.

DEBENE, A. (2006): Modellierung anthropogener Eingriffe auf das Hochwasserabflussgeschehen in der Mesoskala. 145 S., Diss.schrift an der Univ. f. Bodenkultur, Wien.

FÜRST, J. et al. (2008): Trends in Niederschlag und Abfluss. Mitteilungsblatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich, Nr. 85, S.1-43, BMLFUW

GURA, M. (1996): Einfluss anthropogener Maßnahmen auf das Abflussgeschehen bei kleinen Einzugsgebieten am Beispiel der Lassnitz. Diplomarbeit am IWHW, Univ. f. Bodenkultur.

HELMS, M. et al. (2002): Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe river). J. of Hydrology 267, 94 – 114.

IPCC (2007): Climate Change; Synthesis Report. Cambridge University Press, UK.

KRAUSMANN, F. (2000): Landnutzung, Energie und industrielle Modernisierung; eine historische Perspektive mit Blick in die Zukunft. Natur und Kultur Jg ½, S.44-61.

LAMMERSEN, A. et al. (2002): Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine. J. of Hydrology 267, 115-124.

LEOPOLD, G. (1992): Großräumige Korrektur von Abflussreihen. 197 S., Dissertationsschrift, Univ. f. Bodenkultur, Wien.

NACHTNEBEL, H.P. & M. FUCHS (2004): Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderung, 56/7-8, 79-92,ISSN 0945-358X

NACHTNEBEL, H.P & A. DEBENE (2005):Hochwassersituation unter dem Einfluss anthropogener Einwirkungen. Im Auftrag der NÖ Landesregierung. Gruppe Wasser, St. Pölten, Österreich.

NIEHOFF, D. (2002): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Brandenburgische Umweltberichte Bd. 11. Inst. f. Geoökologie der Univ. Potsdam, Pf 601553, D-14415 Potsdam.

ÖROK (2008):Szenarien der Raumentwicklung Österreichs 2030 – Materialienband. ÖROK-Schriftenreihe Nr. 176/I,Österr.Raumordnungskonferenz, Wien.

STANZEL, P. & H.P. NACHTNEBEL (2010): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/9-10, 180-187; ISSN 0945-358X

UBA (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, MPI, Deutschland.

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – meteorologische Grundlagen

Wolfgang Schöner, Günter Blöschl, Helmut Kroiß, Alfred Paul Blaschke, Reinhard Böhm, Klaus Haslinger, Norbert Kreuzinger, Ralf Merz, Juraj Parajka, Jose Luis Salinas, Alberto Viglione,

Zusammenfassung:
Im Sommer 2009 wurde ein Konsortium bestehend aus ZAMG (Abteilung Klimaforschung) und TU Wien (Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie und Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft) von der Sektion Wasser des österreichischen Lebensministeriums sowie den wasserwirtschaftlichen Abteilungen aller Bundesländer beauftragt den aktuellen Stand des Wissens über die Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft sowie sich daraus ergebender Anpassungsstrategien zu erarbeiten. Die meteorologisch-klimatologischen Grundlagen dieser Studie werden in diesem Beitrag beschrieben, wobei der Fokus auf hydrologisch relevante Klimaelemente gelegt wird. Für die Beschreibung der Vergangenheit werden sowohl homogenisierte Monatszeitreihen als auch qualitätsgeprüfte Tageszeitreihen verwendet. Die Zukunft (2021-2050) wird durch einen Klimalauf mit dem Regionalmodell CLM (angetrieben vom GCM ECHAM5) für das Szenario A1B relativ zu der Periode 1976-2007 beschrieben. Nach diesem Klimalauf wird die Lufttemperatur in Österreich um ca. 1°C steigen, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter. Die Winterniederschläge werden insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher zunehmen, die Sommerniederschläge werden eher abnehmen. Eine merkliche Veränderung des Sommerniederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten.

1. Einleitung

Im Rahmen der Auftragsstudie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ (ZAMG/TU Wien 2011) war von den Auftragnehmern der aktuelle Stand des Wissens zu diesem Thema zu erarbeiten. Die Studie konnte jedoch nicht auf die Auswertung der bestehenden Literatur beschränkt werden, sondern musste, insbesondere um dem Ziel der Ableitung belastbarer Aussagen als Grundlage möglicher Anpassungsmaßnahmen zu genügen, zusätzliche Datenanalysen durchführen. Gemäß der Ausschreibung waren regionalisierte Aussagen für das Bundesgebiet von Österreich mit einer Bewertung der Unsicherheit der Aussagen abzuleiten. Die dabei entwickelten Anpassungsstrategien waren Ergebnis eines intensiven Diskussionsprozesses zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber. Neben der Erfassung des Stands der Forschung in Österreich, waren auch die Ergebnisse aus dem benachbarten Ausland in die Studie einzubeziehen (z.B. Deutschland: GLOWA, KLIWA; Schweiz: Schweiz2050).

Im Folgenden werden die meteorologischen Grundlagen der Studie vorgestellt. Dabei wird das Wissen aus der Vergangenheit über raum-zeitliche Änderungen hydrologisch relevanter Klimaelemente in Österreich seit dem Beginn instrumenteller Aufzeichnungen den Ergebnissen der Klimamodellierung für die Zukunft gegenübergestellt und es werden sowohl die Ergebnisse der Vergangenheit als auch der Zukunft (Periode 2021-2050) nach ihrer Faktenla-

ge in weiche bis harte Fakten unterteilt. Diese Ergebnisse fließen dann als Eingangsdaten in die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Folgeuntersuchungen ein (siehe ZAMG/TU Wien, 2011).

2. Schema zur Bewertung der Unsicherheiten

Da Aussagen über eine zukünftige Klimaänderung aus komplexen Modellketten abgeleitet werden die selbst wiederum auf Szenarienabschätzungen für die Modelleingangsgrößen (z.B. CO_2 Gehalt der Atmosphäre) beruhen und die zugrunde liegenden Modelle auch Unzulänglichkeiten in der systemaren Modellbeschreibung besitzen, ist eine Bewertung der Unsicherheit der Klimaänderungsgrößen für praktische Anwendungen unerlässlich (siehe auch BLÖSCHL et al. 2011). Der in vielen Studien praktizierte Ansatz statistische Unsicherheitsmaße (z.B. Mittelwert und Streuungsmaße, FREI et al. 2007) aus Ensembleläufe der Klimamodelle zu verwenden, erfasst nur einen Teil der Unsicherheit und klammert die Unzulänglichkeiten der Modellphysik aus. Im Rahmen dieser Studie wurde daher ein Bewertungsschema eingeführt, das die Klimaänderungsgrößen nach ihrer Faktenlage bewertet. Das zugrunde liegende Konzept verbindet die messbare Unsicherheit die sich aus der räumlichen und zeitlichen Skalengröße in der Meteorologie ergibt, mit Expertenwissen über das Modellverständnis einzelner Klimaelemente. Das Konzept ist in Abbildung 1 skizziert. Daraus lässt sich ableiten, dass z.B. lokale Klimaänderungssignale auf kurzer Zeitskala des hygrischen Klimakomplexes (z.B. Gewitter) keine Fakten darstellen, während langfristige regionale/globale Änderungen des thermischen Klimakomplexes (z.B. Änderung der saisonalen Temperatur für Klimanormalperioden) harte Fakten darstellen. Das Konzept wurde in analoger Weise (wobei die Achse „Modellverständnis“ durch „Messgenauigkeit“ zu ersetzen ist) für die Klimavergangenheit angewandt.

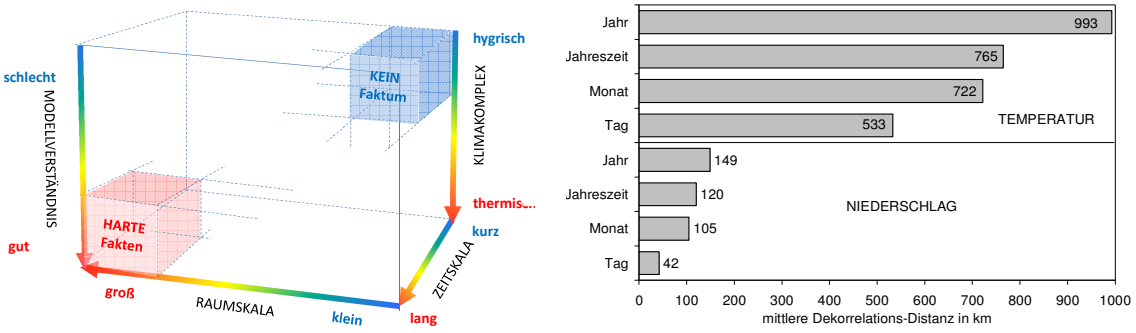


Abb. 1 links: Schema zur Beurteilung der Faktenlage von Klimaänderungssignalen für die Zukunft aus Klimamodellierungen. Rechts: Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Skalengröße für den thermischen und den hygrischen Klimakomplex. Der Zusammenhang wird durch die räumliche Dekorrelationsdistanz charakterisiert, die jener Entfernung angibt, bei der im Mittel die Korrelation zwischen den Messreihen unter 0.5 sinkt (Quelle: BÖHM et al. 2009).

3. Änderung des Klimas in der Vergangenheit in Österreich

Die Alpenregion wird immer wieder als besonders sensibel gegenüber Klimaänderungen beschrieben. Dies trifft jedoch nicht nur auf die oft als Beispiel angeführte Lufttemperatur zu (siehe z.B. AUER et al. 2007), sondern auch auf andere Klimakenngröße wie z.B. die Frosttage (AUER et al., 2005). Insbesondere für hydrologische Prozesse zeigt der Alpenraum eine hohe räumliche Variabilität (SCHMIDLI et al. 2002) und die Klimaänderung manifestiert sich in regional unterschiedlichen Niederschlagtrends (BRUNETTI et al. 2006).

Der Großraum Alpen ist weltweit das Gebiet mit den meisten langen Klimamessreihen, die als homogenisierte monatliche Klimazeitreihen durch die HISTALP-Datenbank vorliegen (AUER et al. 2007, http://www.zamg.ac.at/histalp), die in einer langjährigen internationalen Zusammenarbeit aufgebaut wurde. Im Zuge der Homogenisierung konnten die Zeitreihen von Artenfakten wie Stationsverlegungen, Instrumentenwechsel etc. bereinigt werden. Die HISTALP-Datenbank der ZAMG beschreibt Klimaschwankungen der letzten 150 bis 250 Jahre. Anders als für Monatsdaten basiert das Wissen über die Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags in Österreich aus Tagesbeobachtungen auf einer wesentlich kürzeren Zeitperiode und auf nicht-homogenisierten Daten (StartClim-Datensatz zurück bis 1948, SCHÖNER et al. 2003).

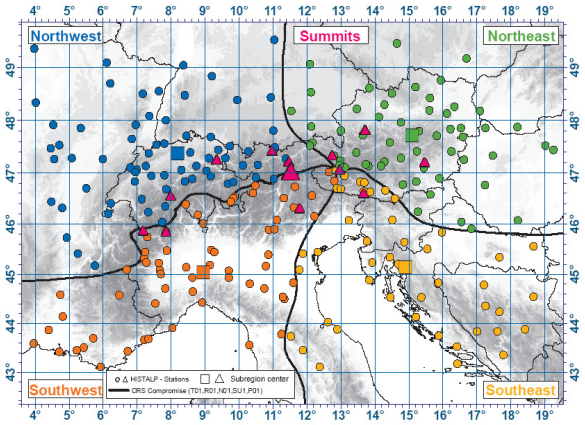


Abbildung 2: Die Haupt-Klimaregionen des Großraums Alpen und das HISTALP-Stationsnetz.

3.1 Ergebnisse aus langjährigen Zeitreihen von homogenisierten Monatswerten (HISTALP)

Die regionalen HISTALP-Temperaturreihen für Österreich in Abbildung 3 (links) zeigen einen einheitlichen Verlauf, es ist daher sinnvoll eine repräsentative Temperaturkurve für Österreich abzuleiten. Abbildung 3 verdeutlicht auch, dass der Temperaturverlauf der letzten beiden Jahrhunderte in Österreich von zwei Langfristtrends charakterisiert war, denen kürzere „dekadische“ Trends überlagert sind. Bei Berücksichtigung von Einzeljahren (hier nicht gezeigt) ergibt sich insgesamt ein absoluter Variationsbereich von mehr als 4°C zwischen dem kältesten Jahr (1829) mit -2,3° unter dem Durchschnitt des 20ten Jahrhunderts und dem wärmsten (1994) mit +2° darüber. Ausgehend von einer warmen Periode um 1800 dominierte bis Ende des 19ten Jahrhunderts ein Sekulartrend von rund -1° pro 100 Jahren, der im 20. Jahrhundert von einem etwa doppelt so starken Erwärmungstrend abgelöst wurde. Die dekadischen Muster zeigen neben dem schon erwähnten Maximum um 1800 weitere Wärme-

phasen um 1820, 1870, 1950 und das aktuelle Maximum, das bisher die höchsten Temperaturen seit Beginn der instrumentellen Messungen brachte. Die Hauptminima wurden von 1830-1850, und 1890 erreicht, und in der Phase zwischen 1950 und 1970 gab es eine Abkühlung, die auch in globalen Temperaturkurven zu sehen ist, und die auf ein Zusammenwirken eines kurzzeitigen (natürlichen) Rückganges der solaren Aktivität mit einem (anthropogenen) Maximum an (abkühlender) Aerosolkonzentration zurückzuführen ist.

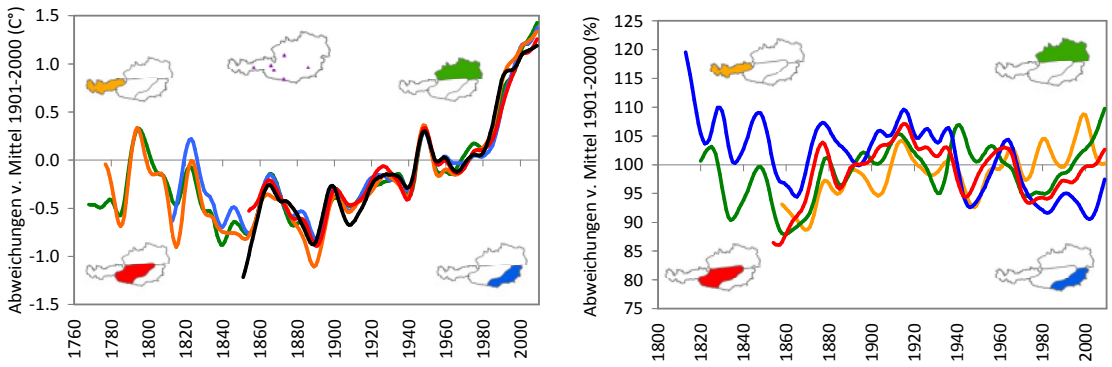


Abb. 3: Geglättete Jahresmittelreihen der Lufttemperatur (links) und des Niederschlags (rechts) für Subregionen Österreichs von Messbeginn bis 2009 gelb: WEST, grün: NORD, rot: INNERALPINE TÄLER, schwarz: hochalpin, blau: SÜDOST (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter)

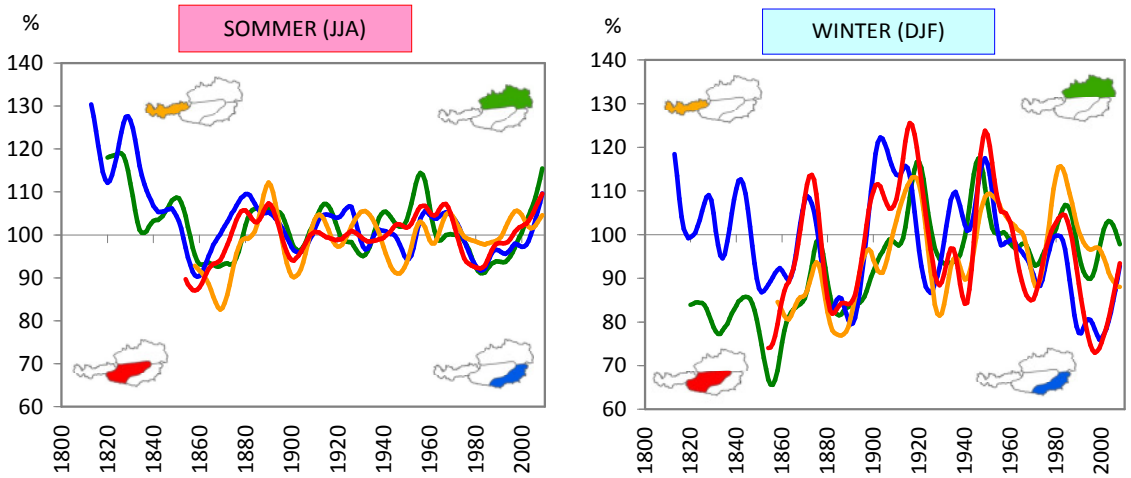


Abb. 4: Geglättete Jahreszeitensummen für Sommer (links) und Winter (rechts) des Niederschlages in vier Subregionen Österreichs von Reihenbeginn bis 2009 (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter)

Anders als bei der Temperaturentwicklung ist die beim Niederschlag bei den Langzeittrends eine regionale Unterschiedlichkeit bis hin zur Gegenläufigkeit (siehe Abbildung 3) zu finden. So dominiert in der Region Südost über den gesamten Zeitraum seit den 1810er Jahren ein fallender Niederschlagstrend, während im Westen Österreichs, zumindest seit den trockenen 1860ern, eine insgesamt steigende Tendenz vorhanden ist. Im Inneralpinum und im Norden ist insgesamt kein Trend zu erkennen, hier dominieren die dekadischen Anomalien. Sowohl für die den Langfristbereich als auch für die dekadischen Schwankungen sind 10-prozentige Trends bzw. Anomalien typisch, im Fall des 200-jährigen Trends im Südosten liegen zwi-

schen dem feuchten Zeitabschnitt vor 1850 und den trockenen 1980ern und 1990ern sogar etwas mehr als 10%. Eine einzige dekadische Anomalie war für alle Subregionen Österreichs gleichzeitig und etwa gleich stark vorhanden, diejenige der trockenen 1860er Jahre. Hier erfolgte überall in Österreich ein rascher Einbruch um 10%, der in der Gletscherregion zum raschen Rückgang nach dem Höchststand um 1850 beitrug, und der z.B. den Neusiedlersee für einige Jahre zur Gänze austrocknen ließ – ein Phänomen, das seither nie mehr aufgetreten ist.
Seit etwa 1970 finden wir im Norden und in den inneralpinen Bereichen Österreichs einen regelmäßigen Anstieg des Niederschlages, der im Norden seit der trockenen Phase davor bereits die Größenordnung von 10% erreicht hat. Im Westen steigen die Niederschlagsmengen ebenfalls, jedoch hier mit einem überlagerten dekadischen Auf und Ab, das wir auch im Südosten finden, hier jedoch mit einem eher stagnierenden jedoch sehr trockenen Niveau, rund 10% unter dem Durchschnitt des 20.Jahrhunderts.
Die bisher besprochenen Trends und Schwankungen der geglätteten Niederschlagsreihen sind, stärker noch als es bereits für die Temperatur gezeigt worden ist, überlagert von einer sehr lebhaften Kurzfrist-Variabilität von Jahr zu Jahr. In typischen Ausreißerjahren (wie etwa das Jahr 2009 für die Region Nord) weichen um 20-25% vom langjährigen Durchschnitt ab, extreme Jahre können sogar zwischen 50 und 150% des Jahrhundertmittels liegen. Diese erhebliche Varianz relativiert die oben besprochenen Trends und dekadischen Anomalien, die nur in wenigen Fällen auch im statistischen Sinn signifikant sind.
Die geglätteten regionalen Niederschlagsentwicklungen sind in Abbildung 3 für den Sommer und den Winter getrennt dargestellt. In den regionalen Saisonaltrends sind nur wenige gemeinsame Entwicklungen zu erkennen, wie etwa die feuchten Sommer vor 1850 (mit der Einschränkung, dass für diese Zeit nur Zeitreihen aus zwei Unterregionen vorhanden sind) und die Trendumkehr der Sommerniederschläge um 1980, die zumindest für drei Subregionen Österreichs die Klimaentwicklung der Niederschläge im „Treibhauszeitalter“ charakterisieren. Ansonsten ist die Langfristentwicklung der Sommerniederschläge eher durch dekadische Schwankungen als durch Langfristtrends gekennzeichnet. Im Winter besteht seit den sehr niederschlagsreichen 1950er Jahren überall in Österreich eine generelle Tendenz zu weniger Niederschlag, die im inneralpinen Bereich und im Südosten stärker ist, als im Norden und Westen. In allen Landesteilen allerdings war dieser Trend in den 1980er Jahren durch ein markantes Niederschlagsmaximum unterbrochen – am stärksten im Westen, am schwächsten im Südosten.

3.3 Ergebnisse aus qualitätsgeprüften Tageswerten (StartClim)

Abbildung 5 zeigt die zeitlichen Trends für die Niederschlagssumme und Zahl der Tage mit Niederschlag. Sowohl für den Winter als auch für den Sommer ist eine gute Übereinstimmung der Trends für die Niederschlagssumme und Niederschlagshäufigkeit zu finden. Auch die Niederschlagsintensität (hier nicht gezeigt) zeigt ebenfalls ein ähnliches Bild wie die Niederschlagssumme. Daraus ist abzuleiten, dass mit guter Annäherung Veränderungen der Niederschlagsumme sowohl aus einer Änderung der Niederschlagshäufigkeit als auch aus der Änderung der Niederschlagsintensität resultieren. Weiters sieht man, dass aus den räumlichen Trends die Aussage über die Zunahme des Niederschlags seit ca. 1975 noch

etwas verfeinert wird, da die Niederschlagszunahme besonders im Sommer zu sehen ist, während im Winter eine Abnahme im Südosten einer Zunahme im Norden gegenübersteht.
Auch wenn keine Aussagen basierend auf statistisch signifikante Ergebnisse gemacht werden können, ist aus der Auswertung auch umgekehrt abzuleiten, dass sich zeitliche Veränderung von Tagen mit großen mittleren Intensitäten auch in den Niederschlagssummen widerspiegeln (siehe Abbildung 5). Die festgestellten Trends der Niederschlagssummen für Österreich für 1976-2007 aus den qualitätsgeprüften Tagesdaten decken sich auch sehr gut mit den festgestellten raum-zeitlichen Trends der homogenisierten HISTALP Daten (siehe Abbildung 4).

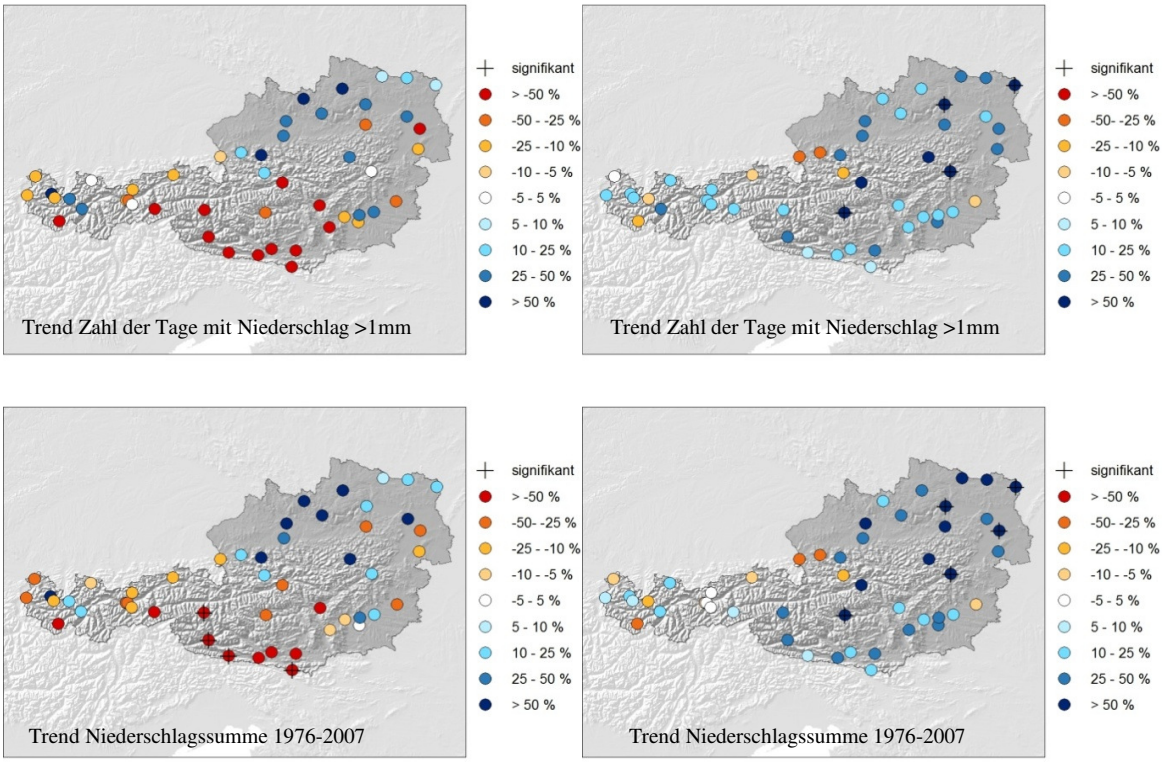


Abb. 5: Trends der Tage mit Niederschlag >1mm und der Niederschlagssumme im Winter (DJF) und Sommer (JJA) für die Periode 1976-2007, aus qualitätsgeprüften aber nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten. Signifikante Trends (95% Signifikanzniveau) sind mit einem + gekennzeichnet.

4. Klimaszenarien für Österreich

Eine rechnerisch-physikalische Simulation des künftigen Klimaverlaufs setzt eine Abschätzung des Verlaufs der Klimaantriebe in der Zukunft voraus. Typischerweise werden dazu AOGCMs (Atmopshere-Ocean-Global-Circulation Models) zweimal laufen gelassen, einmal ohne Veränderung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen äußeren Antriebe und einmal unter dem Einfluss von erwarteten Konzentrationsänderungen der anthropogenen Treibhausgase, die sich aus Abschätzungen der künftigen politischen, wirtschaftlichen, sozialen, technologischen Entwicklungen ergeben. Es ist hier zu betonen, dass die Zukunftsabschätzung lediglich die anthropogenen Klimaantriebe umfasst. Über die Entwicklung der für das kommende Jahrhundert wesentlichen natürlichen Antriebe (Solarintensität und

explosive Vulkanausbrüche) gibt es keine physikalisch fundierten Prognosen. IPCC (IPCC 2007) hat für die Erwartungen der anthropogenen Klimazukunft des 21. Jahrhunderts zahlreiche „Entwicklungsfamilien“ abgeleitet, deren Unterschiede zumindest eine ebenso hohe zusätzliche Unsicherheit zu der aus den mathematisch-physikalischen Modellunsicherheiten resultierenden hinzufügt. Die räumliche Auflösung der Globalmodelle ist jedoch zu gering (Größenordnung 100km), um für Österreich räumlich differenzierte Ergebnisse ableiten zu können. Es ist daher offensichtlich, dass die Informationen der GCMs räumlich weiter verfeinert werden müssen (Downscaling).

Es ist mittlerweile in der Klimamodellierung Stand der Forschung nicht auf das Ergebnis eines einzelnen Modells aufzubauen, sondern Ensemblesläufe zu verwenden. Ein derartiger Ansatz hätte jedoch den Rahmen der Studie (sowohl zeitlich als auch finanziell) bei weitem gesprengt. Ein Vergleich der verschiedenen Emissionsszenarien zeigt jedoch, dass erst nach ca. 2050 eine unterschiedliche Entwicklung zu erwarten ist. Daraus ergab sich für diese Arbeit die Strategie, den Überlegungen nur ein Szenario (A1B) zugrunde zu legen, da lediglich eine Abschätzung bis zur Jahrhundertmitte Gegenstand der Studie ist.

Es gab mehrere internationale Projekte zur regionalen Klimamodellierung die für Österreich relevante Ergebnisse erarbeitet haben (Gobiet, 2010), wie etwa die Multiensembleläufe des EU-Projektes PRUDENCE (prudence.dmi.dk). Die aus PRUDENCE vorliegenden Klimaszenarien haben eine räumliche Auflösung von 50 km, was für viele Impactanwendungen zu grob ist. Für das EU-Projekt ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) wurden durchgehende Szenarien von 1950 bis 2050 für 17 Simulationen berechnet die alle das Emissionsszenario A1B verwenden und in einer räumlichen Auflösung von 25km vorliegen. Daneben liegen auch 2 Regionalmodellläufe aus Deutschland vor die das Gebiet von Österreich abdecken. Das ist einerseits der transiente REMO-UBA Lauf (JACOB et al. 2007) der die Periode 1950 bis 2100 mit einer räumlichen Auflösung von 10km simuliert. Andererseits steht der transiente Lauf mit dem Modell COSMO-CLM (HOLLWEG et al. 2008), der die Periode 1960 bis 2100 abdeckt. Beide Simulationen werden von ECHAM5 SRES A1B angetrieben. Da die Modelläufe aus ENSEMBLES zum Zeitpunkt der Studie noch nicht zur Verfügung standen, wurden die zwei zuletzt genannten Modelläufe (REMO, CLM) im Rahmen der Studie verwendet.

Die Modellläufe mit REMO und CLM ermöglichen keine Angaben von Modellunsicherheiten, da es sich jeweils um eine singuläre Zeitreihe handelt. Um die Unsicherheit die sich aus Ensemblesläufen ergibt für den in dieser Studie verwendeten CLM Lauf berücksichtigen zu können, wurden die Ergebnisse des CLM Laufs in den Kontext der PRUDENCE Ensemblesläufe (OCCC, 2007; FREI et al. 2007) gestellt. Abbildung 6 zeigt das für die Lufttemperatur und den Niederschlag, wobei zwischen den Regionen südlich (HISTALP Region SO) und nördlich der Alpen (HISTALP Region NW) unterschieden wird und für jede Region und alle vier Jahreszeiten die Spannweite der Modellrealisationen der PRUDENCE-Ensemblesmitglieder sowie die entsprechenden CLM Werte dargestellt sind. Der Vergleich zeigt, dass der verwendete CLM-Lauf im Allgemeinen einen mittleren Zustand der Klimaveränderung beschreibt, also eine hohe Plausibilität im Hinblick auf die Modellierung besitzt.

Aus Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass die zukünftige Klimaänderung sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag am stärksten für den Sommer simuliert wird. Für die

Lufttemperatur zeigt sich bis 2030 kaum eine signifikante Änderungen, bis 2050 sind teilweise schon deutliche Änderungen zu finden, die stärksten Änderungen ergeben sich aber erst nach 2050. Für den Niederschlag ist die zeitliche Entwicklung des Trends im Sommer ähnlich wie für die Temperatur, im Winter zeigt das CLM Modell aber schon bis 2030 eine deutliche Zunahme die sich danach dann abschwächt.

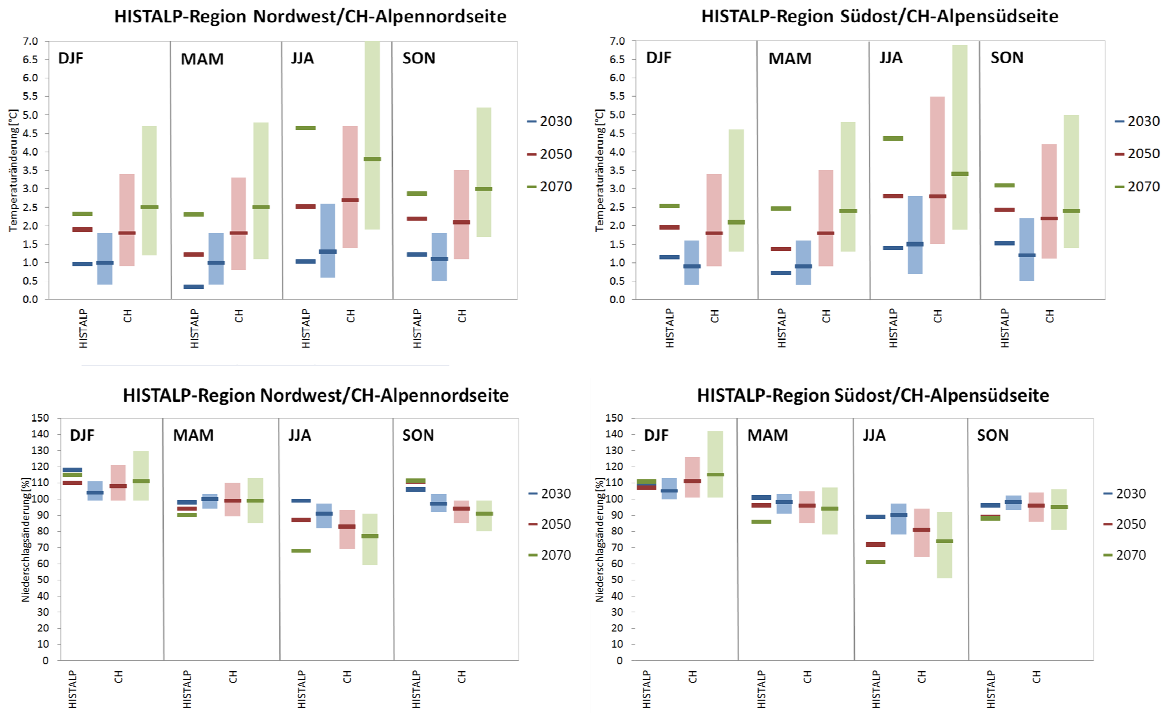


Abb. 6: Änderungen der saisonalen Mitteltemperaturen (oben) und des saisonalen Niederschlags (unten) in den 2 HISTALP-Regionen NW und SO aus CLM (Szenario A1B), dargestellt als horizontale Balken, und aus PRUDENCE Ensemble Analysen für die Schweiz (CH) der Studie (Szenarien A2 und B2), dargestellt werden die Quantilsbereiche im 95% Konfidenzintervall sowie der Median als horizontaler Balken, gemittelt jeweils 30-jährig um die Zeitpunkte 2030, 2050 und 2070 (Datenquelle: Prudence Daten: FREI et al. 2007 und CLM: HOLLWEG et al. 2008).

5. Schlussfolgerungen

Untersuchungen zur Veränderung des Klimas in der instrumentellen Periode in Österreich zeigen, dass die Jahr-zu-Jahr Änderungen (der Temperatur, des Niederschlags, der Schneedeckendauer, etc.) viel größer sind als langfristige Trends des Klimas. Langfristige Trends bleiben daher oft nicht-signifikant. Diese Eigenschaft des Klimas ist auch auf die Zukunft zu übertragen. Die Messdaten zeigen, dass in den 1970er Jahren eine markante Umstellung im Klimasystem für den Alpenraum stattgefunden hat. Seit damals liegt in ganz Österreich ein stark steigender Temperaturtrend vor. Auch beim Niederschlag, insbesondere im Nordosten Österreichs, fand ein markanter Trendwechsel statt.

Umfangreiche Klimamodellrechnungen (regionale Klimamodellierung unter Verwendung verschiedener globaler Antriebsmodelle und verschiedener Szenarien) für Österreich sind derzeit noch nicht abgeschlossen und können erst in Zukunft für Impactuntersuchungen ver-

wendet werden. Derzeit muss noch auf Modellierungen aus verschiedenen Projekten (ohne speziellen Fokus auf Österreich) zurückgegriffen werden.

Betreffend Unsicherheiten der Aussagen sind die folgenden 3 Feststellungen wesentlich:

a) Generell besteht ein Gefälle bei der Sicherheit der Aussagen von Klimamodellen von großräumig-langfristig-(gut) zu kleinräumig-kurzfristig (schlecht).
b) Ein analoges Gefälle besteht von Aussagen über die Lufttemperatur (gut) zu Aussagen über den Niederschlag (schlecht).
c) Extremwerte sind per Definition kleinräumig und kurzfristig weshalb sie sich nach dem derzeitigen State-of-the-art einer Vorhersage weitestgehend entziehen. Aus a) und b) folgt, dass das besonders für Extremwerte des Niederschlags gilt.

Aufbauend auf das entwickelte Schema der Faktenlage „Weich bis Hart“ zur Berücksichtigung der Unsicherheiten betreffend Klimaveränderungen in Vergangenheit und Zukunft können folgende Aussagen über Veränderungen hydrologisch relevanter Klimaelemente für Österreich getroffen werden:

1. Die Lufttemperatur hat in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre deutlich (fast 1.5 °C) zugenommen. Es handelt sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend. Die Zunahme war stärker im Sommer (fast 2°C) als im Winter (ca. 1°C) (harte Aussage).
2. Die Jahressummen des Niederschlags sind seit der Mitte der 1970er Jahre überall gestiegen, außer im Südosten, wobei die Zunahme im Norden und inneralpin monoton ansteigend war (mehr als 15% im Norden, ca. 10% inneralpin), im Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt war (harte Aussage).
3. Die Winterniederschläge sind seit der Mitte der 1970er Jahre nördlich des Alpenhauptkammes etwas gestiegen, südlich des Alpenhauptkammes deutlich gefallen. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren (harte Aussage).
4. Die Lufttemperatur wird in Österreich gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 um ca. 1° C steigen, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter (harte Aussage).
5. Gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 werden die Winterniederschläge insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher zunehmen, die Sommerniederschläge werden eher abnehmen. Eine stärkere Veränderung des Niederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten (mittelharte Aussage).
6. Die potentielle und auch die aktuelle Verdunstung werden gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 zunehmen (mittelharte Aussage). Die Größenordnung der Änderung ist jedoch unsicher.
7. Kleinräumige Änderung des Niederschlags sind ebenfalls zu erwarten (weiche Aussage). Die derzeitigen Modellergebnisse sind jedoch unzuverlässige und widersprüchlich.
8. Die Aussage, dass Extremwerte des Niederschlags auf Grund der höheren Niederschlagssummen im Winter und des auf Grund physikalischer Zusammenhänge mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg einhergehenden höheren Feuchtegehaltes der Atmosphäre im Sommer (konvektive Ereignisse) zunehmen ist derzeit spekulativ, da die bisherigen Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit keine Hinweise auf eine Zunahme von Extremniederschlägen ergeben.

Danksagung

Diese Studie wurde im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs durchgeführt. Die Bereitstellung des WCRP CMIP3 Multi-Modell Datensatzes durch verschiedene Modellgruppen, dem "Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI)" und der „WCRP's Working Group on Coupled Modelling (WGCM)" war eine wesentliche Grundlage für diese Studie. Ebenso war die Bereitstellung des verwendeten COSMO-CLM Laufs und des REMO Laufs durch die CERA-Datenbank (World Data Center on Climate) die Grundlage für die Szenarienabschätzung für Österreich.

Literatur

AUER, I., R. BÖHM, A. JURKOVIC, W. LIPA, A. ORLIK, R. POTZMANN, W. SCHÖNER, M. UNGERSBÖCK, C. MATULLA, K. BRIFFA, P.D. JONES, D. EFTHYMIADIS, M. BRUNETTI, T. NANNI, M. MAUGERI, L. MERCALLI, O. MESTRE, J.-M.MOISSELIN, M. BEGERT, G. MÜLLER-WESTERMEIER, V. KVETON, O. BOCHNICEK, P. STASTNY, M. LAPIN, S. SZALAI, T. SZENTIMREY, T. CEGNAR, M. DOLINAR, M. GAJIC-CAPKA, K. ZANINOVIC, Z. MAJSTOROVIC & E. NIEPLOVA (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology***27**: 17-46

AUER I., C. MATULLA, R. BÖHM, M. UNGERSBÖCK, M. MAUGERI, T. NANNI & R. PASTORELLI (2005): Sensitivity of Frost Occurrence to Temperature Variability in the European Alps. International Journal ofClimatology 25: 1749-1766.

BRUNETTI, M., M. MAUGERI, T. NANNI, I. AUER, R. BÖHM, W. SCHÖNER (2006): Precipitation variability and changes in the greater alpine region over the 1800-2003 period. Journal of Geophysical Research, Vol III, D11107, doi:10.1029/2005JD006674.

FREI, C., P. CALANCA, CH. SCHÄR et al. (2007): Grundlagen. In: Klimaänderung und die Schweiz 2050 - Erwartete Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC/ProClim, Bern.

GOBIET, A. (2010): Klimamodelle und Klimaszenarien für Österreich. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Hrsg.). Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich – Präsentation aktueller Studien. Wien, Österreich 11-24

HOLLWEG, H.D., U. BÖHM, I. FAST, B. HENNEMUTH, K. KEULER, E. KEUP-THIEL, M. LAUTENSCHLAGER, S. LEGUTKE, K. RADTKE, B. ROCKEL, M. SCHUBERT, A. WILL, M. WOLDT & C. WUNRAM (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forcedwith IPCC AR4 Global Scenarios. M & D Technical Report 3, 2008.

IPCC, 2007. Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vuknerability.. Working Group II Contribution to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press,* 976 Seiten

JACOB D., H. GÖTTEL, S. KOTLARSKI, P. LORENZ & K SIECK (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien

für Deutschland. Umweltbundesamt, Forschungsbericht 204 41 138, Climate Change, 11/08 ISSN 1862-4359

OcCC, 2008: Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. OcCC - Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, 47 pp. ISBN: 978-3-907630-33-4

SCHMIDLI, J., C. SCHMUTZ, C. FREI, H. WANNER & C. SCHÄR (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *Int. Journal ofClimatology***22**: 1049-1074, doi: 10.1002/joc.769

SCHÖNER W., I. AUER, R. BÖHM & S. THALER (2003): Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertbasis im Hinblick auf Extremwertanalysen. StartClim- Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich., Endbericht Projekt 1, 1-39.

ZAMG/TU-Wien Studie (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Endbericht. Lebensministerium

Klimawandel in Österreich - Auswirkungen auf Oberflächen- und Grundwasser

Juraj Parajka, Alfred Paul Blaschke, Ralf Merz, José Salinas, Günter Blöschl

Zusammenfassung
Die traditionelle Szenarienmethode für Klimaimpaktstudien ist problematisch, da sie große, schwer quantifizierbare Unsicherheiten aufweist. Deswegen werden in der hier beschriebenen Studie mehrere sich ergänzende Methoden herangezogen, um Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Grund- und Oberflächenwasserressourcen in Österreich zu treffen.

1. Einleitung

Die Abschätzung möglicher Änderungen des Wasserdargebots der Oberflächenwässer zufolge Klimaänderung ist methodisch herausfordernd, da eine Vielzahl von Unsicherheiten die Aussage erschwert (BLÖSCHL & MONTANARI 2010). Deswegen ist es notwendig, die Untersuchungen auf eine möglichst solide methodische Basis zu stellen. Dem grundsätzlichen Ansatz der Wissenschaft folgend, wird es hier als notwendig erachtet, die Fragestellung mit mehreren Methoden zu untersuchen, die sich in Hinblick auf Daten und Annahmen unterscheiden. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuverlässigkeit der Aussage erhöht wird. Die zwei üblichen Ansätze, Trendanalysen und Szenarienanalysen, unterscheiden sich wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen. Während die Trendanalysen vor allem datenbasiert sind, liegt der Schwerpunkt bei Szenarienanalysen auf der Modellierung. Bei letzteren gibt es Unsicherheiten einerseits bei den Klimaszenarien, andererseits bei der Übertragung dieser Szenarien auf den Abfluss. Bei den Trendanalysen ist die Übertragbarkeit auf die Zukunft fraglich und das Beobachtungsfenster hat meist einen entscheidenden Einfluss auf die Aussage. Wegen dieser Unsicherheiten werden hier zwei zusätzliche, neue Methoden angewandt: die Elastizitätsmethode, die auf einer Analyse der zeitlichen Variabilität der Daten basiert und die „Trading space for time“ Methode, die auf einer Analyse der räumlichen Variabilität der Daten basiert. In Hinblick auf Modellannahmen und Datenbasiertheit liegen diese beiden neuen Methoden zwischen Trendanalyse und Szenarienansatz. Es ist deshalb eine wertvolle Ergänzung zu erwarten. Im Folgenden werden vorerst die Änderungen des Abflusses in Österreich besprochen. In einem zweiten Schritt wird kurz auf die Änderungen der Grundwasserverhältnisse eingegangen.

2. Trendanalysen

Für die Trendanalysen wurden Reihen der Jahresabflüsse und der Vierteljahresabflüsse an ca. 500 österreichischen Pegeln ausgewertet. Die Trends wurden mittels des Mann-Kendall-Test unter Entfernung der Autokorrelation (YUE al. 2003) auf Signifikanz getestet. Die Sommerabflüsse im Zeitraum 1976-2007 (Abbildung 1 links) zeigen überwiegend fallende Trends. Besonders im Westen Österreichs sind signifikant fallende Sommerabflüsse zu verzeichnen, im Osten Österreichs eher steigende Trends. Letztere sind auf die deutlich steigenden Niederschläge in dieser Periode zurückzuführen (BLÖSCHL et al. 2011, Abbildung 2). Bei den Winterabflüssen sind im Süden Österreichs fallende Trends festzustellen (Abbildung 1 rechts), im restlichen Bundesgebiete halten sich steigende und fallende Trends die

Waage. Wenn man die letzten Jahrzehnte als Indikator für die nächsten Jahrzehnte verwendet, ist es klar, dass die oft getätigte Aussage von zukünftig höheren Winterabflüssen und geringeren Sommerabflüssen zu vereinfachend ist. Entscheidend bei derartigen Trendanalysen ist die Wahl des Zeitfensters. Für die längere Periode 1950-2007 beispielsweise, treten zwar fallende Winterabflüsse im Süden Österreichs auf, jedoch kaum signifikante Trends in den Sommerabflüssen (ZAMG/TU-Wien Studie 2011). Die Abbildung 2 zeigt die Häufigkeiten der Trends, getrennt nach Gebieten nördlich und südlich des Alpenhauptkammes.

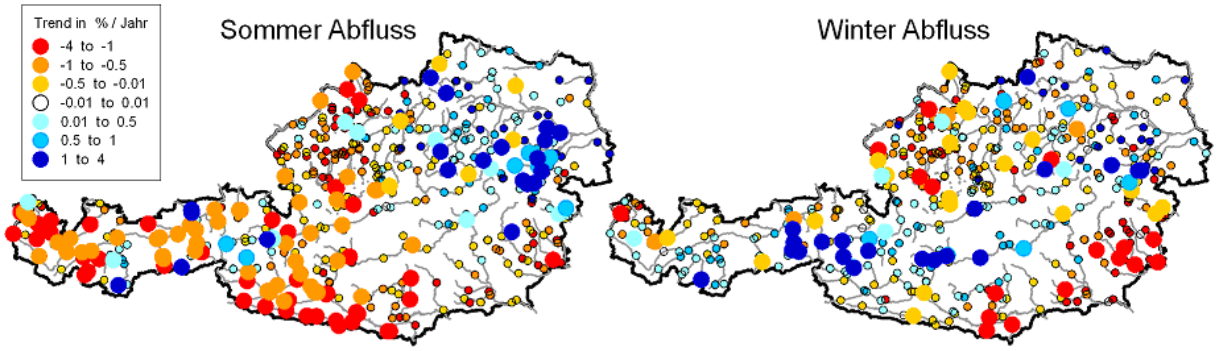


Abb. 1: Trends der Sommerabflüsse (Juni-August, links), Winterabflüsse (Dezember-Februar, rechts) für die Periode 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5% an jeweils beiden Enden der Verteilung).

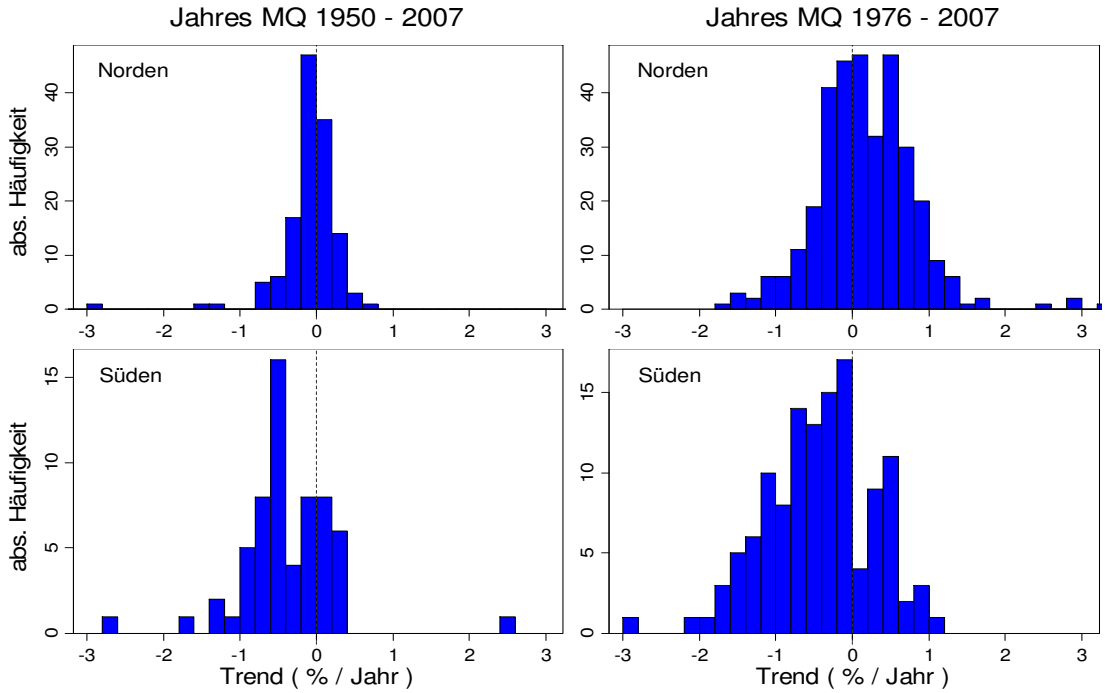


Abb. 2: Häufigkeiten Trends der Jahresabflüsse in der Periode 1950-2007 (links) bzw. 1976-2007 (rechts) für Gebiete nördlich (oben) und südlich (unten) des Alpenhauptkammes in Österreich.

3. Szenarienanalysen

Für die Szenarienanalysen wurde der Delta-Change Ansatz herangezogen (PEEL & BLÖSCHL 2011). Dabei wurden die monatlichen Mittelwerte der mit dem CLM Klimamodell für den Zeitraum 2021-2050 simulierten Lufttemperaturen und Niederschläge mit den ebenfalls simulierten Werten des Zeitraumes 1976-2006 verglichen. Die sich daraus ergebenden Differenzen der Lufttemperatur wurden für jedes Modellrasterelement zu den beobachteten Tageswerten der Lufttemperatur 1976-2006 addiert. Analog wurden die beobachteten Niederschläge mit dem Verhältnis zwischen den simulierten Niederschlägen der beiden Zeiträume multipliziert. Anschließend wurden zweierlei Niederschlag-Abflusssimulationen für die Einzugsgebiete in Österreich durchgeführt. Der erste Satz von Simulationen verwendete beobachtete Niederschläge und Lufttemperaturen für den Referenzzeitraum 1976-2006. Im zweiten Satz von Simulationen wurden die mittels des Delta-Change Ansatzes veränderten beobachteten Niederschläge und Lufttemperaturen 1976-2006 verwendet, die für den Zeitraum 2021-2050 als maßgebend angesehen wurden. Die zukünftigen Änderungen im Abfluss konnten somit durch Vergleich der Szenariosimulationen mit den Referenzsimulationen abgeschätzt werden.

Für die Sommerabflüsse berechnet das Modell eine Abnahme im Westen Österreichs um ca. 10-20% (2021-50 im Vergleich zu 1976-2006, Abbildung 3 links). Diese Abnahme ist überwiegend auf eine Abnahme der projizierten Niederschläge und eine zunehmende Verdunstung zurückzuführen Für die Winterabflüsse wird für fast ganz Österreich eine Zunahme berechnet, die bis zu 20% beträgt. Diese stimmt prozentmäßig weitgehend mit der projizierten Zunahme der Winterniederschläge überein. In Abbildung 4 ist die zu erwartende Verschiebung des mittleren Abflussregimes für den Zeitraum 2021-50 (rot) im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 (blau: simuliert, grün: beobachtet) für ausgewählte Einzugsgebiete dargestellt. Generell ist eine Verschiebung der Sommer in die Winterabflüsse festzustellen, die aber räumlich unterschiedlich ausgeprägt ist. Die Änderungen in den mittleren Jahresabflüssen sind klein. Die Simulationen sind, wie erwähnt, mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet, die in SCHÖNER et al. (2011) (Klimaprojektionen) und MERZ et al. (2011) (Abflusssimulationen) diskutiert werden.

4. Elastizität (zeitlich)

Als dritter Ansatz zu Einschätzung der zukünftigen Abflusssituation wurde die Elastizitätsmethode gewählt, bei der die prozentuale Änderung in einer Variablen mit der prozentualen Änderung einer anderen Variablen in Beziehung gesetzt wird (SANKARASUBRAMANIAN et al. 2001). In dieser Studie wurde die Änderung der jährlichen Mittelwerte des Abflusses von über 500 Einzugsgebieten in Beziehung mit dem Niederschlag und der Lufttemperatur gesetzt. Die Elastizität des Abflusses auf den Niederschlag liegt in Österreich zwischen 0.5 und 2. Am größten ist sie im Norden und im Südosten Österreichs mit Werten von bis zu 2. Das bedeutet, dass z.B. eine Änderung des Jahresniederschlags von 10% eine Änderung des Jahresabflusses von 20% bewirkt. In den niederschlagsreichen Gebieten Österreichs ist die Elastizität geringer. Die Elastizität des Abflusses auf die Lufttemperatur liegt im Norden und Südosten Österreichs um –50. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d.h. ca. 2,7K) zu einer Verringerung des Abflusses um 50% führt. Im Rest Österreichs ist

der Elastizitätsindex betragsmäßig wesentlich kleiner. Im Zentrum Österreichs ist der Index positiv mit Werten von 10 bis 20. Das bedeutet, dass in diesen Gebieten eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d.h. 2.7°) zu einer Erhöhung des Abflusses um 10 bis 20% führt.

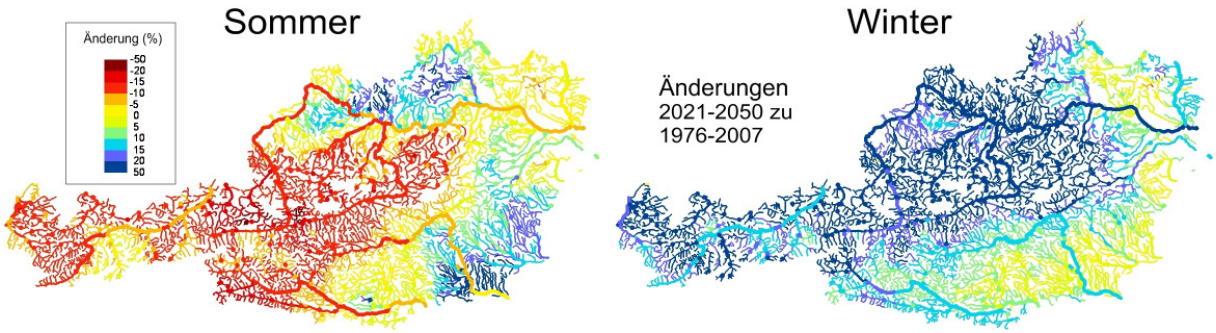


Abb. 3: Änderungen des Sommerabflusses (Juni-August, links) und des Winterabflusses (Dezember-Februar, rechts) in % für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodel. Blau: Zunahme, rot: Abnahme (Klimaszenario CLM-ECHAM5-A1B).

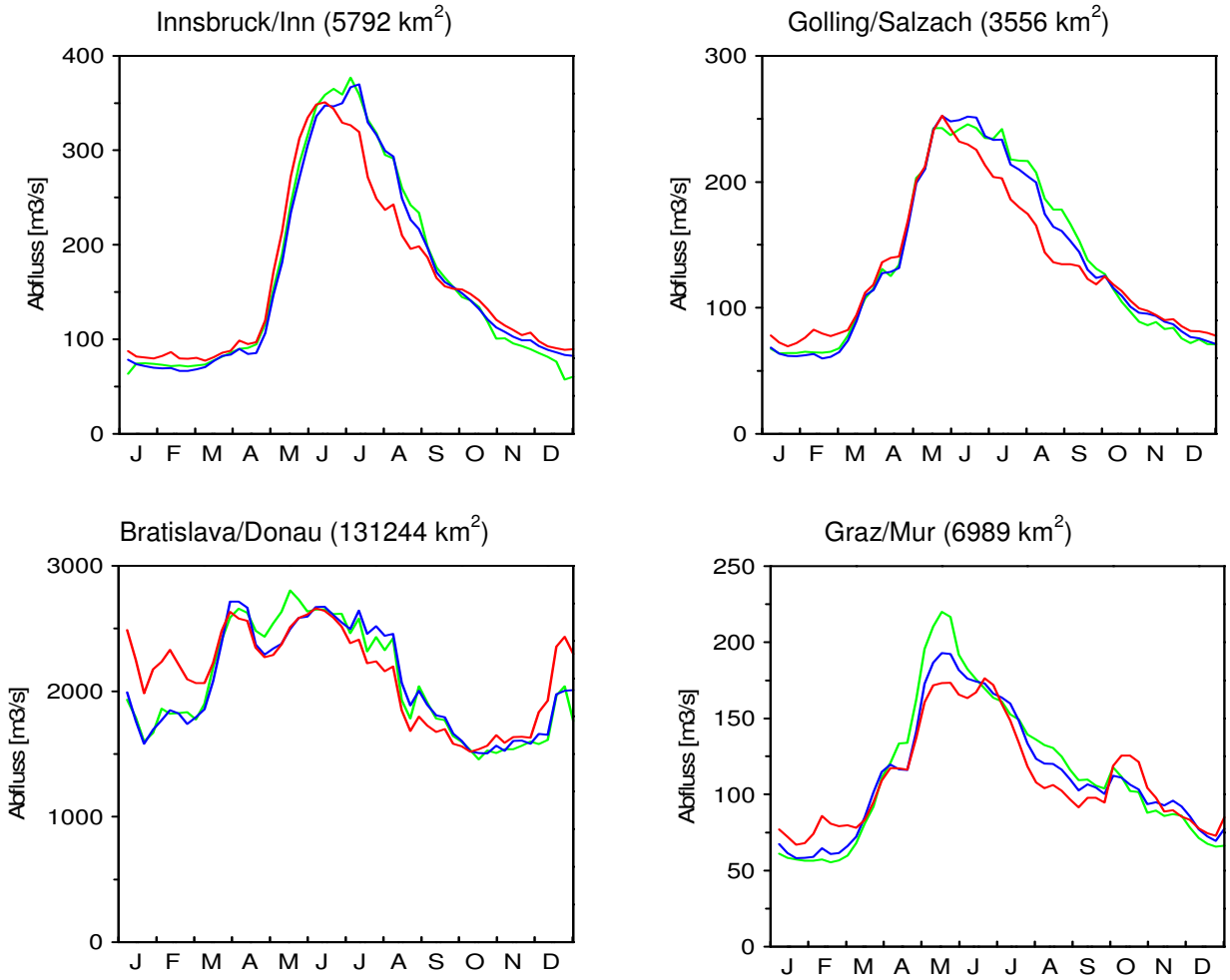


Abb. 4: Verschiebung des mittleren Abflussregimes für den Zeitraum 2021-50 (rot: Szenario) im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 (blau: simuliert, grün: beobachtet) für ausgewählte Einzugsgebiete in Österreich.

5. Trading space for time (räumlich)

Die grundsätzliche Idee des vierten Ansatzes, Trading space for time, besteht darin, den räumlichen Zusammenhang zwischen Niederschlag, Lufttemperatur und Abfluss zu analysieren, und diesen für die Abschätzung der zeitlichen Veränderungen des Abflusses heranzuziehen. Erwartet man in Zukunft für ein Gebiet z.B. eine Zunahme von Lufttemperatur und Niederschlag, so vergleicht man dieses Gebiet mit einem anderen Gebiet, das bereits jetzt eine höhere Lufttemperatur und einen höheren Niederschlag besitzt. Zur Anwendung des „Trading space for time" wurde in dieser Studie das Modell nach TURC (1961) verwendet. Die Koeffizienten des Turc Modells wurden an beobachtete Abflüsse, Niederschläge, Lufttemperaturen und Werte potentieller Verdunstung für 291 österreichische Einzugsgebiete kleiner 10000 km² angepasst. Damit wurde die Sensitivität des Abflusses auf Änderungen in Niederschlag und Lufttemperatur berechnet (Abbildung 5). Eine Erhöhung der Lufttemperatur von 1°C und eine gleichzeitige Zunahme des Niederschlags um 5% auf (T=+1, N=+5), erhöht sich nach diesem Verfahren der Abfluss um 5% in den Alpen und um ca. 3% im Flachland (Abbildung 4). Dieser Fall entspricht den mittleren durch das Klimamodell CLM für 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 berechneten Werten.

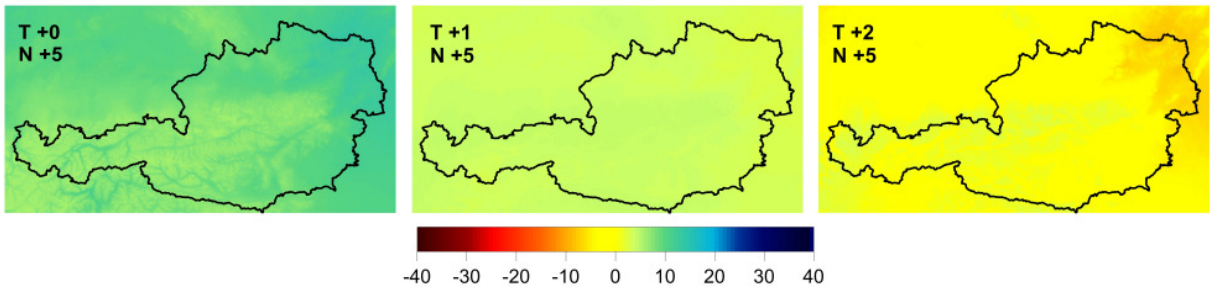


Abb. 5: Sensitivität (%) des langfristigen mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen der mittleren jährlichen Lufttemperatur (T in °C) bei einer angenommen Erhöhung des mittleren jährlichen Niederschlages N um 5% auf Basis des Trading space for time Ansatzes. Blau: Zunahme des Abflusses, rot: Abnahme des Abflusses.

6. Zusammenschau – Änderungen des Abflusses

Die vier unterschiedlichen Methoden zur Abschätzung der zukünftigen Abflussentwicklung in Österreich unterscheiden sich stark in den zugrunde liegenden Daten und Modellannahmen. Durch die Zusammenschau der Ergebnisse der einzelnen methodischen Ansätze kann deshalb die Zuverlässigkeit der Aussagen erhöht werden. Für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 sind Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses kleiner als 5% zu erwarten. Die Zusammenschau deutet auf eine mögliche Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses im Osten und Südosten hin. In diesem Teil Österreichs reagiert der mittlere jährliche Abfluss auch sensitiver auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur als im Alpenraum. Für den Zeitraum 2021-2050 ist eine deutliche Verschiebung des Abflusses innerhalb des Jahres zu erwarten, nämlich eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% in ganz Österreich (mit Ausnahme des Südens).

7. Grundwasser

Für die Trendanalysen der Grundwassersituation wurden vorerst die jährlichen mittleren Grundwasserstände von 2114 Messstellen im Zeitraum 1976-2007 ausgewertet (Abbildung 6). Bei 18% der 2114 betrachteten Grundwassermessstellen zeigte sich ein signifikant fallender Trend. Der Trend betrug im Mittel –2 cm/Jahr. Bei 12% der Messstellen zeigte sich ein signifikant steigender Trend. Er betrug im Mittel +2,5cm/Jahr. Bei der Beurteilung der Trends ist allerdings Vorsicht geboten, da es auf die Auswahl des Zeitfensters ankommt, ob im Einzelfall Trends festzustellen sind oder nicht. Außerdem wurden Jahresmittelwerte der Grundwassertemperaturen an 255 Messstellen ausgewertet. Bei 60% der Messstellen zeigte sich ein signifikant steigender Trend und in nahezu keiner Station ein fallender Trend. In den meisten Messstellen lag die Zunahme zwischen 0,3 und 1,2 °C im 30 jährigen Zeitraum. Die Zunahme der Grundwassertemperaturen ist auf die Zunahme der Lufttemperatur (Erwärmung von oberflächennahem Grundwasser) und die Zunahme der Wassertemperatur in Oberflächengewässern (Infiltration von Wasser ins Grundwasser) zurückzuführen.

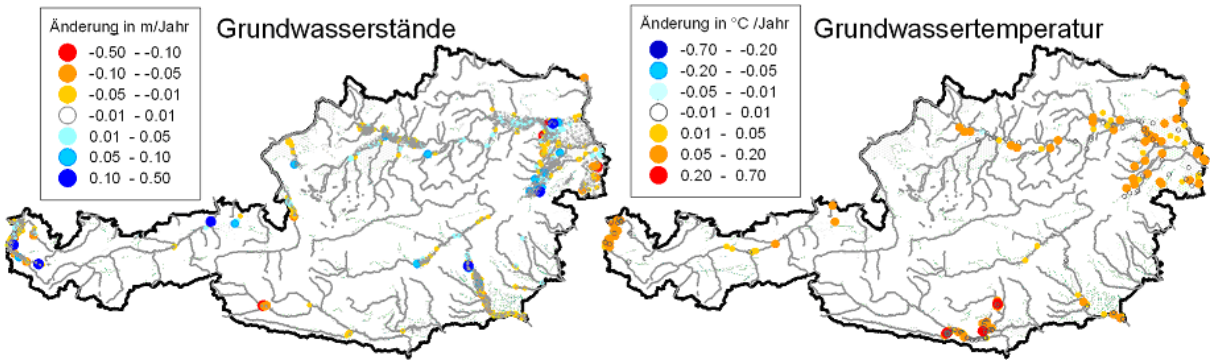


Abb. 6: Trends der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände (links) und der Grundwassertemperatur (rechts) für die Periode 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5% an jeweils beiden Enden der Verteilung).

Für die Einschätzung der zukünftigen Situation ist festzuhalten, dass das Verhalten des Grundwassers sehr stark von den jeweiligen lokalen Gegebenheiten abhängt. Das gilt in gleicher Weise für zukünftige Änderungen. Deshalb sind Prognosen der Änderungen der Grundwasserstände einzelner Messstellen nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich. Generelle, vorsichtige Aussagen können auf Basis der zu erwartenden Veränderungen in den Einflussgrößen der Grundwasserneubildung aus den Berechnungen der Klimamodelle (Lufttemperatur, Niederschlag) und der hydrologischen Modellierungen (mittlerer Abfluss, Niederwasserabfluss) getroffen werden. Die Szenarienrechnungen mit dem Klimamodell CLM lassen für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1976-2006 eine Abnahme der Winterniederschläge im Süden erwarten (SCHÖNER et al. 2011). Damit ist mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung und dadurch mit sinkenden Grundwasserständen für den Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark) zu rechnen. Andererseits zeigen diese Modellrechnungen, dass durch die Zunahme der Winterniederschläge in den Alpen und nördlich der Alpen in diesem Teil Österreichs eher eine Zunahme der Grundwasserneubildung zu erwarten ist.

Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und die erwartete Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände wahrscheinlich. BLASCHKE et al. (2011) und ZAMG/TU-Wien Studie (2011) treffen weitergehende Aussagen über die zukünftigen Änderungen der Grundwasserverhältnisse und erforderliche Anpassungsmaßnahmen in Österreich.

8. Abschließende Bemerkungen

Da die traditionelle Szenarienmethode wegen der großen Unsicherheiten in den Ergebnissen für Klimaimpaktstudien problematisch ist, sind alternative bzw. ergänzende Vorgangsweisen zu entwickeln und zu verfeinern. Alternative Vorgangsweisen für das Abschätzen zukünftiger Änderungen sind etwa die „Trading space for time Methode“ und die Elastizitätsmethode, die in dieser Studie angewendet wurden. Mit solchen ergänzenden Methoden ist ein stärkerer Fokus auf die Mechanismen zu legen, die bestimmte Änderungen bewirken, anstatt nur auf die Ergebnisse der komplexen Klima- und Niederschlags-Abflussmodelle zu vertrauen. In der Zukunft wird eine Vorgangsweise an Bedeutung gewinnen, die neben den Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels in die Zukunft die Vulnerabilität des hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Systems in den Vordergrund stellt, um robuste und flexible Instrumente für Anpassungsstrategien der Wasserwirtschaft an den Klimawandel zu entwickeln (BLÖSCHL et al. 2011). Damit kann auch die natürliche Variabilität von Extremsituationen, die ausgeprägter ist als der Einfluss des Klimawandels, besser in die Entscheidungen für Maßnahmen eingebracht werden.

Danksagung

Diese Studie wurde im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs durchgeführt. Die Hydrographischen Daten wurden durch das Hydrographische Zentralbüro zur Verfügung gestellt. Diese Publikation zeigt auch Ergebnisse des Projektes Predictability of runoff in a changing environment (ÖAW).

Literatur

BLASCHKE, A.P., R. MERZ, J. PARAJKA, J.L. SALINAS & G. BLÖSCHL (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 31-41.

BLÖSCHL G. & A. MONTANARI (2010) Climate change impacts - throwing the dice? Hydrological Processes, 24, 374-381.

BLÖSCHL G., W. SCHÖNER, H. KROIß, A.P. BLASCHKE, R. BÖHM, K. HASLINGER, N. KREUZINGER, R. MERZ, J. PARAJKA, J.L. SALINAS, A. VIGLIONE (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 1-10.

MERZ, R., J. PARAJKA & G. BLÖSCHL (2011): Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses, Water Resour. Res., 47, W02531.

PEEL, M. C. & G. BLÖSCHL (2011): Hydrologic modelling in a changing world. Progress in Physical Geography, 35, in press.

SANKARASUBRAMANIAN, A., R. M. Vogel & J. F. LIMBRUNNER (2001) Climate elasticity of streamflow in the United States, Water Resources Res., 37(6), doi:10.1029/2000WR900330.

SCHÖNER, W., R. BÖHM & K. HASLINGER (2011): Klimaänderung in Österreich - hydrologisch relevante Klimaelemente. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 11-20.

TURC, L. (1961) : Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle: formule climatique simplifié et mise à jour. Ann. Agron. 12, 13-49.

YUE, S., P. Pilon, & B. Phinney (2003): Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. In: Hydrological Sciences Journal 48, Heft 1, S. 51 - 63.

ZAMG/TU-Wien Studie (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Endbericht. Lebensministerium, Wien.

Wie ändern sich Hochwasser und Niederwasser in Österreich?

Jose Luis Salinas, Alberto Viglione, Ralf Merz, Juraj Parajka, Wolfgang Schöner, Günter Blöschl

Zusammenfassung
Hydrologische Extremwerte stehen oft im Zentrum der Klimadebatte. Die Schwierigkeit bei Klimaimpaktanalysen besteht allerdings darin, dass selten klar ist, wie sich die Unsicherheiten in den Annahmen auf die Unsicherheiten der Ergebnisse auswirken. Der vorliegende Beitrag richtet deshalb den Blick auf die Mechanismen der Hochwasser- und Niederwasserentstehung. Damit wird es möglich, kausale Zusammenhänge aufzuzeigen und zu unterscheiden, welche Änderungen mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind und welche Änderungen zwar möglich aber nicht abgesichert sind.

1. Einleitung

Wenn ein Hochwasser oder eine längere Trockenperiode aufgetreten ist, wird gerne der Zusammenhang mit einem sich verändernden Klima gesucht. Eine zentrale Frage dabei ist, ob Starkniederschläge in der Zukunft zunehmen werden. In kleinen und Kleinsteinzugsgebieten bei denen Gewitter zu den größten Hochwässern führen ist die Niederschlagsintensität kurzer Dauerstufe der weitaus wichtigste Einflussfaktor, da die hohen Intensitäten zu einer raschen Sättigung des Bodens führen. In mittleren und größeren Gebiete beeinflussen zahlreiche andere hydrologische Prozesse wie die Bodenfeuchte und Schneeschmelze den Abflussvorgang. Hier ist die Beziehung nicht so eindeutig. In ähnlicher Weise werden Niederwasser durch das Wechselspiel von Niederschlag und Verdunstung gesteuert. Deshalb werden in der Regel die Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser mittels Szenarienanalysen unter Verwendung einer Modellkette untersucht (Globale Zirkulationsmodelle, Downscaling, Niederschlag-Abflussmodell). Allerdings ist es selten klar, wie sich die Unsicherheiten in den Annahmen auf die Unsicherheiten der Ergebnisse auswirken. Der vorliegende Beitrag richtet deshalb den Blick auf die Mechanismen der Hochwasser- und Niederwasserentstehung. Damit wird es möglich, kausale Zusammenhänge aufzuzeigen und zu unterscheiden, welche Änderungen mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind (harte Aussagen) und welche Änderungen zwar möglich aber nicht abgesichert sind (weiche Aussagen).

2. Hochwasser

2.1 Hochwasserauslösende Prozesse und Saisonalität

Die hydroklimatologische Situation ist eine wichtige Einflussgröße auf die Hochwasserentstehung. Sie spiegelt sich in der Saisonalität der Hochwässer wider. Beispielsweise treten in Tirol und Vorarlberg Hochwässer vor allem im Hochsommer auf. Dies ist auf die Saisonalität der Niederschläge, die jahreszeitliche Verteilung der flüssigen Niederschläge (in hohen Lagen), und die erhöhte Abflussbereitschaft im Sommer infolge Schneeschmelze zurückzuführen. In den höheren Gebieten des Mühlviertels treten hingegen Hochwässer vor allem im Spätwinter auf und sind durch die hohe Vorbefeuchtung zufolge Schneeschmelze bzw. Regen-auf-Schnee Ereignisse (wie auch im Innviertel) geprägt. Da die Größe der Hochwässer

durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Abflussbereitschaft bestimmt wird, ist die Saisonalität der Schlüssel für das Verständnis des Klimaeinflusses auf Hochwässer.

2.1 Situation in der Vergangenheit

Die Vorteile der Trendanalysen bestehen darin, dass sie auf beobachteten Daten aufbauen. Um einen aktuellen Überblick über die Situation in Österreich zu erhalten, wurden Reihen der maximalen jährlichen Hochwässer sowie Reihen der maximalen Sommerhochwässer (Mai - Oktober) und Winterhochwässer (September - April) ausgewertet. Alle Hochwasserreihen wurden im Rahmen des HORA Projektes (Merz et al., 2008) qualitätsgeprüft und bei Fehlern oder starken Beeinflussungen korrigiert bzw. aus dem Datensatz entfernt. Mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests wurden die Reihen auf das Auftreten von Trends getestet wobei die Autokorrelation entfernt wurde (YUE et al. 2003) (Abbildung 1). Bei den Sommerhochwässern sind vor allem im Norden Österreichs zunehmende Trends festzustellen, im Süden hingegen abnehmende Trends. Bei den Winterhochwässern sind im Westen Österreichs (mit Ausnahme Vorarlbergs) zunehmende Trends festzustellen, im Osten an einigen Pegeln abnehmende Trends. Erweitert man die Trendanalyse auf den Zeitraum 1955-2007, so fallen die Trends weit weniger signifikant aus und die Muster ändern sich (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011). Diese Ergebnisse sind nicht direkt in die Zukunft zu extrapolieren, ergeben aber einen Hintergrund gegen den die Szenarienanalyen betrachtet werden können.

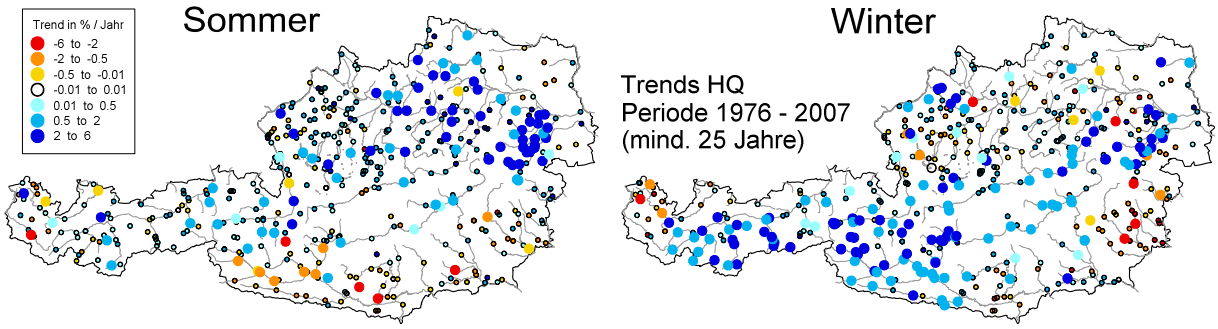


Abb. 1: Trends der Sommer- und Winterhochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. (Signifikanzniveau 5% an jeweils beiden Enden der Verteilung).

2.2 Situation in der Zukunft

Szenarienrechnungen in der Literatur über Änderungen der Hochwässer unterscheiden sich z.T. erheblich, ohne auf Unsicherheiten in den Klimainputs und den simulieren hydrologischen Prozessen einzugehen (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011) wodurch ihre Aussagekraft für die Wasserwirtschaft schwer einschätzbar ist. BLÖSCHL & MONTANARI (2010) schlagen deshalb vor, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollten, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen hervorgerufen werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzuzielen. Dies ist auch der Ansatz, der hier verfolgt wird. Den Überlegungen von BLÖSCHL et al. (2011a) folgend ist zu erwarten, dass die Reihung von harten bis weichen Fakten der entsprechenden Reihung der wesentlichsten Einflussfaktoren bzw. Pro-

zessen entspricht. Für solche Prozesse, bei denen die Lufttemperatur ein wichtiger Einflussfaktor ist (z.B. Schneeschmelze, Schneerückhalt), sind harte Aussagen für die Hochwässer zu erwarten. Für solche Prozesse, bei denen der mittlere Niederschlag ein wichtiger Einflussfaktor ist, sind mittelharte Fakten zu erwarten, und für Prozesse, bei denen klimatologische Extrema wichtige Einflussfaktoren sind, sind weiche Fakten zu erwaren. Folgende Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern werden hier betrachtet:

- Sommer/ Winterniederschlag: Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z.B. durch Verschiebung der Zirkulationsmuster) - *Mittelhartes Faktum*
- Anteil konvektiver Niederschlag: Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags und dadurch höhere Niederschlagsintensitäten - *Weiches Faktum*
- Schneefallgrenze: Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Schneefallgrenze, dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags von Ereignissen - *Hartes Faktum*
- Schneeschmelze, Verdunstung: Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Verschiebung der Schneeschmelze in Richtung Winter, dadurch Verschiebung des Jahresverlaufes der Abflussbereitschaft; Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Verdunstung, dadurch Verringerung der Abflussbereitschaft - *Hartes Faktum*

Um mögliche Änderungen der Hochwässer abzuschätzen wurden Monte Carlo Simulationen für typische Gebiete in Österreich durchgeführt, die aus drei Schritten bestehen: (a) Erzeugen einer Niederschlagszeitreihe; (b) Umsetzen dieser Zeitreihe in eine Abflusszeitreihe mittels eines Niederschlag-Abflussmodells; (c) Analyse der Eigenschaften der Niederschlags- und Abflussereignisse. Das Auftreten jedes Mechanismus wurde einzeln als Szenario untersucht, sowie ein kombiniertes Szenario für alle Mechanismen gemeinsam. Gedanklich wurden die Szenarien für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007 angesiedelt, obwohl es sich um keine Prognosen, sondern Wenn-Dann Szenarien handelt. Die Monte-Carlo Simulationen wurden getestet in Hinblick auf die plausible Wiedergabe aller hochwasserrelevanten Parameter, insbesondere der Saisonalität der Hochwässer. Als Beispiel zeigen Abbildung 2 und Abbildung 3 die simulierten Änderungen des hundertjährlichen Hochwassers für zwei Regionen in Österreich. In Vorarlberg (Abbildung 2 links, Abbildung 3 oben) treten die Hochwässer im Sommer auf. Eine Erhöhung der Winterniederschläge wirkt sich deshalb auf die Hochwässer nicht aus. Eine größere Verdunstung und etwas geringere Sommerniederschläge führen hingegen zu einer Reduktion der Hochwässer. Im Innviertel und Mühlviertel in Nordosten Österreichs (Abbildung 2 rechts, Abbildung 3 unten) treten die Hochwässer sowohl im Sommer als auch im Winter auf. In diesen Regionen werden die Hochwässer durch alle Änderungsmechanismen erhöht, vor allem wegen der Zunahme der Winterhochwässer. Die getrennte Betrachtung der Mechanismen besitzt den Vorteil der besseren Nachvollziehbarkeit sowie der getrennten Einschätzung der Unsicherheiten.

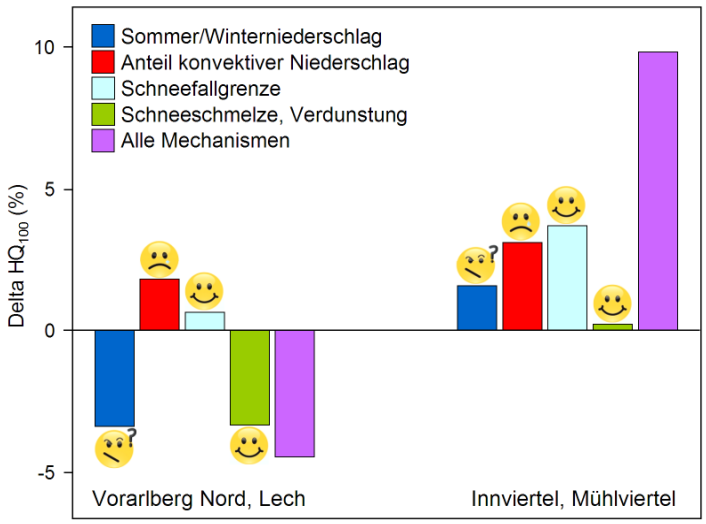


Abb. 2: Wenn-Dann Szenarien für das HQ_{100} bei bestimmten Annahmen der Änderungen der hochwasserauslösenden Prozesse (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007). Typische Gebiete im Westen (links) und Nordosten (rechts) Österreichs. Die subjektiv eingeschätzte Zuverlässigkeit der Aussage ist durch Gesichter gekennzeichnet.

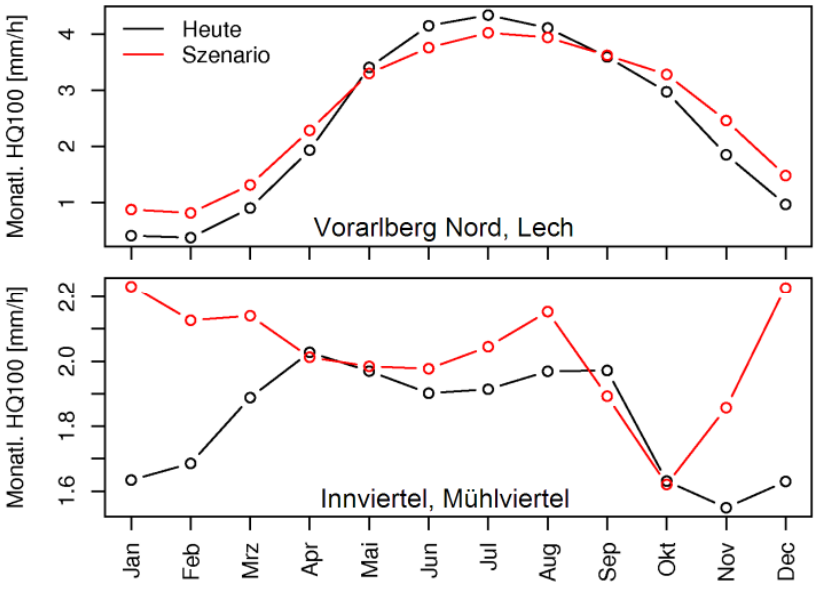


Abb. 3: Simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in zwei typischen Einzugsgebieten in der Region Vorarlberg Nord, Lech (oben) und der Region Innviertel Mühlviertel (unten). Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

3. Niederwasser

3.1 Niederwasserauslösende Prozesse und Saisonalität

Wie für die Hochwässer gilt auch für die Niederwässer, dass das Verständnis der Einflussfaktoren der Schlüssel für belastbare Aussagen über den Klimaeinfluss ist. Die niederwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich im wesentlichen nach der Höhenlage (LAAHA & BLÖSCHL 2007). Im Flachland des Nordens, Ostens sowie Südostens treten die Niederwässer vorwiegenden im Sommer auf. Der wesentliche Mechanismus besteht dar-

in, dass die Verdunstung im Sommer eine geringe Bodenfeuchte bewirkt. Längere niederschlagsfreie Perioden führen dann zu Niederwassersituationen. In den Alpen treten hingegen die Niederwässer vorwiegend im Winter auf. Der wesentliche Mechanismus besteht im Schneerückhalt der Gebiete bzw. in Gefrierprozessen, die die Abflüsse reduzieren. Die Saisonalität ist ein Indikator für die niederwasserauslösenden Prozesse, die wiederum zentral für den Einfluss der Klimaänderung auf Niederwasser sind.

3.2 Situation in der Vergangenheit

Um einen Einblick in die zeitliche Entwicklung der Niederwasserdurchflüsse in der Vergangenheit zu erhalten, wurden Pegeldaten ausgewertet. Abflusszeitreihen, die stark durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen beeinflusst sind, wurden dabei aus dem Datensatz entfernt wonach 463 Pegel für die Analyse zur Verfügung standen. Als kennzeichnende Niederwassergröße wurde der Q_{95} Niederwasserdurchfluss ausgewählt. Das Q_{95} ist jener Durchfluss, der an 95% der Tage eines Jahres überschritten wird. Wie für die Hochwässer wurde der Mann-Kendall-Test unter Entfernung der Autokorrelation (YUE et al. 2003) herangezogen. Eine Auszählung der Pegel mit signifikant steigenden und fallenden Trends findet sich in Tabelle 1. Die meisten Pegel zeigen keine signifikanten Trends für die beiden untersuchten Perioden 1950-2007 bzw. 1976-2007. In den Gebieten über 900 m häufen sich jedoch Pegel mit einem positiven Trend. Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 11% der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwasserdurchflüsse abgenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 13%. Sowohl die Zunahme in großen Seehöhen als auch die Abnahme im Flachland kann gut mit den gestiegenen Lufttemperaturen in Zusammenhang gebracht werden.

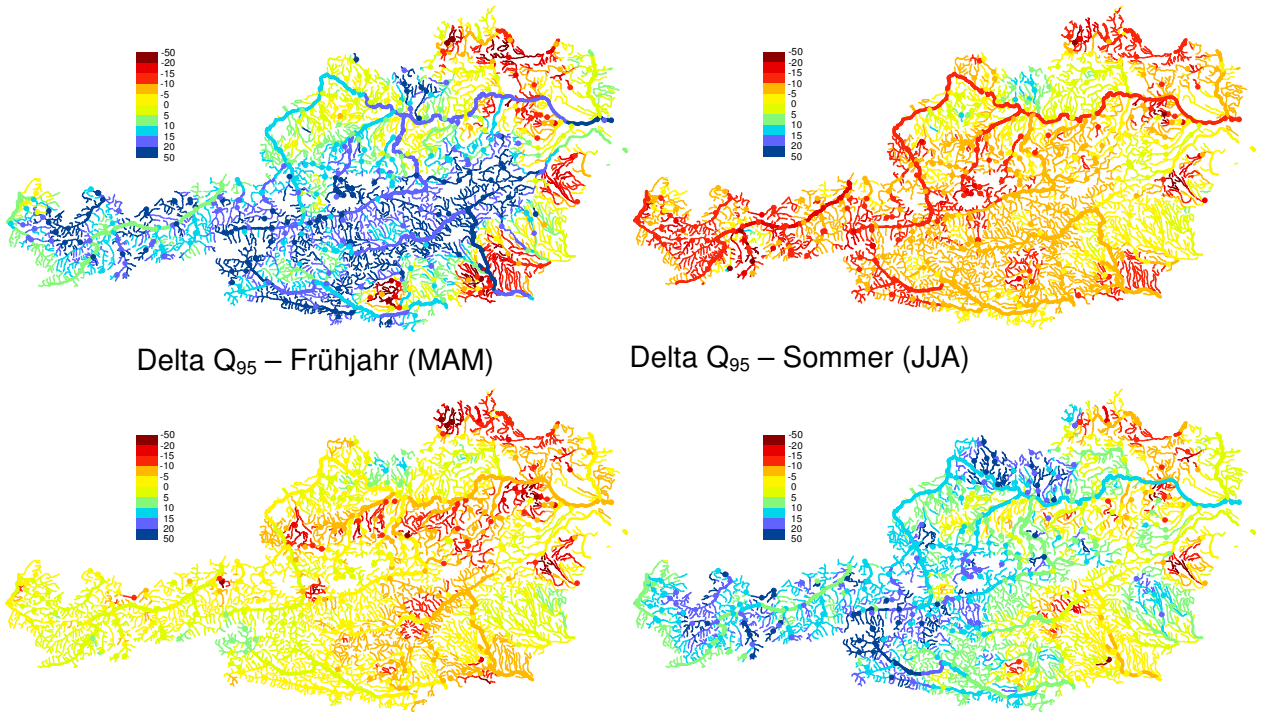
Tab. 1: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse Q_{95} in Österreich. h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten bzw. gering beeinflussten Pegel sind ausgezählt. Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau von 5% sind Werte von 5% und kleiner als zufällig anzusehen. Aus BLÖSCHL et al. (2011b)

	1950 - 2007 (min. 45 Jahre)			1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil d. Pegel [%] mit			Anteil d. Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	19	73	8	8	85	7
Gebiete mit h<900m	5	82	13	5	84	11
Gebiete mit h>900m	34	58	8	14	83	3

3.3 Situation in der Zukunft

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf die Niederwässer in Österreich wurden hier Niederschlag-Abflusssimulationen mit dem Delta-Change Ansatz durchgeführt. Dabei wurde ein Niederschlag-Abflussmodell an zahlreiche Pegeln in Österreich für die Referenzperiode 1976-2006 geeicht und getestet. Die mit den CLM Klimasimulationen (siehe ZAMG/TU-Wien, 2011) ermittelten Differenzen der mittleren

monatlichen Lufttemperaturen 2021-2050 minus 1976-2006 sowie die prozentuelle Änderungen der Niederschläge wurden zu dem beobachteten Lufttemperaturen und Niederschlägen addiert, wodurch sich das Delta-Change Szenario ergab. Die simulierten Abflüsse wurden mittels Top-kriging regionalisiert (SKØIEN et al. 2006) und die Differenzen 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 ausgewertet (siehe BLASCHKE et al. 2011; PARAJKA et al. 2005). Abbildung 4 zeigt die Änderungen des Niederwasserdurchflusses getrennt nach Jahreszeiten. Die Erhöhung der Winterniederwässer im Westen Österreichs und die Reduktion der Sommerniederwässer im Osten Österreichs stimmen mit der Interpretation der Mechanismen überein und sind im Einklang mit den schon in den letzten Jahrzehnten beobachteten Trends (Tabelle 1), wodurch die Aussage zusätzlich an Gewicht gewinnt.



Delta Q_{95} – Frühjahr (MAM) Delta Q_{95} – Sommer (JJA)

Delta Q_{95} – Herbst (SON) Delta Q_{95} – Winter (DJF)

Abb. 4: Änderungen in % des Q_{95} Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodel. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.

4. Abschließende Bemerkungen

Die ZAMG/TU-Wien Studie (2011) gibt eine ausführliche Darstellung der in dieser Arbeit angerissenen Untersuchungen einschließlich der zu erwartenden Unsicherheiten. Dennoch verbleiben zahlreiche offene Fragen. Die Arbeiten haben die Notwendigkeit aufgezeigt, verstärkt die Mechanismen bestimmter Änderungen bei Klimaimpaktanalysen zu untersuchen, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzuzielen. Werden Simulationen durchgeführt, die die Mechanismen nicht transparent betrachten, können die Ergebnisse mitunter wenig vertrauenswürdig sein, auch wenn der numerische Rechenaufwand enorm ist (z.B. GCA 2009). Eine derartige Vorgangsweise ist nicht zu empfehlen. Für kleine Einzugsgebiete ist die zentrale Frage, ob Starkniederschläge in der Zukunft zunehmen werden, nach wie vor

ungeklärt. Eine deutliche Zunahme ist nach dem derzeitigen Wissensstand nicht auszuschließen. Umfassendere Datenanalysen, besonders von Starkniederschlägen und den zugehörigen Hochwasserereignissen, in kleinen Einzugsgebieten sind notwendig damit die Mechanismen auf regionaler Ebene besser verstanden werden. Bezüglich Niederwässer sind die raum-zeitlichen Änderungen interessant. Mit derartigen Auswertungen wäre es möglich, die Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit von Änderungen hydrologischer Extreme in einem geänderten Klima und ihre wasserwirtschaftlichen Konsequenzen genauer zu bestimmen.

Danksagung

Diese Studie wurde im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs durchgeführt. Die Hydrographischen Daten wurden durch das Hydrographische Zentralbüro zur Verfügung gestellt. Diese Publikation zeigt auch Ergebnisse des Projektes Predictability of runoff in a changing environment (ÖAW).

Literatur

BLASCHKE, A.P., R. MERZ, J. PARAJKA, J.L. SALINAS & G. BLÖSCHL (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund - und Oberflächenwasser. Österr. Wasser- und Abfallw. 63, 31-41.

BLÖSCHL, G. & A. MONTANARI (2010) Climate change impacts-throwing the dice? Hydrological Processes, 24, (3) 374-381.

BLÖSCHL, G. W. SCHÖNER, H. KROIß, A.P. BLASCHKE, R. BÖHM, K. HASLINGER, N. KREUZINGER, R. MERZ, J. PARAJKA, J.L. SALINAS, A. VIGLIONE (2011a) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr. Wasser- und Abfallw., 63, 1-10.

BLÖSCHL, G., A. VIGLIONE, R. MERZ, J. PARJAKA, J.L. SALINAS & W. SCHÖNER (2011b): Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch. 63, 21-30.

GCA (2009): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.

LAAHA, G. & G. BLÖSCHL (2007) A national low flow estimation procedure for Austria. Hydrological Sciences Journal, 52, 625-644.

MERZ R., G. BLÖSCHL & G. HUMER (2008): Hochwasserabflüsse in Österreich - das HORA Projekt. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 60, 129 - 138.

PARAJKA J., R. MERZ & G. BLÖSCHL (2005): Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57, 43-56.

SKØIEN, J., R. MERZ & G. BLÖSCHL (2006): Top-kriging - geostatistics on stream networks, Hydrology and Earth System Sciences 10, 277-287.

YUE, S., P. PILON & B. PHINNEY (2003): Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. In: Hydrological Sciences Journal 48, 51 - 63.

ZAMG/TU-Wien Studie (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Endbericht. Lebensministerium, Wien.

Eignung von Großwetterlagen als Prämisse für das statistische Niederschlagsdownscaling

Uwe Haberlandt, Aslan Belli, András Bárdossy

Zusammenfassung

Es wird die Eignung von Großwetterlagen (GWL) für das Downscaling des Niederschlages mit einem stochastischen Niederschlagsmodell für Niedersachsen untersucht. Die Klassifikation der GWLs erfolgt mit Fuzzy-Regel basierter Modellierung. Die Validierung der Luftdruckverteilungen erfolgt durch einen Vergleich von NCAR-Reanalysen mit Beobachtungen und durch Gegenüberstellung der GWL-Häufigkeiten aus NCAR-Klassifikation und ECHAM-Simulation. Zur Überprüfung der Stationarität werden Häufigkeit und Niederschlagsverhalten von aus ECHAM-Daten klassifizierten GWL-Zeitreihen für Zukunft und Vergangenheit betrachtet. Dafür werden Niederschläge des von ECHAM angetriebenen regionalen Klimamodells REMO verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine gute Reproduktion der Druckverhältnisse durch ECHAM, deutliche Unterschiede im Niederschlagsverhalten für die verschiedenen GWLs und ein instationäres Verhalten innerhalb der GWLs. Eine Schlussfolgerung ist, dass bei Verwendung eines stochastischen Niederschlagsmodells zum Downscaling unterschiedliche Parameter für Vergangenheit und Zukunft genutzt werden sollten.

1. Einführung

Um Ergebnisse von globalen Klimamodellen (GCM) für regionale hydrologische Analysen nutzen zu können ist gewöhnlich ein Downscaling, d.h. eine Erhöhung der räumlichen Auflösung erforderlich. Prinzipiell kann man dabei in dynamisches und statistisches Downscaling unterscheiden. Beim dynamischen Downscaling wird ein hoch auflösendes atmosphärisches Modell (RCM) für ein speziell interessierendes Gebiet vom GCM angetrieben (JACOB et al. 2007). Ein Nachteil dabei ist der hohe rechentechnische Aufwand, der Simulationen nicht für beliebig lange Zeitabschnitte und viele Realisationen erlaubt. Ein Vorteil ist die physikalisch begründete Modellierung, die Instationaritäten implizit berücksichtigt. Die Ergebnisse haben jedoch oft einen Bias und erfordern eine systematische Korrektur (PIANI et al. 2010). Beim statistischen Downscaling werden Beziehungen zwischen beobachteten Variablen und großskaligen Informationen aus dem GCM aufgestellt. Dies kann über Regressionen (BÜRGER 1996), indirekt über stochastische Modelle (MEHROTRA & SHARMA 2010) oder durch Resampling (SPEKAT et al. 2007) geschehen. Ein Nachteil ist die Notwendigkeit des Vorhandenseins von ausreichend Beobachtungswerten für die Anpassung des Modells. Vorteile sind die explizite Berücksichtigung von regionalen Niederschlagseigenschaften, schnelle Simulationen mit beliebig vielen Realisationen und zumeist biasfreie Ergebnisse.

Eine Herausforderung ist die Bereitstellung langer Reihen zeitlich hoch aufgelöster Niederschläge für Hochwassersimulationen zum Zwecke der Ableitung zukünftiger Extremwertstatistiken. Dafür bietet sich ein statistisches Downscaling mit einem stochastischen Niederschlagsmodell an (HABERLANDT et al. 2008). Die Parameter des Niederschlagsmodells sollen bedingt an Großwetterlagen (GWL) geschätzt werden. Voraussetzung für dieses Vorgehen sind a) eine trennscharfe objektive Klassifikation der GWL's, b) eine gute Reprodu-

zierbarkeit der GWL's durch das verwendete GCM, und c) im Falle stationärer Modellparameter, die Annahme, dass sich das Niederschlagsverhalten für eine bestimmte GWL auch in der Zukunft nicht ändert. Diese Voraussetzungen werden hier anhand von Daten in Niedersachsen überprüft.

2. Daten

Die Abbildung 1 zeigt das Untersuchungsgebiet und gibt Informationen über verwendete Daten. Für die Optimierung der Großwetterlagen (GWL) werden Daten des Luftdrucks in Meereshöhe (SLP) aus NCAR-Reanalysen in einer Auflösung von 5° x 5° und Daten täglich beobachteter Niederschläge (1951-2000) verwendet. Die Optimierung und Validierung der GWLs erfolgt hier mit Hilfe der zwei in Abbildung 1 eingezeichneten kreisförmigen Cluster mit einem Radius von 20 km. Für die Validierung der Drücke stehen 115 Klimastationen zur Verfügung. Als Basis für das Downscaling werden SLP-Daten vom ECHAM-Lauf 20C_R1 (1951-2000) und vom Zukunftsszenario A1B (2001-2100) verwendet. Außerdem werden tägliche Niederschläge der zugehörigen REMO-Läufe genutzt, die in einer Auflösung von 10 x 10 km vorliegen. Eingezeichnet ist zusätzlich das Aller-Leine-Flussgebiet, für welches hier einfache Änderungsanalysen durchgeführt werden. Später erfolgt dafür die Hochwassermodellierung mit Niederschlagsdaten aus dem statistischen Downscaling.

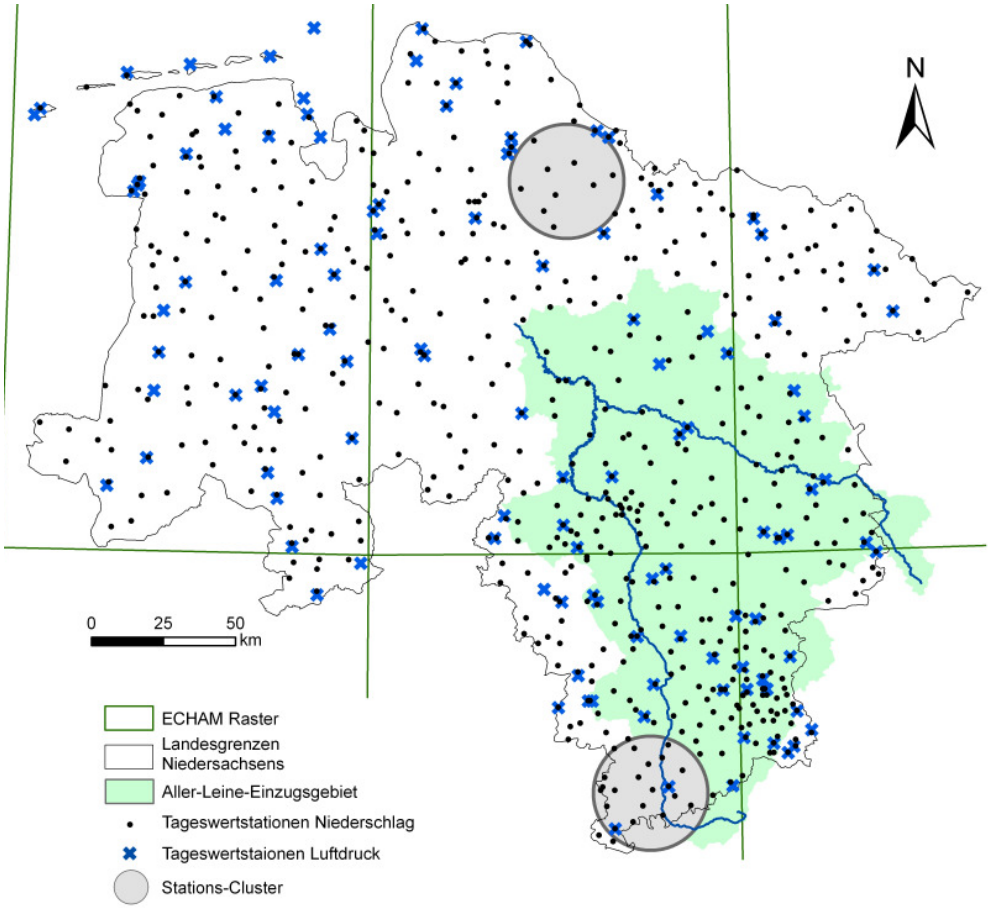


Abb. 1: Untersuchungsgebiet und Daten

3. Methoden

Es gibt verschiedene Methoden zur Klassifikation von Großwetterlagen. Hier wird eine automatische Klassifikationsmethode auf Basis von Fuzzy-Regeln verwendet (BÁRDOSSY 2010). Jede Großwetterlage wird durch eine Fuzzy-Regel beschrieben, deren Argumente Druckanomalien (z.B. „stark positiv“, „mittel negativ“, „egal“) an den Gitterpunkten des GCMs darstellen. Das Fuzzy-Regelsystem wird derart optimiert, dass eine möglichst starke Diskriminierung im Niederschlagsverhalten zwischen den verschiedenen GWLs erreicht wird. Hier werden SLP-Druckdaten von NCAR-Reanalysen und tägliche Niederschläge genutzt. Für die Optimierung (1981-90) wird der Anteil nasser Stationen innerhalb der beiden Cluster (siehe Abbildung 1) und für die Validierung (1991-2000) der Gebietsniederschlag der Cluster verwendet. Ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Wetterlage ist der so genannte Feuchteindex (PWI), der das Verhältnis aus mittlerem Tagesniederschlag dieser GWL zum mittleren Tagesniederschlag insgesamt darstellt. Ein Wert kleiner als „1“ kennzeichnet eine mehr trockene und ein Wert größer als „1“ eine mehr nasse GWL. Die klassifizierten GWLs werden hinsichtlich ihrer Diskriminierungskraft auf Basis des PWI und auf Basis der Momente von Niederschlagsereigniszeitreihen verglichen. Letztere bilden den Ausgangspunkt zur Schätzung der Parameter des später zu verwendenden stochastischen Niederschlagsmodells (HABERLANDT et al. 2008). Schließlich erfolgt ein Vergleich der drei 30ig-jährigen Zeitperioden 1951-80, 2011-2040 und 2071-2100 hinsichtlich Änderungen in Häufigkeit, PWI und mittlerem Gebietniederschlag für das Aller-Leine-Einzugsgebiet.

4. Analysen und Ergebnisse

Grundlegende Voraussetzung für diese Art der Analysen ist zunächst, dass das verwendete GCM, in der Lage ist, die Luftdruckverhältnisse realistisch zu simulieren. Dies wird hier in zwei Schritten überprüft. Es erfolgen zuerst ein Vergleich beobachteter Luftdrücke mit Re-Analysen von NCAR und anschließend ein Vergleich der GWL-Häufigkeiten zwischen NCAR-Reanalysen und ECHAM-Simulationen. Die Abbildungen 2a und 2b zeigen die Ergebnisse und dokumentieren, dass sowohl die beobachteten Drücke von NCAR vernünftig wiedergegeben werden (Korrelation: 0.88) als auch die GWL-Häufigkeiten von ECHAM richtig reproduziert werden.

Es wurden Optimierungen für eine unterschiedliche vorgegebene Anzahl von GWLs (8 bis 16 GWLs) durchgeführt mit dem Ziel eine gute Unterscheidung in trockene und nasse GWL zu erhalten. Die Anzahl der Klassen sollte möglichst gering gehalten werden, da der Stichprobenumfang bezüglich stündlicher Niederschläge für die spätere bedingte Parameterschätzung mit dem Niederschlagsmodell beschränkt ist. Das Bild 3 zeigt den Feuchteindex PWI bei einer Klassifikation in 8 GWLs. Die trockenen GWLs sind die Klassen 1 bis 4 und die feuchten GWLs die Klassen 5 bis 8. Es werden PWI-Werte zwischen 0,21 (sehr trocken) und 2,58 (sehr nass) erreicht. Es finden sich Unterschiede sowohl zwischen den Jahreszeiten als auch zwischen den zwei verschiedenen Gebieten (Cluster 1, 2).

In der Abbildung 4 sind beispielhaft zwei Wetterlagen hinsichtlich ihrer räumlichen Druckverteilung dargestellt. Die Wetterlage 1 ist die trockenste GWL mit einem Hochdruckgebiet über der Nordsee und einer östlichen Luftströmung. Die Wetterlage 6 ist sehr feucht mit einem Tief über der Nordsee und einem Zustrom feuchter Luft aus dem Westen.

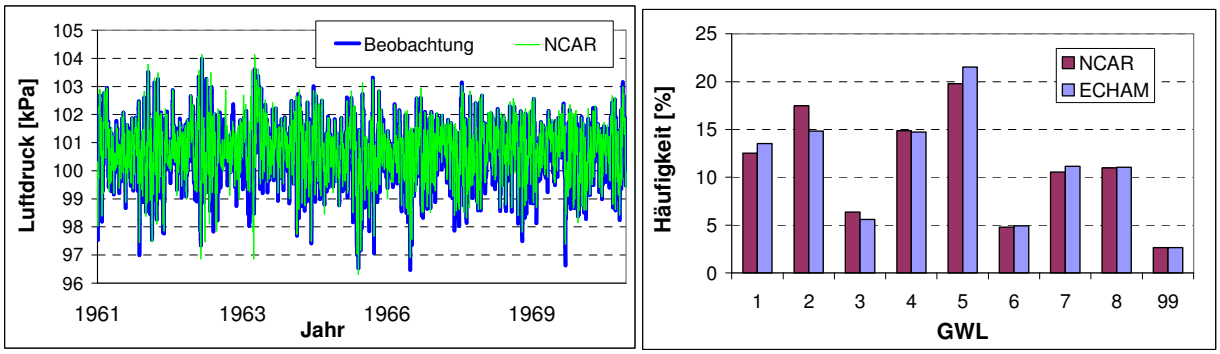


Abb. 2: a) links: Tageswerte des Luftdrucks an der Erdoberfläche aus Beobachtungen und NCAR-Reanalysen gemittelt für Niedersachsen (Beobachtungsdaten umgerechnet auf NCAR-Oberflächenhöhe); b) rechts: Vergleich von Häufigkeiten von 8 Großwetterlagen aus NCAR-Reanalyse und ECHAM-Simulation für das Sommerhalbjahr und den Zeitraum 1951-1999 (GWL 99 ist der Anteil nicht klassifizierter GWLs)

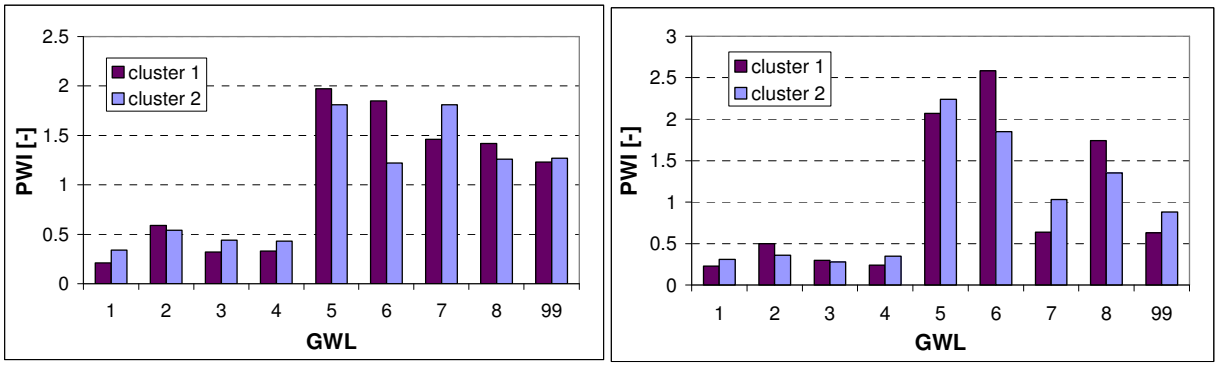


Abb. 3: Feuchteindex für die Klassifikation in 8 GWLs, berechnet für 2 Cluster im Validierungszeitraum 1991-2000; a) links: Sommer, b) recht: Winter

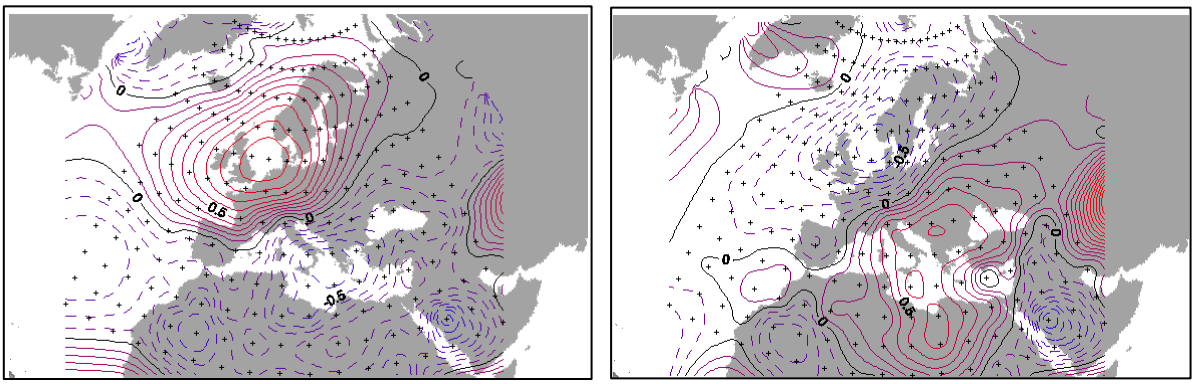


Abb. 4: Beispiel für die Verteilung der Luftdruckanomalien a) links: der trockenen GWL Nr. 1 und b) rechts: der feuchten GWL Nr. 6

Für die spätere bedingte Anwendung des Niederschlagsmodells ist es wichtig, dass sich die Modellparameter zwischen den einzelnen GWLs deutlich unterscheiden. Das Niederschlagsmodell basiert auf Ereigniszeitreihen, die durch die drei Variablen Trockendauer, Nassdauer und Niederschlagshöhe gekennzeichnet sind. Für 10 ausgewählte Nieder-

schlagsstationen wurden Ereigniszeitreihen gebildet und die Momente bedingt an die GWL-Klassifikation berechnet. Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft für die Trockendauer im Sommer und für das Ereignisvolumen im Winter die Erwartungswerte in Abhängigkeit der GWLs. Die signifikante Variation der Erwartungswerte zwischen den GWLs legt eine separate Parameterschätzung nah. Eventuell lassen sich jedoch auf Basis solch einer Analyse ähnliche GWLs wieder zusammenfassen.

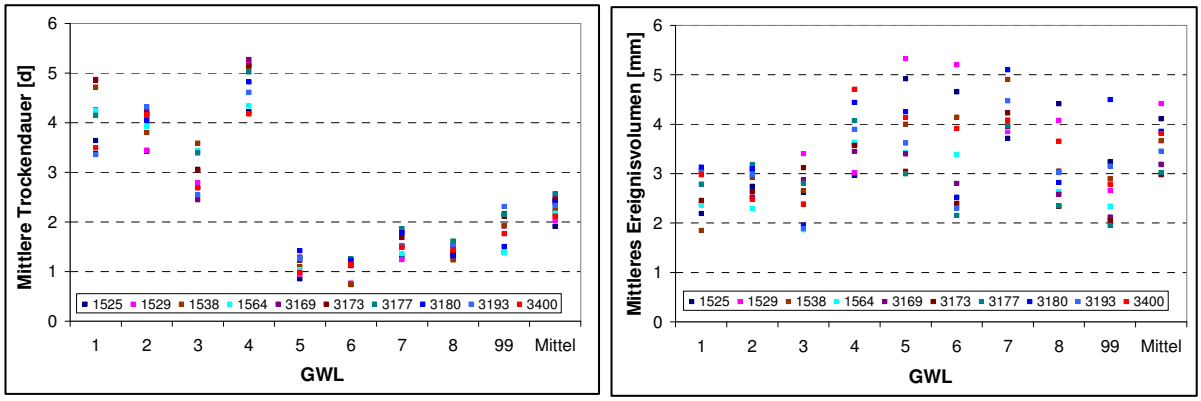


Abb 5: a) links: mittlere Trockendauer im Sommer und b) rechts: mittleres Ereignisvolumen im Winter für 10 registrierende Niederschlagsstationen in Niedersachsen in Abhängigkeit von der Großwetterlage

Vereinfacht soll jetzt angenommen werden, dass eine zukünftige Änderung im Niederschlagsverhalten aus drei unabhängigen Änderungen resultiert: a) der Änderung der Häufigkeit der Wetterlagen, b) der Änderung der Niederschlagsintensität innerhalb der Wetterlagen (der PWI ändert sich) und c) aus einer gleichmäßigen Zunahme bzw. Abnahme der Niederschlagsintensität (Intensivierung) über alle Wetterlagen (der PWI bleibt gleich). Im Folgenden soll abgeschätzt werden, welchen Beitrag diese einzelnen Anteile auf die Änderung im mittleren Gebietsniederschlag für das Aller-Leine-Einzugsgebiet haben.
Die Abbildung 6 zeigt zunächst die relative Änderung des Gebietsniederschlages für das Aller-Leine-Gebiet in Abhängigkeit der GWLs für die beiden zukünftigen Zeiträume 2011-40 und 2071-2100 bezogen auf die Vergangenheit 1951-80. Die Änderungen für die spätere Zukunft (2071-2100) sind stärker als die für die nähere Zukunft (2011-41). Für die spätere Zukunft gibt es einheitliche Abnahmen im Sommer und fast einheitliche Zunahmen im Winter für alle 8 klassifizierten GWLs. Insgesamt ergibt sich für die zweite Zukunftsperiode eine Abnahme des Niederschlages um 16% im Sommer und eine Zunahme um 19% im Winter.
Die Abbildung 7 zeigt die relative Änderung der Häufigkeit der Wetterlagen für zwei zukünftige Zeiträume 2011-40 und 2071-2100 bezogen auf die Zeitperiode 1951-80. Es ist zu sehen, dass geringe Änderungen der Häufigkeiten für die nahe Zukunft und moderate Änderungen für die fernere Zukunft auftreten. Die stärkste Änderung tritt für die trockene GWL 4 im Sommer auf. Nimmt man nun an, dass es keine weiteren Änderungen gibt und der Feuchteindex PWI für jede GWL konstant bleibt, kann man die aus dieser Häufigkeitsänderung resultierende Änderung am Gesamtniederschlag abschätzen. Es ergibt sich überraschend nahezu keine Änderung von rechnerisch -1% für den Sommer und 0% für den Winter.

Die Abbildung 8 zeigt schließlich die relative Änderung des Feuchteindex PWI in Abhängigkeit von den Großwetterlagen für die beiden zukünftigen Zeiträume 2011-40 und 2071-2100 bezogen auf die Zeitperiode 1951-80. Es zeigen sich signifikante Änderungen in beiden zukünftigen Zeitperioden, die zeitlich nicht immer konsistent sind. Im Sommer werden die trockenen GWLs (1 bis 4) noch trockener und die feuchten GWLs (5 bis 8) eher etwas feuchter. Im Winter ist das Bild sowohl für die trockenen als auch für die feuchten GWLs uneindeutig.

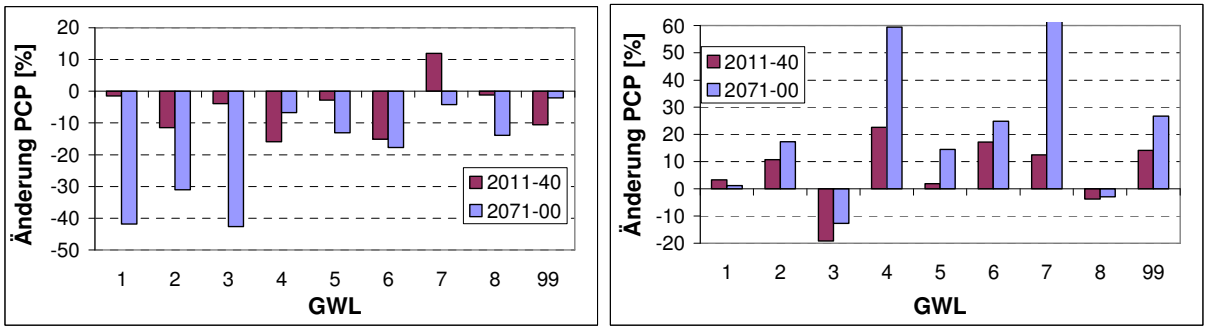


Abb. 6: Prozentuale Änderung des mittleren Gebietsniederschlages PCP in der Zukunft für das Aller-Leine-Gebiet in Abhängigkeit der Großwetterlagen (REMO angetrieben mit ECHAM) bezogen auf die Zeitperiode 1951-80, a) links: im Sommer und b) rechts: im Winter

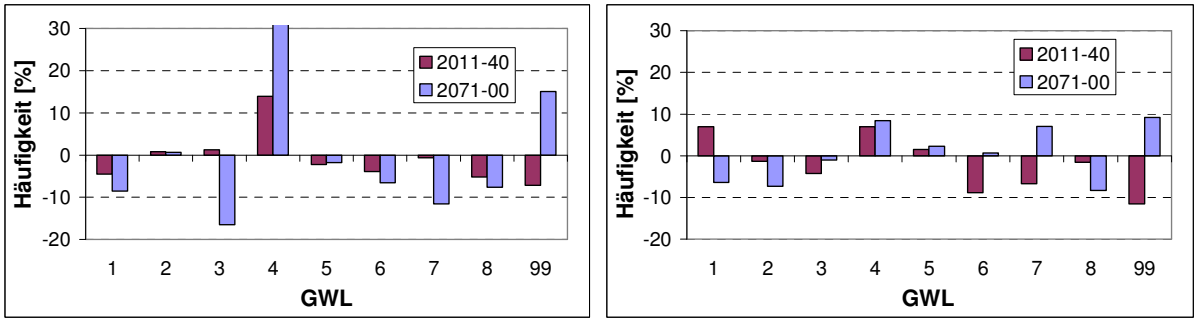


Abb. 7: Prozentuale Änderung der Häufigkeit der Großwetterlagen (ECHAM) in der Zukunft bezogen auf die Zeitperiode 1951-80, a) links: im Sommer und b) rechts: im Winter

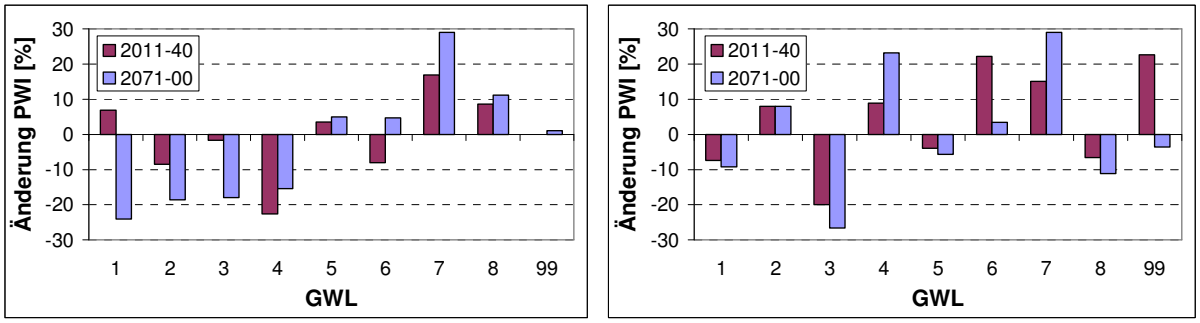


Abb. 8: Prozentuale Änderung des Feuchteindex PWI in der Zukunft für das Aller-Leine-Gebiet in Abhängigkeit der Großwetterlagen (REMO angetrieben mit ECHAM) bezogen auf die Zeitperiode 1951-80, a) links: im Sommer und b) rechts: im Winter

Nimmt man wiederum an, dass es keine weiteren Änderungen gibt und die Häufigkeit der GWLs unverändert bleibt, kann man die aus der PWI-Änderung resultierende Änderung am Gesamtniederschlag abschätzen. Es ergibt sich wiederum nur eine marginale Änderung im Sommer von lediglich +2% und mit 0% keine Änderung für den Winter. An der Gesamtänderung des Niederschlages liefern hier beide, die Änderung der Häufigkeit der GWLs und die Änderung des Feuchteindex, nur marginale Beiträge. Die Hauptänderung resultiert aus der mehr gleichmäßigen Verstärkung bzw. Verringerung der Niederschlagsintensität.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Luftdruck bzw. die Muster der Luftdruckverteilung gut von den GCMs nachgebildet werden können, die damit eine wesentliche Voraussetzung erfüllen, um als Prediktoren für das Downscaling verwendet werden zu können. Weiterhin wurde deutlich, dass die klassifizierten Wetterlagen stark unterschiedliches Niederschlagsverhalten hinsichtlich des Feuchteindex und der Ereignismomente zeigen. Dies demonstriert die Eignung der Fuzzy-Regel basierten Klassifikationsmethode und suggeriert eine bedingte Parameterschätzung für die Anwendung stochastischer Niederschlagsmodelle. Die Ergebnisse der Änderungsanalyse zeigen, dass Änderungen in der GWL-Häufigkeit und im PWI auftreten aber beide die Gesamtänderung im Niederschlag nicht erklären können. Diese wird hier im Wesentlichen auf die einheitliche Verstärkung bzw. Verringerung der Niederschlagsintensität über alle klassifizierten Großwetterlagen zurückgeführt. Daraus folgt für das statistische Downscaling mit einem Niederschlagsmodell, dass unterschiedliche Parameter für Vergangenheit und Zukunft verwendet werden sollten. Ähnliches gilt natürlich auch für andere statistische Downscalingmethoden. In weiteren Untersuchungen ist zu prüfen, inwieweit diese Ergebnisse vom Gebiet, den Modellen (GCM, RCM) bzw. den Realisationen oder von der Anzahl und Art der klassifizierten Großwetterlagen abhängen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim DWD für die Bereitstellung der täglichen Klimadaten und beim MPI in Hamburg für die Bereitstellung der ECHAM und REMO Modelldaten. Die NCAR-Reanalysen stammen vom U.S. National Center for Atmospheric Research, verfügbar on-line von http://dss.ucar.edu/datasets/ds010.0/. Die Untersuchung wurde im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens KLIFF vom Land Niedersachsen gefördert.

Literatur

BÁRDOSSY, A. (2010): Atmospheric circulation pattern classification for South-West Germany using hydrological variables. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 35(9-12): 498-506.

BÜRGER, G. (1996): Expanded downscaling for generating local weather scenarios. Climate Research, 7: 111-28.

HABERLANDT, U., A.-D. EBNER VON ESCHENBACH & I. BUCHWALD (2008): A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis. Hydrol. Earth Syst. Sci., 12: 1353-1367.

JACOB, D. et al. (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Climatic Change, 81(Supplement 1): 31-52.

MEHROTRA, R. & A. SHARMA (2010): Development and Application of a Multisite Rainfall Stochastic Downscaling Framework for Climate Change Impact Assessment. Water Resour. Res., 46(7): W07526.

PIANI, C. et al. (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. Journal of Hydrology, 395(3-4): 199-215.

SPEKAT, A., W. ENKE & F. KREIENKAMP (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESSzenarios B1, A1B und A2, Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138.

Analyse des projizierten hydrologischen Verhaltens von Einzugsgebieten auf der Basis von Signature Indices

Markus C. Casper, Gayane Grigoryan, Oliver Gronz, Günther Heinemann, Rita Ley, Andreas Rock

Zusammenfassung

In dieser Studie werden Signature Indices aus Abflussdauerlinien und Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Ereignisabflussbeiwerten abgeleitet. Diese werden aus relativ kurzen Abfluss- und Gebietsniederschlagszeitreihen von 10 Jahren Länge errechnet. Abflussdaten liegen für 3 verschiedene Kopfeinzugsgebiete im Einzugsgebiet der Nahe (Rheinland-Pfalz / SW-Deutschland) vor: (1) gemessen an den Pegeln; (2) simuliert auf der Basis gemessener Gebietsniederschläge; (3) simuliert auf der Basis von simulierten Niederschlagsfeldern für eine Referenzperiode (1988-1997) und eine Zukunftsprojektion (2015-2024). Als Simulationsmodell kommt LARSIM zum Einsatz. Die simulierten Niederschlagsfelder sind der Output eines Regionalen Klimamodells (CCLM) mit einer Auflösung von 5x5 km² bzw. 1.3x1.3 km² für die Sommermonate. Dabei liegen sowohl BIAS-korrigierte als auch unkorrigierte Niederschlagsfelder vor. Die vorliegende Studie zeigt starke Unterschiede zwischen den Datensätzen: Für die Referenzperiode des Klimamodells konnte u.a. eine abweichende zeitliche Verteilung des Niederschlags festgestellt werden. Der Einfluss der BIAS-Korrektur auf die hydrologische Antwort der Gebiete ist sehr deutlich und das Änderungssignal in den CCLM-Daten für die Zukunftsprojektion 2015-2024 deutet einheitlich auf eine Abnahme der Abflussspitzen und der mittleren Ereignisabflussbeiwerte hin.

1. Einleitung

Das hydrologische Verhalten von Einzugsgebieten (und daher auch das Verhalten von hydrologischen Simulationsmodellen) kann über Signature Indices (Yilmaz et al. 2008, Herbst et al. 2009, Oudin et al. 2010) gut beschrieben werden. Signature Indices auf der Basis von Abflussdauerlinien erlauben einen schnellen Vergleich der Wasserbilanz, der Reaktivität und der Verteilung von Hoch- und Niedrigwasserabflüssen. Signature Indices auf der Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Ereignisabflussbeiwerten (MERZ & BLÖSCHL 2006) lassen eine gute Unterscheidung von „trockenen“ (langsam reagierenden) und „nassen“ (schnell reagierenden) Einzugsgebieten zu. Außerdem zeigen diese Signature Indices eine hohe Sensitivität auf die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlags, da sie neben Abflussmengen auch den ereignisspezifischen Gebietszustand bewerten. Dies lässt erwarten, dass sich mithilfe dieser Signature Indices insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Antriebsdaten auf das hydrologische Verhalten eines Einzugsgebietes bewerten lässt.

2. Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete dienen drei klimatisch und physiographisch unterschiedliche Teileinzugsgebiete der Nahe in Rheinland-Pfalz (Deutschland): Kronweiler (64 km²), Kellenbach (362 km²) und Gensingen (197 km²). Die Einzugsgebiete sind durch sehr unterschiedliche geologische Einheiten geprägt: Es dominieren Schiefer und Quarzite in Kellenbach, Schiefer,

Sedimente und Vulkanite des Rotliegenden in Kronweiler und tertiäre Tone und Tonmergel sowie pleistozäne Lösse und Lösslehm in Gensingen. Das Einzugsgebiet Kronweiler weist mit 990 mm die höchsten mittleren Jahresniederschläge (1961-1990) auf, gefolgt von Kellenbach mit 730 mm/a. Beide Gebiete haben eine mittlere potenzielle Evapotranspiration von ca. 540 mm/a. Das Einzugsgebiet Gensingen ist mit einem mittleren Jahresniederschlag von 570 mm/a und einer potenziellen Evapotranspiration von 614 mm deutlich trockener. Die Böden des Einzugsgebiets Gensingen zeigen hohe Feldkapazitäten und werden hauptsächlich ackerbaulich und für Sonderkulturen (Wein und Obst) genutzt. Die Einzugsgebiete Kronweiler und Kellenbach sind jeweils zur Hälfte bewaldet. Siedlungsflächen nehmen nur etwa 2-5 % der Fläche ein. Das Einzugsgebiet Kronweiler ist stärker reliefiert und steiler als die anderen beiden Einzugsgebiete. Die drei Einzugsgebiete weisen sehr unterschiedliche Abflusscharakteristiken auf: Die Abflüsse am Pegel Kronweiler zeigen hohe Abflüsse, eine hohe Reaktivität des Gebietes auf Niederschläge mit ganzjährig hohen Abflussbeiwerten. Der Pegel Gensingen zeigt eine deutlich geringere Reaktivität auf Niederschläge und hat geringe Abflussbeiwerte mit einer hohen Variabilität im Winterhalbjahr. Die Abflüsse des Pegels Kellenbach zeigen ein mittleres Abflussverhalten für Rheinland Pfalz (LEY et al. 2011).

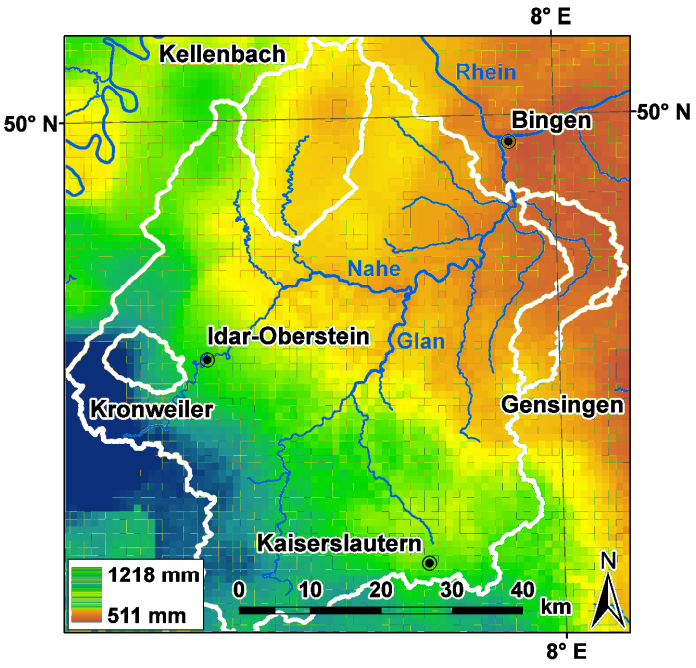


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete im Nahe-Einzugsgebiet (Rheinland-Pfalz/ Deutschland). Dargestellt ist der mittlere Jahresniederschlag [mm/a] für den Zeitraum 1993-2003.

3. Methoden

3.1 Wasserhaushaltsmodell LARSIM und Eingangsdaten:

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model, LUDWIG & BREMICKER 2006) ermöglicht eine kontinuierliche, prozess- und flächendetaillierte Simulation des mesoskaligen landgebundenen Wasserkreislaufes. Einzugsgebiete werden in einzelne, räumlich diskrete und miteinander vernetzte Elemente aufgeteilt, für die die Berechnung des Wasserhaushalts in stündlicher Auflösung erfolgt. An meteorologischen Eingangsdaten werden Niederschlag, Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung

und Luftfeuchtigkeit benötigt. Diese Daten liegen für eine Referenzperiode und eine Zukunftsprojektion aus verschiedenen Quellen vor. Für den Zeitraum 1996-2003 liegen die Messdaten von 56 DWD-Stationen vor. Für den Zeitraum 1988-1997 (Szenario C20_1) und 2015-2024 (Szenario A1B_1) liegen simulierte COSMO-CLM-Daten (CCLM-Daten) in den Auflösungen 5 km und 1,3 km vor (Version COSMO4.2_CLM3). Die Daten in der 1,3 km Auflösung liegen nur für die Sommermonate (Juni, Juli, August) vor (KNOTE et al. 2010), der übrige Zeitraum wurde jeweils durch lineare Interpolation aus 5 km Daten generiert. Der Niederschlag liegt BIAS-korrigiert für beide Zeiträume und Auflösungen vor (GUTJAHR et al. 2011). Somit ergeben sich neun Realisationen des Abflusses für jedes Einzugsgebiet, sowie eine gemessene Abflussganglinie die insgesamt den Zeitraum 1990-2007 abdeckt.

3.2 Vergleich hydrologischer Zeitreihen mittels Indizes

In der Hydrologie übliche Kennziffern zur Quantifizierung der Übereinstimmung von zwei Ganglinien können bei den vorliegenden Zeitreihen nicht angewendet werden. Diese Maße werten in der Regel die Differenzen der Werte in jedem einzelnen Zeitschritt aus, wie z. B. bei der Modelleffizienz nach Nash-Sutcliffe. Die vorliegenden simulierten Ganglinien sind jedoch aus unterschiedlichen Zeiträumen - es müssen also Methoden angewendet werden, die das hydrologische Verhalten dieser Zeitreihen in Zahlen fassen können. Um dieses Ziel zu erreichen, werden 5 Signature Indices bestimmt (YILMAZ et al. 2008, HERBST et al. 2009). Diese werden ergänzt durch 4 weitere Indizes, die auf der Basis von Ereignisabflussbeiwerten berechnet werden (MERZ & BLÖSCHL 2006, LEY et al. 2011). Im Folgenden werden alle 9 Indizes als Signature Indices angesprochen.

3.2.1 Signature Indices auf der Basis der Abflussdauerlinie

Die Idee der Signature Indices nach YILMAZ et al. (2008) ist es, durch Berechnung bestimmter Eigenschaften der zu vergleichenden Ganglinien - bzw. der resultierenden Abflussdauerlinien - einen charakteristischen „Fingerabdruck“ des hydrologischen Verhaltens zu erhalten. Abbildung 2 zeigt zwei verschiedene Dauerlinien, die sich zur besseren Verdeutlichung der Indices signifikant unterscheiden. Der erste Index, *BiasFMM*, vergleicht die Bilanz der beiden Ganglinien durch Berechnung der prozentualen Abweichung der Mittelwerte (in Abbildung 2 durch Kreise hervorgehoben); er ist somit ein Indikator für das Langzeitverhalten. Der zweite Index, *BiasFDC*, ermittelt die Abweichung der Steigung im mittleren Teil (vom 20. bis zum 70. Perzentil, rotes und blaues Steigungsdreieck) und beurteilt somit die Unterschiede in der Reaktivität der beiden Ganglinien. Der dritte Index, *BiasFHV*, beurteilt die prozentuale Abweichung der Integrale der nicht logarithmierten höchsten Abflüsse (bis zum 2. Perzentil). Die in Abbildung 2 grün markierte Fläche markiert die Differenz der beiden Integrale (auch wenn die Darstellung hier mit logarithmischer Skala nicht ganz korrekt ist). Er beurteilt, wie stark sich die Abflussspitzen unterscheiden. Der vierte Index, *BiasFLV*, ist im Niedrigwasserbereich (ab dem 70. Perzentil) der prozentuale Unterschied der beiden Flächen, die nach oben durch die Abflussdauerlinie und nach unten durch den niedrigsten vorkommenden Wert begrenzt werden (in der Abbildung blau und rot). Er quantifiziert die Differenzen im Niedrigwasserbereich bzw. beim Basisabfluss. Der fünfte Index, *BiasFMM* beschreibt den prozentualen Unterschied der jeweiligen Mediane. Die beiden zuletzt genannten Indizes sind gegen-

über der ursprünglich in YILMAZ et al. 2008 vorgeschlagenen Definition modifiziert worden, da sich bei kleinen Einzugsgebieten mit Abflüssen unter 1 m³/s sonst durch die Logarithmierung Vorzeichenfehler ergeben können.

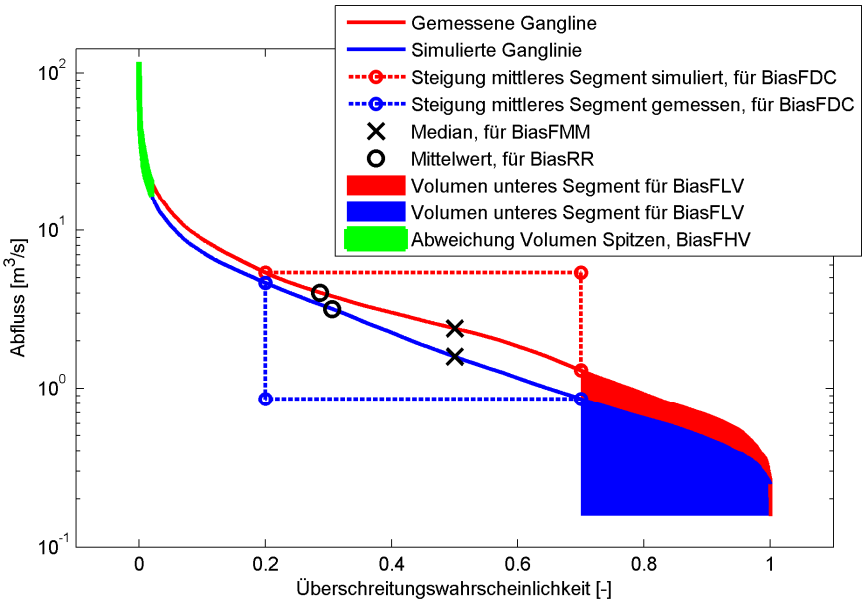


Abb. 2: Zwei unterschiedliche Abflussdauerlinien mit markierten Merkmalen, aus denen die Signature Indices ermittelt werden.

3.2.2 Signature Indices auf der Basis von Ereignisabflussbeiwerten

Ereignisabflussbeiwerte werden halbautomatisch nach dem Verfahren von (MERZ & BLÖSCHL 2006, MERZ & BLÖSCHL 2009) abgetrennt. Die Abflussbeiwerte werden für die gesamte Zeitreihe und für Sommer und Winterhalbjahr getrennt in empirische Wahrscheinlichkeitsverteilungen überführt (Abbildung 3).

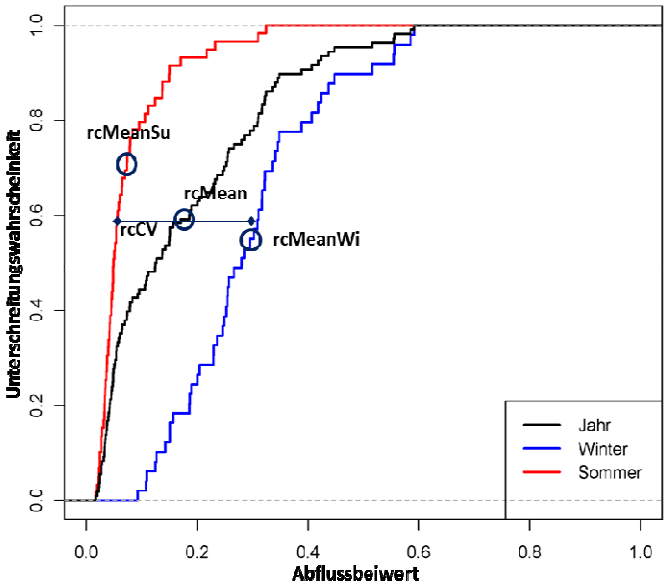


Abb. 3: Empirische Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Ereignisabflussbeiwerte (rc) für den Pegel Kellenbach und abgeleitete Indices

Aus diesen Kurven werden insgesamt 4 Signature Indices abgeleitet (LEY et al. 2011). Der Index *rcMean* beschreibt den mittleren Ereignisabflussbeiwert der gesamten Zeitreihe. Eine Veränderung in diesem Wert weist auf eine Modifikation der mittleren Speicherfüllungen hin. Der Index *rcCV* beschreibt die Varianz dieser Verteilung. Für die Sommer und Winterhalbjahre werden jeweils noch separat die mittleren Ereignisabflussbeiwerte bestimmt, um Veränderungen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr besser detektieren zu können: *rcMeanSu* für das Sommerhalbjahr und *rcMeanWi* für das Winterhalbjahr. Beim Vergleich von zwei Zeitreihen werden jeweils die Differenzen der Werte gebildet, diese werden im Folgenden verwendet (*ΔrcMean, ΔrcCV, ΔrcMeanSu, ΔrcMeanWi*).

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden jeweils 2 Datensätze paarweise auf Basis der genannten 9 Signature Indices verglichen. In den Diagrammen sind jeweils die Unterschiede (in %) für alle drei Pegel dargestellt.

4.1 Modellfehler

Der Abweichung zwischen simulierter und gemessener Ganglinie im Zeitraum 1993-2003 ist für die Gebiete Kronweiler und Kellenbach sehr niedrig (Abbildung 4). Einzig die erhöhten mittleren Abflussbeiwerte für den Sommer an den Pegeln Kronweiler und Kellenbach sind auffällig. Am Pegel Gensingen sind die Abweichungen zur gemessenen Ganglinie extrem hoch, was auf eine fehlerhafte Modelleichung oder möglicherweise auf eine fehlerhafte W-Q-Beziehung am Pegel schließen lässt. Beides wird auf der Basis der aktuellen Ergebnisse zurzeit untersucht.

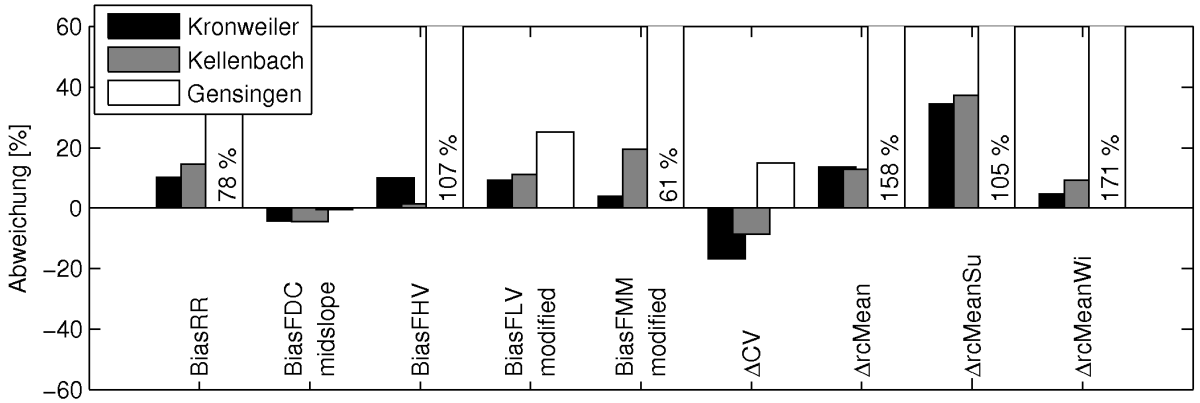


Abb. 4: Indizes des Vergleichs der (a) gemessenen Ganglinie mit (b) der simulierten Ganglinie bei gemessenen meteorologischen Eingangsdaten, 1993-2003

4.2 Abweichungen im COSMO-Referenzlauf

Der CCLM-Referenzlauf stellt eine virtuelle Zeitreihe dar, die den Jahren 1988-1997 zu geordnet wird. Es zeigt sich, dass die simulierten Abflüsse auf Basis der CCLM-Daten eine etwas andere Charakteristik aufweisen als die mit realem Antrieb errechneten Abflüsse (Abbildung 5). Am Pegel Kronweiler sind im Mittel leicht reduzierte Abflüsse (bei etwas erhöhtem Niedrigwasserabfluss) zu beobachten. Analog zu Abbildung 4 fällt auch hier auf, dass im Sommer die mittleren Abflussbeiwerte deutlich höher sind. Dies lässt den Schluss zu, dass

die zeitliche Verteilung (Sommer zu Winter) des Niederschlags in den beiden Zeitreihen nicht identisch ist. An den Pegeln Kellenbach und Gensingen wird ein durchgängig höherer Abfluss simuliert, insbesondere die Abflussspitzen und die Ereignisabflussbeiwerte sind hier signifikant höher.

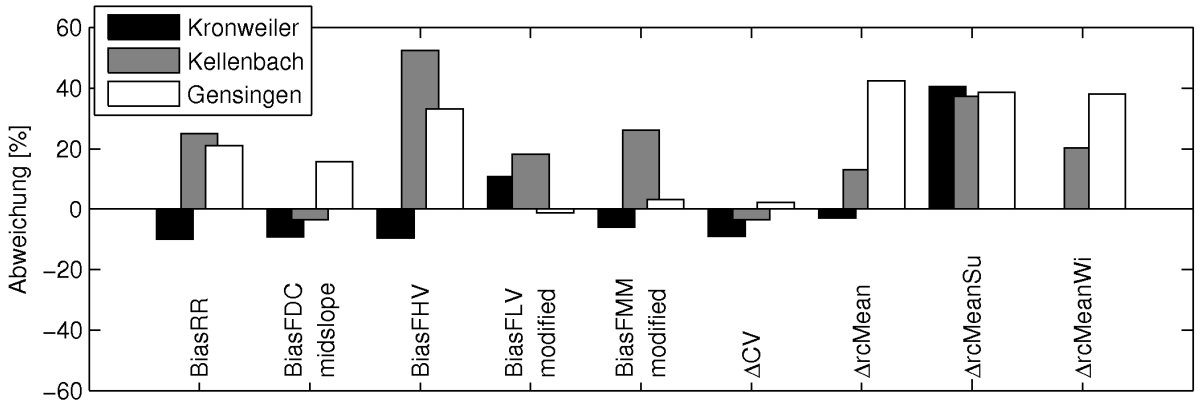


Abb. 5: Indizes des Vergleichs der simulierten Ganglinien mit (a) gemessenen meteorologischen Eingangsdaten und (b) BIAS-korrigierten CCLM-Daten, 1 km Auflösung, 1988-1997

4.3 BIAS-Korrektur

Die BIAS-Korrektur der simulierten CCLM-Daten fällt unterschiedlich stark aus: Während in Kronweiler nur eine leichte Zunahme der mittleren Abflüsse zu verzeichnen ist, werden Kellenbach und Gensingen deutlich nach unten korrigiert. Dies deutet auf eine systematische Überschätzung des Niederschlags durch das CCLM-Modell im Osten und Südosten des Nahe-Einzugsgebiets hin.

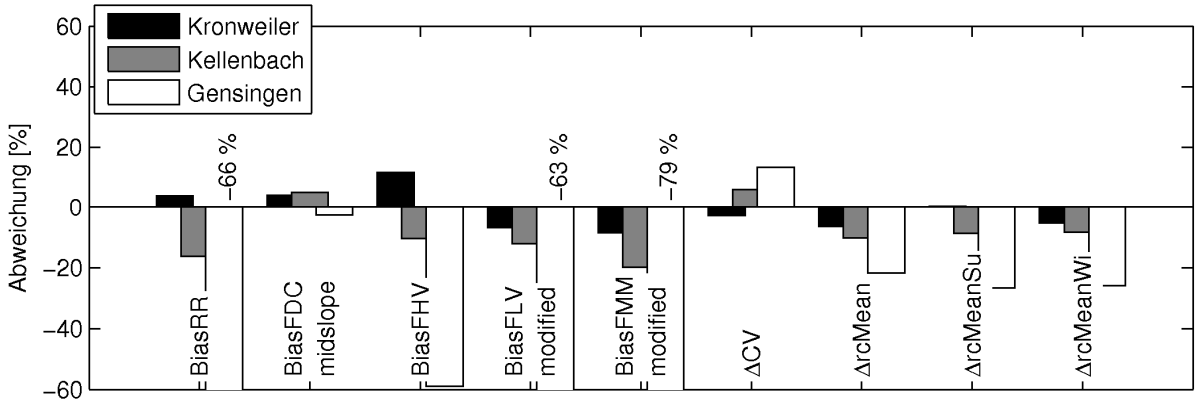


Abb. 6: Indizes des Vergleichs der simulierten Ganglinien mit (a) unkorrigierten COSMO-Daten, 1 km Auflösung, 2015-2024 mit (b) BIAS-korrigierten COSMO-Daten, 1 km Auflösung, 2015-2024

4.4 Klimaänderungssignal in den COSMO-Daten

Durch einen Vergleich von COSMO-Referenzlauf und der Zukunftsprojektion für den Zeitraum 2015-2024 ergibt sich ein den räumlichen Gegebenheiten entsprechendes Bild: In allen Gebieten kommt es zu einer Abnahme der Spitzenabflüsse, der für die Gebiete Gensingen und Kellenbach auch mit einer sichtbar reduzierten Reaktivität einhergeht. Das Abflussverhalten von Kronweiler bleibt hingegen weitgehend erhalten.

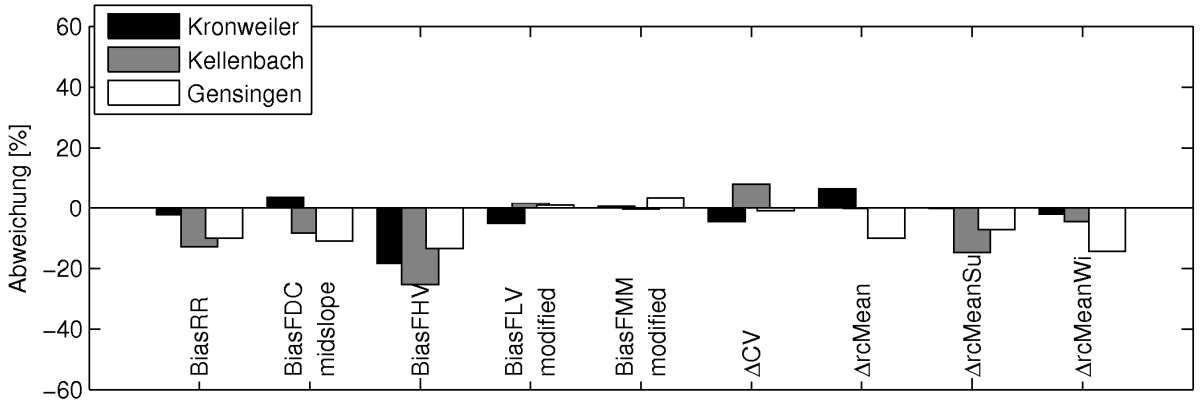


Abb. 7: Indizes des Vergleichs der simulierten Ganglinien mit BIAS-korrigierten COSMO-Daten, 1 km Auflösung, (a) 1988-1997 mit (b) 2015-2024

4.5 Einfluss der räumlichen Auflösung des Lokalmodells

Der Effekt einer räumlich höheren Auflösung des Lokalmodells für die 3 Sommermonate Juni, Juli und August (1.3x1.3 km² statt 5x5 km²) ist auf der Basis der gewählten Indizes nicht eindeutig quantifizierbar (Abbildung 8). Die ursprüngliche Erwartung einer etwas erhöhten sommerlichen Abflussaktivität ließ sich nicht belegen.

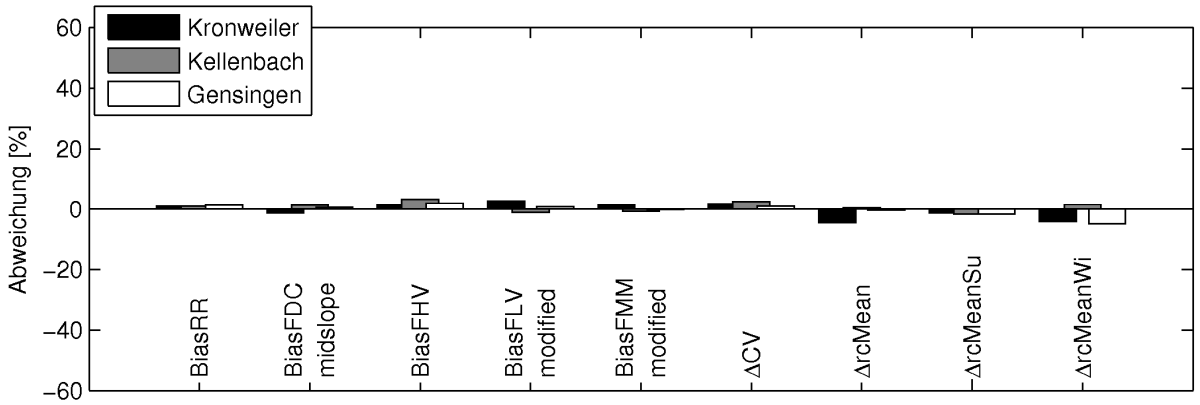


Abb. 8: Indizes des Vergleichs der simulierten Ganglinien mit (a) BIAS-korrigierten COSMO-Daten, 1 km Auflösung, 2015-2024 mit (b) BIAS-korrigierten COSMO-Daten, 5 km Auflösung, 2015-2024

5. Diskussion und Ausblick

Die vorgestellten Signature Indices weisen eine hohe Sensitivität hinsichtlich der raum-zeitlichen Verteilung des Niederschlags auf. Sie erlauben eine schnelle und intuitive Bewertung der Änderung des hydrologischen Verhaltens. Insbesondere ermöglichen sie einen Vergleich auch von relativ kurzen Zeitreihen ohne direkten zeitlichen Bezug. Damit wird es möglich, die Wirkung eines Klimaänderungssignals aus räumlich hochaufgelösten Klimamodellen hydrologisch zu interpretieren. Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass die raum-zeitliche Verteilung des simulierten Niederschlags noch nicht in Gänze dem realen Niederschlag entspricht. Die Analyse weiterer Antriebsdatensätze muss hier folgen, um die gefunden Zusammenhänge zu untermauern.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Land Rheinland-Pfalz u. a. im Rahmen des Projektes KlimLandRP (http://www.klimlandrp.de) und über das Forschungszentrum für Regional- und Umweltstatistik (http://forumstat.uni-trier.de) finanziert. Klima- und Abflussdaten wurden uns vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) in Mainz bereitgestellt.

Literatur

GUTJAHR, O., G. HEINEMANN, M. C. CASPER & A. ROCK (2011): Statistical bias correction for daily precipitation fields from COSMO-CLM over the Nahe catchment area. - Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU2011-3074-2, 2011

HERBST, M., H. V. GUPTA & M. C. CASPER (2009): Mapping model behaviour using Self-Organizing Maps. - Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 395-409

KNOTE, C., G. HEINEMANN & ROCKEL, B. (2010): Changes in weather extremes: Assessment of return values using high resolution climate simulations at convection-resolving scale. - Meteorol. Zeitschrift N.F. 19, 11-23

LEY, R., M. C. CASPER & R. MERZ (2011): Catchment Classification by Runoff Behaviour with Self-Organizing Maps (SOM). - Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net

LUDWIG, K. & M. BREMICKER (2006): The water balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. - Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.

MERZ, R., G. BLÖSCHL & J. PARAKJA (2006): Spatio-temporal variability of event runoff coefficients in Austria. - Journal of Hydrology, 331, 591 – 604

MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2009): A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. - Water Resour. Res., 45, doi:10.1029/2008WR007163.

OUDIN, L., A. KAY, V. ANDREASSIAN & C. Perrin (2010): Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? - Water Resour. Res., 46, W11558, doi:10.1029/2009WR008887

YILMAZ, K.K., H. V. GUPTA & T. WAGENER (2008): A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. - Water Resour. Res., 44, W09417

Modellkonzept vs. Modellierer – wer oder was ist wichtiger? Vergleichende Modellanwendung am Hühnerwasser-Einzugsgebiet

Helge Bormann, Hartmut M. Holländer, Theresa Blume, Wouter Buytaert, Giovanni B. Chirico, Jean-François Exbrayat, David Gustafsson, Herwig Hölzel, Philipp Kraft, Thomas Krauße, Ali Nazemi, Christian Stamm, Sebastian Stoll, Günter Blöschl, Hannes Flühler

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Modellvergleichs wurden zwölf verschiedene Modelle zur Vorhersage der Wasserflüsse im künstlichen Einzugsgebiet „Hühnerwasser“ (Chicken Creek) angewendet, das 2005 in einem Tagebaugebiet in der Lausitz angelegt wurde. Um zu prüfen, inwieweit eine a priori Vorhersage der Wasserflüsse möglich ist ohne gemessene Abflüsse zu kennen, wurde der Modellvergleich in mehreren Schritten konzipiert: Zunächst wurden den Modellierern nur Basisdaten hinsichtlich Bodentextur, Topographie, Pflanzenbedeckungsgrad und Klima sowie initiale Grundwasserstände bereitgestellt. Daten zu Bodenfeuchte und Abfluss wurden zurückgehalten, so dass Modelle und Modellierer im Hinblick auf ihre Prognosefähigkeit bei begrenzter Datenverfügbarkeit verglichen werden konnten. In weiteren Schritten wurde eine Geländebegehung inkl. Workshop durchgeführt sowie Informationen über weitere Gebietscharakteristika bereitgestellt. Während die Modellergebnisse vor allem im ersten Schritt der Modellanwendung sehr unterschiedlich ausfielen, näherten sie sich nach der Geländebegehung an. Waren zunächst die Simulationsergebnisse fast aller Modelle durch unterirdische Abflusskomponenten dominiert, wandelte sich das Prozessverständnis nach der Gebietsbegehung z.B. durch die Besichtigung von Erosionsrinnen und verkrusteten Bodenoberflächen. Infolgedessen veränderten sich die Modellergebnisse stärker als durch die nachfolgend zur Verfügung gestellten ergänzenden Daten, die v.a. zur Überprüfung der Parametrisierung und der Anfangsbedingungen genutzt wurden. Die Ergebnisse des Modellvergleichs lassen darauf schließen, dass die Entscheidungen der Modellierer die Hauptursache der anfänglichen Unterschiede in den Modellergebnissen war. Die Modellierer entschieden individuell über die Art der Nutzung der verfügbaren Daten, die Bestimmung der Modellparameter und Anfangsbedingungen in Abhängigkeit ihrer Modellierungs-Erfahrung, während sich die meisten Modelle konzeptionell nur bedingt unterschieden.

1. Einleitung

Infolge des Wandels der Umwelt besteht ein zunehmender Bedarf sowohl an hydrologischen Prognosen als auch an verbessertem Prozessverständnis (SIVAPALAN et al., 2003). Hydrologische Modelle können in beiden Fällen einen wertvollen Beitrag leisten. In der Vergangenheit sind konzeptionell unterschiedliche Modelle entwickelt und für vielfältige Fragestellungen eingesetzt worden. Vergleichende Modellstudien haben gezeigt, dass unterschiedliche Modelle ähnliche Sensitivitäten im Rahmen von Szenarioanalysen aufwiesen (HUISMAN et al., 2009), während in anderen Studien eher der Modellierer als das verwendete Modell als entscheidender Unterschied zwischen zwei Modellanwendungen identifiziert wurde (DIEKKRÜGER et al., 1995). Offen blieb aber die Frage, inwieweit der Einfluss des Modellierers von der jeweiligen Datenverfügbarkeit abhängt. Reduziert eine Verbesserung der Da-

tenbasis den Einfluss des Modellierers auf das Modellergebnis? Im Rahmen des Transregio-SFB 38 „Strukturen und Prozesse der initialen Ökosystementwicklung in einem künstlichen Wassereinzugsgebiet“ untersucht diese Studie den Einfluss von Modell und Modellierer auf die Simulationsergebnisse von a priori Modellanwendungen. Entsprechend den Zielen der PUB-Initiative (Predictions in Ungauged Basins; SIVAPALAN et al., 2003) werden verschiedene Modelle auf Basis limitierter Informationen über die Einzugsgebietscharakteristik angewendet, während Abflussdaten für eine Modellkalibrierung nicht verfügbar sind. Diese Studie verknüpft damit die Vorteile eines künstlichen Einzugsgebietes (definierte Randbedingungen) mit der Aufgabe, ein quasi unbeobachtetes Einzugsgebiet modellhaft abzubilden. Basierend auf dem Ansatz des Modellvergleichs wird die Fähigkeit zehn konzeptionell unterschiedlicher Modelle untersucht, die Wasserflüsse eines Einzugsgebiets abzubilden, das sich in einer Phase der initialen Ökosystementwicklung befindet, was sich durch eine allmähliche Veränderung von Einzugsgebietseigenschaften (z.B. Vegetation, Topographie, Sättigung) ausdrückt. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit die Bereitstellung zusätzlicher qualitativer und quantitativer Daten die Modellgüte und die Plausibilität der Ergebnisse verbessert.

2. Material und Methoden

2.1 Das Hühnerwasser-Einzugsgebiet

Das Hühnerwassereinzugsgebiet (Chicken Creek) hat eine Größe von ca. 6 ha und ist damit das weltweit größte künstliche Einzugsgebiet. Es wurde im Jahr 2005 von der Firma Vattenfall in Kooperation mit der BTU Cottbus in einem Braunkohletagebau-Gebiet in der Lausitz angelegt (GERWIN et al., 2009). Vertikal ist das Einzugsgebiet auf einem Gebiet von 450m * 130m durch eine 2m mächtige Tonschicht begrenzt (Abbildung 1). Auf den Ton wurde eine 2-3 m mächtige Sandschicht geschüttet, die Beimengungen von 2-25% Schluff und 2-16% Ton enthält und eine Neigung von 1-5% aufweist. Im unteren Teil des Einzugsgebietes wurde eine Mulde angelegt, in der sich nach 5 Jahren ein See gebildet hat, in dem sich der Abfluss des Einzugsgebiets sammelt. Das Klima des Gebietes ist feucht-gemäßigt. Bei einer Mitteltemperatur von 9,3°C (1971-2000) schwankte der jährliche Niederschlag in den letzten Jahrzehnten zwischen 335 mm und 865 mm. Das Einzugsgebiet wurde im Rahmen der Erstellung nicht bepflanzt, seit 2005 hat sich aber eine dichte Pflanzenbedeckung entwickelt, deren Entwicklung detailliert beobachtet wurde. Kontinuierlich werden Messdaten des Klimas, des Bodenwasserhaushalts, der Grundwasserstände und der Abflüsse erhoben, wobei zunächst nur die Klimadaten den Modellierern zur Verfügung gestellt wurden.

2.2 Simulationsmodelle und Modellierungsschritte

Im Rahmen des Modellvergleichs sind vier Modellierungsschritte geplant. Ergebnisse der ersten drei Schritte werden in diesem Beitrag präsentiert:

1) A priori Modellanwendung, basierend auf einer begrenzten Datenbasis (Rasterbasierte Informationen über Topographie, Tonschicht, Bodentextur, Bodenmächtigkeit, Vegetationsbedeckungsgrad; stündliche Klimadaten; initiale Grundwasserstände; Luftbild; Verbreitung von Erosionsrinnen), ohne das Einzugsgebiet vor Ort besichtigt zu haben.
2) Modellanwendung nach Diskussion der Modellergebnisse der a priori Modellanwendung im Rahmen eines Workshops sowie der Begehung des Einzugsgebietes.

3) Modellanwendung auf Basis zusätzlicher quantitativer Daten (u.a. bodenhydraulische Daten, bodenphysikalische Daten, Bodenwassergehalte, Infiltrationskapazitäten).
4) Modellanwendung nach der Kalibrierung der Modelle gegen den gemessenen Abfluss ausgewählter Abflussereignisse eines Teileinzugsgebietes (1,8 ha).

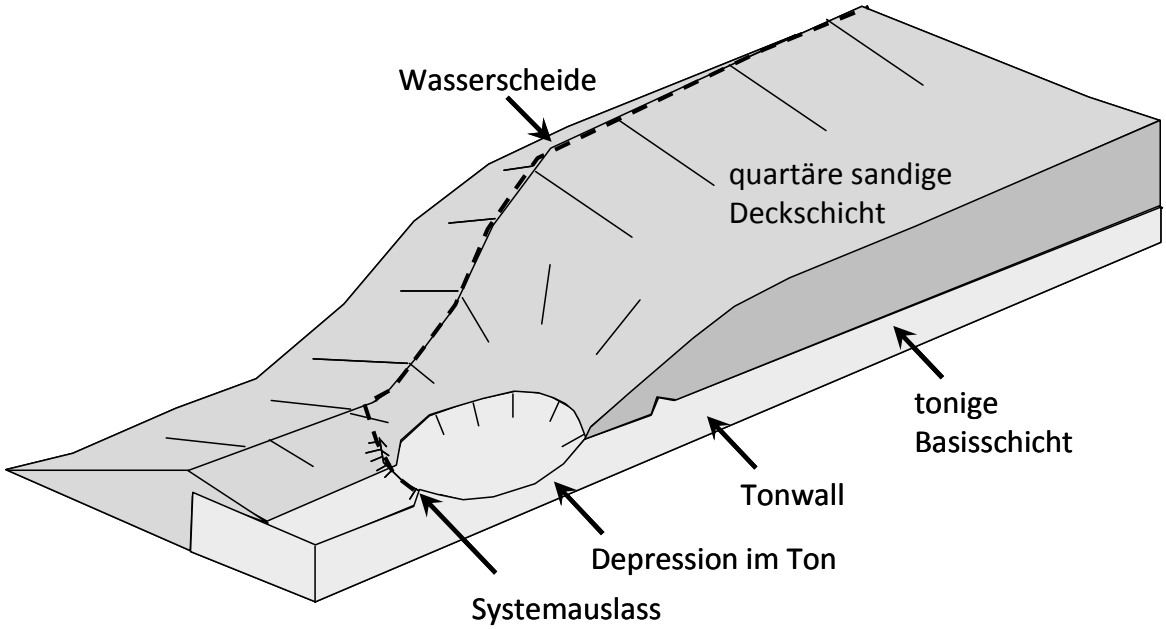


Abb. 1: Schematisches Längsprofil durch das Hühnerwasser-Einzugsgebiet (Quelle: Transregio-SFB, geändert).

Im Rahmen des Modellvergleichs wurden in jedem Modellierungsschritt durchschnittlich zehn verschiedene hydrologische Modelle von zehn unterschiedlichen Modellierern angewendet, um die Eignung hydrologischer Modelle einzuschätzen, die Wasserflüsse eines unbeobachteten Einzugsgebiets vorhersagen zu können. Die insgesamt 12 hydrologischen Modelle unterscheiden sich in ihrer räumlichen Dimensionalität, der Darstellung der räumlicher Variabilität sowie der Darstellung der hydrologischen Prozesse. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Charakteristika der eingesetzten Modelle (siehe auch HOLLÄNDER et al. 2009). Während fast alle Modellierer prozessorientierte Modelle auswählten, bewerteten sie die Notwendigkeit der Darstellung räumlicher Variabilität unterschiedlich. Hauptsächliche Kriterien für die Modellauswahl waren: Modellverfügbarkeit, Erfahrung mit dem jeweiligen Modell und Vertrauen in das Modell. Eine wichtige Randbedingung dieses Modellvergleichs war, dass alle Modellierer die Modellanwendung zusätzlich zu ihren eigentlichen Aufgaben durchführten und dafür finanziell nicht entlohnt wurden.

3. Simulationsergebnisse

3.1 A priori Modellanwendung

Der a priori Modellvergleich ergab eine große Streuung der von den verschiedenen Modellen simulierten Abflüsse. Bezogen auf den gemessenen mittleren jährlichen Abfluss lagen die simulierten Abflüsse zwischen 10 und 330%. Auch die Häufigkeitsverteilungen der von den verschiedenen Modellen simulierten Abflüsse unterschieden sich erheblich (Abbildung 2).

Tabelle 1: Angewendete Modelle, deren Dimensionalität und Prozessdarstellung.

Modell-Dimension	Infiltration	Ungesättigter Wasserfluss	Gesättigter Wasserfluss	Potentielle Verdunstung
Catflow-2D	Richards'	Richards'	Richards'	Penman-Monteith
CMF-3D	Richards'	Richards'	Darcy	Penman-Monteith
CoupModel-3D	Darcy	Richards'	Hooghoudt	Penman-Monteith
GSDW-Lumped	Green-Ampt	Speicheransatz	Speicheransatz	Penman-Monteith
Hill-Vi-3D	Rain	Gravity flow	Dupuit-Forchheimer	Penman-Monteith
Hydrus-2D	Richards'	Richards'	Richards'	Turc
Mike-SHE-3D	Richards'	Richards'	Darcy	Penman-Monteith
Net-Thales-3D	Rain	–	Kinematischer Fluss	Penman-Monteith
SIMULAT-1D	Richards'	Richards'	Darcy	Penman-Monteith
SWAT-3D	SCS	Bodenfunktion	Hooghoudt	Penman-Monteith
Topmodel-3D	Green-Ampt	Exp. Funktion	Laufzeit-Ansatz	Hargreaves
WaSiM-ETH-3D	Green-Ampt	Richards'	Darcy	Penman-Monteith
WaSiM-ETH-2D	Green-Ampt	Richards'	Linearer Speicher	Penman-Monteith

Nach HOLLÄNDER et al. (2009) konnten diese Unterschiede im Wesentlichen auf unterschiedliche Modellkonzepte und deren Parametrisierung zurückgeführt werden. Entscheidend wirkten sich die jeweiligen Annahmen der Modellierer aus, da z.B. der Anfangswassergehalt des Bodens nicht vorgegeben war. Die Annahmen variierten demzufolge zwischen ‚typischen' Bedingungen, Feldkapazität und dem Resultat iterativer Modellläufe. Infolgedessen war der simulierte Abfluss durchgängig zu groß, da der unterirdische Speicherraum zu Beginn nur teilweise gefüllt war. Aufgrund des sandigen Substrats simulierten die meisten Modelle hauptsächlich unterirdische Abflusskomponenten, obwohl die tiefen Rinnen im Einzugsgebiet auf Erosion infolge von Oberflächenabfluss hinweisen.

3.2 Modellanwendung nach Gebietsbegehung

Nach der a priori Modellanwendung trafen sich die Modellierer auf einem Workshop, präsentierten und analysierten die jeweiligen Modellergebnisse. Sie stellten fest, dass die verfügbaren Daten von den jeweiligen Modellierern in unterschiedlicher Weise genutzt worden waren. Nur wenige Modellierer nutzen die Informationen über den unterirdischen Tonwall (Abbildung 1), der in der Entstehungsphase des Gebietes zur Stabilisierung angelegt worden war und möglicherweise Einfluss auf die unterirdische Wasserspeicherung nimmt. In ähnlicher Weise nutzten nur wenige Modellierer die Information über das Vorhandensein von Erosionsrinnen zur Parametrisierung ihres Modells im Sine der erzwungenen Entstehung von Oberflächenabfluss. In Anschluss an Workshop und Gebietsbegehung korrigierten die Modellierer Modell-Setup und Parametrisierung. Sie nutzten dabei das im Feld gewonnene Prozessverständnis und führten überwiegend eine Kruste an der Bodenoberfläche ein, um die Infiltration zu reduzieren. FISCHER et al. (2010) haben mikrobiologische Krusten im Einzugsgebiet nachgewissen. Einige Modellierer berücksichtigten den unterirdischen Tonwall in den unterirdischen Modellkomponenten und korrigierten Vegetationsparameter auf Basis des Eindrucks der Feldbegehung.

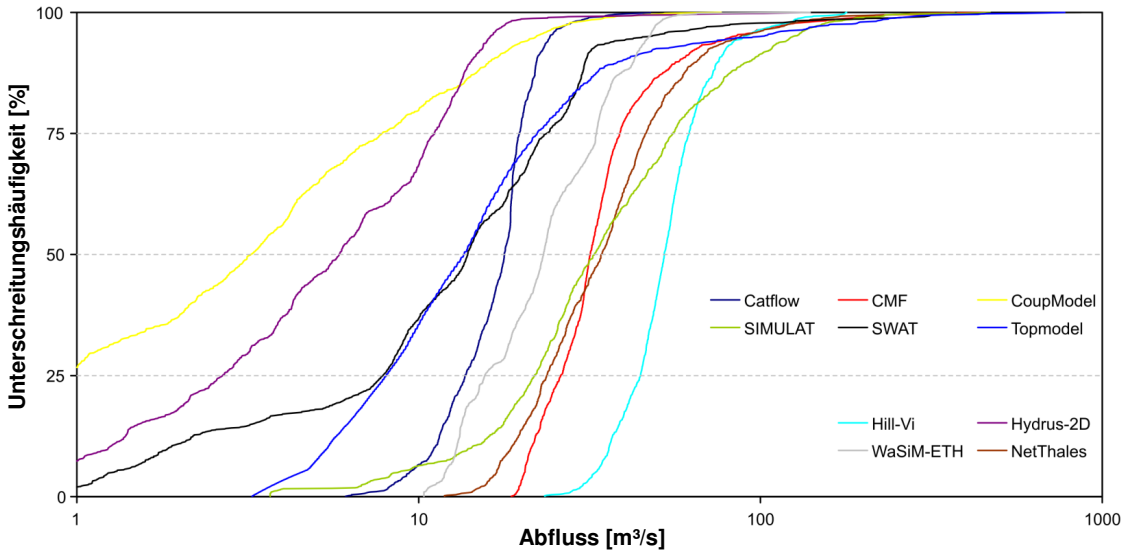


Abb. 2: Modellspezifische Unterschreitungshäufigkeit der simulierten Abflüsse (nach HOLLÄNDER et al., 2009)

Zwei Modellierer entschieden sich sogar, ihre Modelle aufgrund limitierter Eignung nicht weiter zu verwenden. Ein Modellierer passte seine Modellphilosophie an und wählte daraufhin ein anderes Modell aus (MIKE-SHE anstelle von Hill-Vi).
Als Ergebnis des im Feld gewonnen Prozessverständnisses änderten die Modellierer die Modell Setups weitestgehend in die gleiche Richtung, was sich in der Veränderung der simulierten Wasserflüsse widerspiegelte (Förderung von Oberflächenabfluss, Zunahme der unterirdischen Wasserspeicherung, Abnahme des Abflusses insgesamt). Deshalb nahm im Vergleich zur ersten Modellanwendung die Variabilität der simulierten Wasserflüsse ab (Abbildung 3).

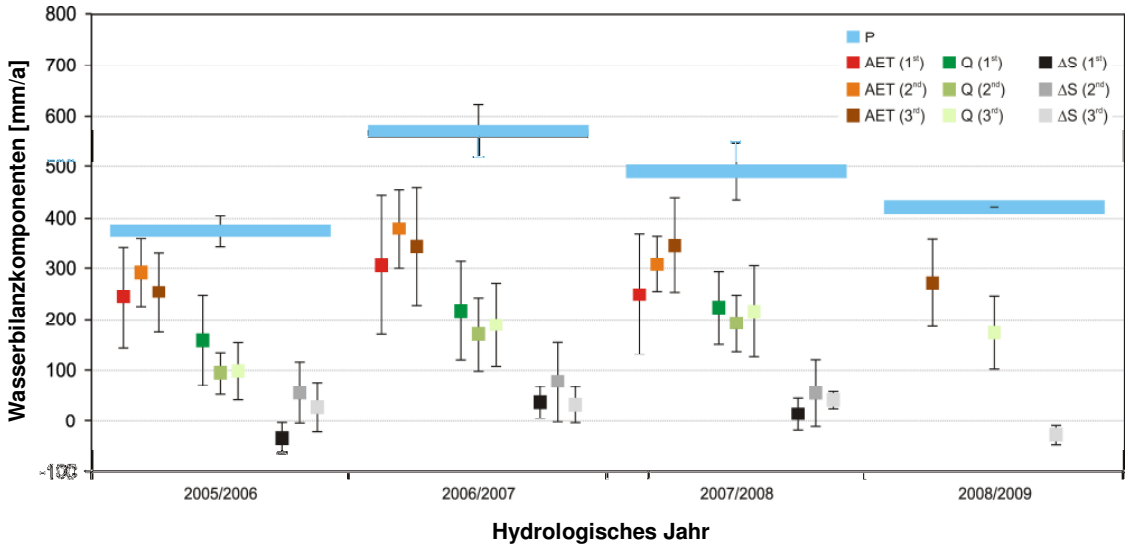


Abbildung 3: Änderung in den simulierten jährlichen Wasserbilanzen (Mittelwert, Standardabweichung) in den drei Modellierungsschritten. Die Variabilität im Niederschlag ergibt sich aus der von einzelnen Modellen durchgeführten Niederschlagskorrektur.

3.3 Modellanwendung auf Basis zusätzlicher Daten

Nach dem zweiten Modellierungsschritt wurden den Modellierern zusätzliche Daten zur Charakterisierung zur Verfügung gestellt. Bei der Auswahl der zusätzlichen Daten wurden sie aufgefordert, die (imaginären) Kosten der Datenerhebung zu berücksichtigen. Die meisten Modellierer wählten bodenhydraulische und bodenphysikalische Daten aus. Zeitreihen des Bodenwassergehaltes wurden ebenso häufig geordert, wohingegen nur wenige Modellierer erweiterte Vegetationsdaten, ein überarbeitetes Höhenmodell und ein neues Luftbild nachfragten. Die meisten Daten wurden mit dem Ziel abgerufen, die Modellparametrisierung zu überprüfen sowie Anfangs- und Randbedingungen anzupassen. Nur wenige Modellierer nutzen die Zeitreihen des Bodenwassergehalts zur Modellkalibrierung.

Im Vergleich zum Unterschied in der Wasserbilanz zwischen den ersten beiden Modellanwendungen bewirkte die Nutzung der zusätzlichen Daten nur kleinere Änderungen (Abbildung 3). Während sich die simulierten Abflüsse und die Speicheränderung systematisch veränderten (leichte Abnahme in allen Jahren), waren die Änderungen in der Verdunstung uneinheitlich. Die Variabilität innerhalb der Modelle nahm in Bezug auf Abfluss und Verdunstung zu, im Hinblick auf die Änderung der unterirdischen Wasserspeicherung aber ab.

4. Diskussion

Diese Studie bestätigt die Schlussfolgerungen von DIEKKRÜGER et al. (1995) hinsichtlich der Bedeutung des Modellierers bei der Modellanwendung, insbesondere bei a priori Vorhersagen. Die Entscheidungen der Modellierer, welche Daten in welcher Form zu nutzen, resultierten in deutlichen Unterschieden in den Modellergebnissen trotz relativer Ähnlichkeit der Prozessbeschreibungen der Modelle (Tabelle 1). Im Hinblick auf die simulierte Wasserbilanz hatte das durch die Gebietsbegehung erworbene Prozessverständnis großen Einfluss im Vergleich zu den später bereitgestellten zusätzlichen Daten, deren Erhebung z.T. recht aufwändig ist. Zwar bedarf das Verständnis von Systemzusammenhängen Daten (SILBERSTEIN, 2006), jedoch können diese in Übereinstimmung mit SEIBERT & MCDONNELL (2002) auch qualitativer Natur sein. Nach dem dritten Modellierungsschritt waren die Modellierer v.a. an ergänzenden Daten zur Quantifizierung der räumlichen Variabilität der hydraulischen Bodeneigenschaften interessiert, die nach GERWIN et al. (2009) deutlich größer ist, als es in einem homogenen, künstlichen Einzugsgebiet zu erwarten wäre, zumal die Übertragbarkeit von Pedotransferfunktionen von natürlichen auf künstliche Einzugsgebiete aufgrund des anthropogenen Einflusses nur begrenzt möglich ist. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der Einfluss der zusätzlich bereitgestellten Daten auf die Simulationen geringer war als der von Workshop und Gebietsbegehung. Das Verbesserungspotential durch zusätzliche Daten ist also möglicherweise begrenzt. Die Bodenwassergehalte und Grundwasserstände unterstützten die Modellierer v.a. bei der Wahl der Anfangsbedingungen, die im Falle einer initialen Einzugsgebietsentwicklung problematisch ist, da sich das Gebiet noch nicht im hydrologischen „Gleichgewicht“ befindet. Der letzte Modellierungsschritt der Kalibrierung auf Basis von Daten ausgewählter Abflussereignisse eines Teileinzugsgebiets wird zeigen, wie groß der Einfluss der Kalibrierung auf die Simulationsergebnisse ist.

5. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Wahl geeigneter Methoden (Modell, Parametrisierungsansatz) entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Der Modellierer nimmt aber mit seinen Entscheidungen mindestens ebenso großen Einfluss. Die Erfahrung des Modellierers scheint sogar wichtiger zu sein als das Modell. Der Modellierer entscheidet, wie Informationen genutzt und in Parameter, Anfangs- und Randbedingungen umgesetzt werden, welche Prozessbeschreibungen als geeignet angesehen werden. Es hat sich gezeigt, dass qualitative Informationen Modell-Setup und Modellergebnisse erheblich verändern können, mehr als es zusätzliche Daten in dieser Studie getan haben. Der visuelle Eindruck eines Gebietes mit geübtem Auge führt evtl. sogar eher zu einer Anpassung des Modellkonzepts als ein Datensatz unbekannter Qualität. In dieser Studie haben die zusätzlich erhobenen Daten im Wesentlichen die zuvor getroffenen Entscheidungen bestätigt. Dieses Ergebnis ist besonders bedeutsam für die Simulation der Wasserflüsse „unbeobachteter" Einzugsgebiete. Hier stellt sich die Frage, welche Daten es sich am ehesten zu erheben lohnt, und inwieweit z.B. Fernerkundungssysteme terrestrische Datenerhebung und Begehung ersetzen können. Wenn im letzten Schritt alle Modelle auf Basis gemessener Abflüsse kalibriert worden sind, kann hierzu eine endgültige Aussage getroffen werden.

Danksagung

Die Autoren danken der DFG für die Förderung des Transregio-SFB 38 „Strukturen und Prozesse der initialen Ökosystementwicklung in einem künstlichen Wassereinzugsgebiet".

Literatur

DIEKKRÜGER, B. et al. (1995): Validity of agroecosystem models - a comparison of results of different models applied to the same data set. – Ecological Modelling 81(1-3), 3-29.

FISCHER, T. et al. (2010): Initial pedogenesis in a topsoil crust 3 years after construction of an artificial catchment in Brandenburg, NE Germany. – Biogeochemistry, 101, 165-176.

GERWIN, W. et al. (2009): The artificial catchment "Chicken Creek" (Lusatia, Germany) – A landscape laboratory for interdisciplinary studies of initial ecosystem development. – Ecological Engineering, 35, 1786-1796.

HOLLÄNDER, H.M. et al. (2009): Comparative predictions of discharge from an artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data. – HESS, 13, 2069-2094.

HUISMAN, J.A. et al. (2009): Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) III: scenario analysis. – Advances in Water Resources, 32, 159-170.

SEIBERT, J. & J.J. MCDONNELL (2002) On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multi-criteria model calibration. – Water Resources Research, 38(11), 1241.

SILBERSTEIN, R.P. (2006): Hydrological models are so good, do we still need data? – Environmental Modelling and Software, 21, 1340-1352.

SIVAPALAN, M. et al. (2003): IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. – Hydrological Sciences Journal, 48(6), 857-880.

Abflusstrends in Europa: Vergleich eines Multi-Modell-Experiments mit Beobachtungen

Kerstin Stahl, Lena M. Tallaksen, Jamie Hannaford, Henny A.J. van Lanen

Zusammenfassung

Die Auswirkungen des globalen Wandels auf die regionale Hydrologie werden meist mit großskaligen hydrologischen Modellen (GHMs) oder Landoberflächenmodellen (LSMs) simuliert. Validiert werden diese Modelle hauptsächlich an Abflussdaten einiger weniger großer kontinentaler Flüsse, interpretiert werden jedoch häufig auch die simulierten räumlichen Muster. Im Multi-Modell Experiment des EU Projekts WATCH wurden GHMs und LSMs mit dem gleichen Klimainput angetrieben, um Unterschiede verschiedener globaler Modelle zu untersuchen. Die hier vorgestellte Studie vergleicht die modellierten Abflusstrends des Zeitraums 1963 bis 2000 mit denen eines europaweiten Datensatzes beobachteter Abflüsse kleiner unbeeinflusster Einzugsgebiete. Der Schwerpunkt lag dabei auf räumlichen Mustern in den Trends der standardisierten Jahresabflüsse, der Monatsabflüsse, sowie der 7-tätigen Minima und Maxima. Die Ergebnisse zeigen, dass die räumliche Verteilung europaweiter Trends im simulierten jährlichen Abfluss relativ gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Dies beweist hauptsächlich die Qualität des Klimainputs. Die saisonalen Trends, sowie die Trends im Niedrig- und Hochwasser jedoch zeigen starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen und zwischen Modellen und Beobachtungen. Diese Unterschiede betreffen sowohl die großen räumlichen Muster in Europa als auch die Variabilität innerhalb einer Region und lassen sich zum Teil auf bekannte Schwierigkeiten der Modellierung von Grundwasserspeicherung und Abflussbildung zurückführen. Die Ergebnisse geben einen wertvollen Einblick in Stärken und Grenzen der großskaligen Modellierung für die regionale Anwendung.

1. Einleitung

Die Detektion und Attribution von Veränderungen im Abflussverhalten ist ein wichtiger Baustein bei der Erforschung der Einflüsse des globalen Wandels auf die Hydrologie. Eine Vielzahl von Untersuchungen hat beobachtete und in die Zukunft projizierte Änderungen des Abflussverhaltens auf globaler Skala analysiert und kartiert (u.a. MILLY et al. 2005; GERTEN et al. 2008; DAI et al. 2009). Ebenfalls wurden viele statistische Untersuchungen auf nationaler oder regionaler Skala durchgeführt. Europaweite Analysen sind seltener, da Datenaustausch und Homogenisierung eine Reihe von Schwierigkeiten beinhalten (VIGLIONE et al. 2010; HANNAH et al. 2010). Die Wirtschaftsgemeinschaft, grenzüberschreitende Flüsse und die EU Wasserrahmenrichtline erfordern jedoch einen Blick über die Grenzen. Dies erscheint besonders dringend, da die meisten globalen und kontinentalen Untersuchungen eine Teilung Europas in einen feuchter werdenden Norden und trockener werdenden Süden diagnostiziert haben (z.B. KLEIN TANK et al. 2002). Diese klimatischen Trends hatten auch Auswirkungen auf das Abflussverhalten europäischer Fliessgewässer in den letzen Jahrzehnten. STAHL et al. (2010) fanden verbreitet positive Abflusstrends (mehr Abfluss) in den Wintermonaten, während sich von April bis August negative Trends (weniger Abfluss) in Europa ausbreiten. Die gleiche Studie fand einen Rückgang der Niedrigwasserabflüsse in den-

jenigen Regionen, in denen die niedrigsten monatlichen Abflüsse im Sommer auftreten. In Regionen mit Winterniedrigwasser (Alpen und nordische Länder) oder einem sekundären Sommerniedrigwasser zeigten sich unterschiedliche Trends.
Gestützt auf Beobachtungen, Simulationen, oder eine Kombination aus beiden, hilft die Untersuchung zeitlicher Trends und Schwankungen dem besseren Verständnis von Prozessen sowie der langfristigen wasserwirtschaftlichen Planung. Die hier vorgestellte Untersuchung widmet sich der Frage, inwieweit großskalige hydrologische Modelle beobachtete räumlich differenzierte Trends abbilden können. Neben den meist verglichenen jährlichen Mittelwerten und hydrologischen Regimen über lange Zeiträume, sollten Modelle, die zur Abschätzung von Klimafolgen angewandt werden, auch langfristige Veränderungen Abflussgeschehen abbilden können. Vor dem Hintergrund der Modellstrukturen und Parametrisierungen können Unterschiede der Modelle bei der Wiedergabe dieser Eigenschaften auch dabei helfen, die Ursachen saisonaler Trends sowie Trends der Extreme besser zu erklären. Die Arbeit nutzt hierfür Daten eines internationalen Multi-Modell Experiments, berechnet Trends der jährlichen, monatlichen, und 7-tätigen Hoch- und Niedrigwasser Abflüsse, und vergleicht diese mit Trends aus beobachteten Abflusszeitreihen in verschiedenen Regionen Europas.

2. Datengrundlage und Methodik

Die verwendeten Datensätze wurden zu einem großen Teil innerhalb des integrierten EU Projekts ‚Water and Global Change (WATCH)' zusammengestellt. WATCH verbindet Hydrologie, Wasserwirtschaft und Klimatologie, um die globalen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs zu analysieren, sowie zukünftige Änderungen abzuschätzen. Ein Teilprojekt ist das ‚Water Model Intercomparison Project (WaterMIP)' sowie der ‚Multi-Model Comparison of Extremes', ein Vergleich der Simulationen großskaliger hydrologischer Modelle und Landoberflächenmodelle. Alle Modelle wurden auf dem gleichen räumlichen Raster von 0,5 Grad aufgesetzt und mit dem gleichen Klimainput, dem Watch Forcing Data (WEEDON et al. 2010), getrieben. Dieser neue Klimadatensatz beruht auf einer Korrektur des absoluten Fehlers (bias correction) von Temperatur und Niederschlag der ERA-40 Re-Analyse Simulation mittels spezifischer Transferfunktionen. HADDELAND et al. (2011) beschreiben die Details des Modellvergleichs sowie erste Ergebnisse. Alle Modelle des Projekts geben die verschiedenen Variablen des simulierten Wasserkreislaufs in einem standardisierten Format aus. Der hier vorgestellten Untersuchung stand der simulierte tägliche Abfluss der Rasterzellen, bestehend aus der Summe der simulierten schnellen und langsamen Abflusskomponenten, von acht Modellen zur Verfügung. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich von 1963 bis 2000. Er ist limitiert durch den Zeitraum der ERA-40 Re-analyse und einer mehrjährigen Modellinitialisierung.
Demgegenüber standen 445 Zeitreihen beobachteter Abflüsse aus den Messnetzen 15 europäischer Länder zur Verfügung. Sie sind Teil des vor kurzem aktualisierten und innerhalb von WATCH ergänzten Europäischen Wasser Archivs (EWA, http://nefriend.bafg.de/servlet/is/7413/), der Datenbank des UNESCO-IHP FRIEND Programms. Diese Abflussdaten kleiner, relativ unbeeinflusster Einzugsgebiete wurden vor kurzem auf Trends untersucht (STAHL et al. 2008; STAHL et al. 2010) und bieten somit eine Vergleichsmöglichkeit für die Multi-Modell Simulationen. Leider sind für viele Regionen Europas,

besonders im Süden und Osten, keine Beobachtungsdaten erhältlich und auch die Dichte der Beobachtungen variiert stark.
Zur Vereinfachung des Vergleichs von Beobachtungen und Simulationen wurden die Pegeldaten derjenigen Rasterzelle des Modells zugeordnet in welcher der Pegel liegt. Rasterzellen mit mehreren Pegeln wurde ein nach Einzugsgebietgröße gewichtetes Mittel der beobachteten Tagesabflüsse zugeordnet. Hieraus ergeben sich 298 Rasterzellen mit simulierten und beobachteten mittleren Tagesabflussdaten zum Vergleich. Aus diesen Daten wurden Zeitreihen der Jahresmittelwerte, Monatsmittelwerte, sowie der 7-tägigen jährlichen Minima und Maxima berechnet. Diese wurden dann jeweils standardisiert und die Trends über den Zeitraum 1963-2000 als Steigung der Kendall-Theil Robust Line (auch Sen Slope genannt) ermittelt (THEIL 1950).

3. Ergebnisse

Die Trends im simulierten jährlichen Abfluss der meisten Modelle sind sehr ähnlich. Die mittlere absolute Abweichung zwischen dem Trend der Beobachtungsdaten und dem mittleren Trend der Simulation aller 298 Rasterzellenpaare beträgt 0,47 Standardabweichungen über die Zeitperiode. Die Abweichung der einzelnen Modelle liegt knapp über diesen Wert, nur das Modell ‚H08' schneidet deutlich schlechter ab. Der Vergleich der räumlichen Verteilung der Trends der beobachteten Jahresabflüsse mit dem Mittelwert der Trends aller Modelle (‚Ensemble' in Abbildung 1) zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung besonders bei die vorherrschenden positiven Trends in Nordeuropa sowie die negativen Trends in Südfrankreich und Spanien. Unterschiede zwischen Beobachtungen und Simulationen zeigen sich in den ohnehin sehr variablen Trends in Mitteleuropa. Im Ensemble wie auch in den räumlichen Mustern der Trends der Einzelmodelle ist eine deutlich größere räumliche Homogenität als in den Beobachtungen zu sehen.

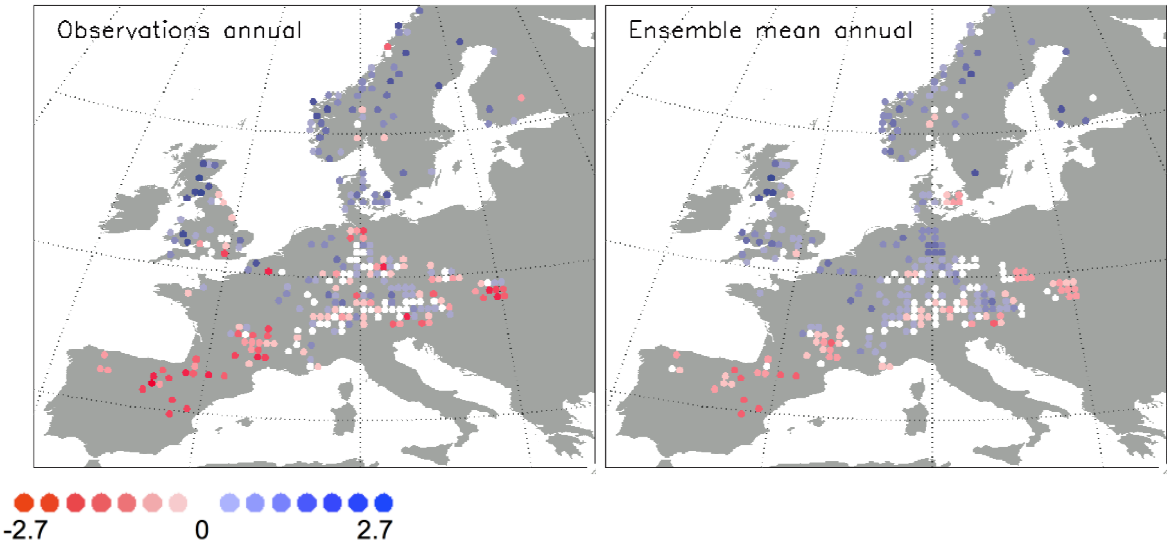


Abb. 1: Trends im Jahresabfluss: Beobachtungen (links) und Mittelwert der acht Modelle (rechts). Einheiten in Standardabweichungen über die Zeitperiode.

Größere Unterschiede ergab der Vergleich der monatlichen Trends. Abbildung 2 zeigt die mittlere absolute Abweichung zwischen dem Trend der Beobachtungsdaten und dem Trend

der Simulation aller 298 Rasterzellenpaare. Die Werte variieren zwischen 0,3 und 0,7 Standardabweichungen über den Untersuchungszeitraum. Der Mittelwert der Modelle (Ensemble) zeigt für beinahe alle Monate die geringsten Abweichungen. Im Monat März sind die Abweichungen am höchsten, in den Monaten Oktober und November am niedrigsten. Die größten Unterschiede zwischen den Modellen gibt es von März bis Juli. Hydrologische Modelle zeigen generell geringere Abweichungen als Landoberflächenmodelle. Im Durchschnitt am besten repräsentiert das Modell ‚WaterGAP' die monatlichen Trends, gefolgt von den GHMs ‚MPI-HM' und ‚GWAVA' sowie vom LSM ‚Jules'. Weniger gut werden die monatlichen Trends von ‚LPJ' sowie von den LSMs ‚HTessel', ‚Orchidee', und ‚H08' repräsentiert.

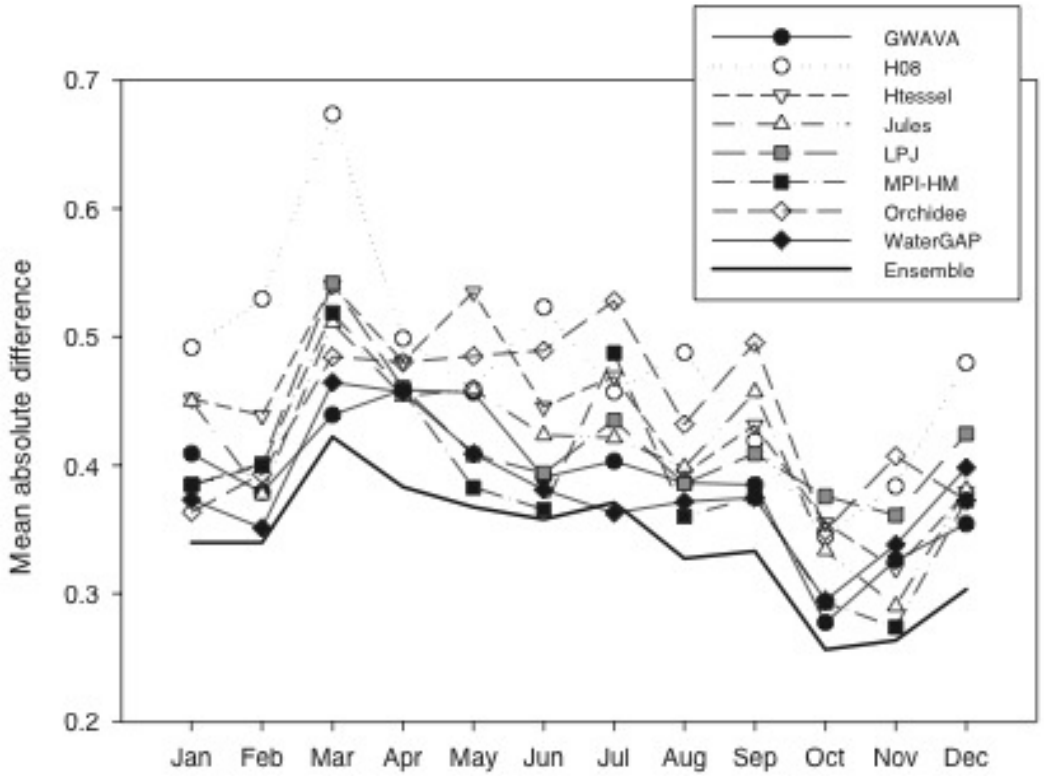


Abb. 2: Mittlere absolute Abweichung (in Standardabweichungen) zwischen den Trends der Beobachtungen und Modellsimulationen. Offene Symbole bezeichnen die von HADDELAND et al. (2011) als Landoberflächenmodelle klassifizierten Modelle, gefüllte Symbole die hydrologischen Modelle.

Auch für die Trends im 7-tägigen Jahresminimum und –maximum zeigt jeweils das Modellensemble die geringste mittlere absolute Abweichung zu den Trends in den Beobachtungen. Bei den Niedrigwassertrends wurde das Modell ‚LPJ' nicht berücksichtigt, da es mit wenigen Ausnahmen an der norwegischen und schottischen Westküste überall und jedes Jahr ein 7-tägiges Minimum von 0 mm Abflusshöhe simuliert. Auch beim Modell ‚Orchidee' gibt es unrealistisch oft keinen Abfluss zu Trockenwetterzeiten. Die Simulationen zeigen insgesamt vornehmlich abnehmende Trends im sommerlichen Niedrigwasser in Europa (Abbildung 3). Die Beobachtungsdaten weisen hingegen eine große lokale Heterogenität auf, insbesondere im Alpenraum und in Skandinavien. Beim 7-tägigen jährlichen Maximum ähnelt das räumliche Muster der Trends der Beobachtungen zum Teil dem für den Jahresabfluss

mit einer Zunahme im Norden und Westen und einer Abnahme im Süden und Osten. Ausnahmen sind im Landesinnern von Norwegen und Schweden zu sehen, wo die Jahresmittel zugenommen haben, die Jahresmaxima aber eher abgenommen haben. Das Modellensemble zeigt das Muster korrekt, wie schon bei den anderen Kenngrößen aber schwächer und homogener.

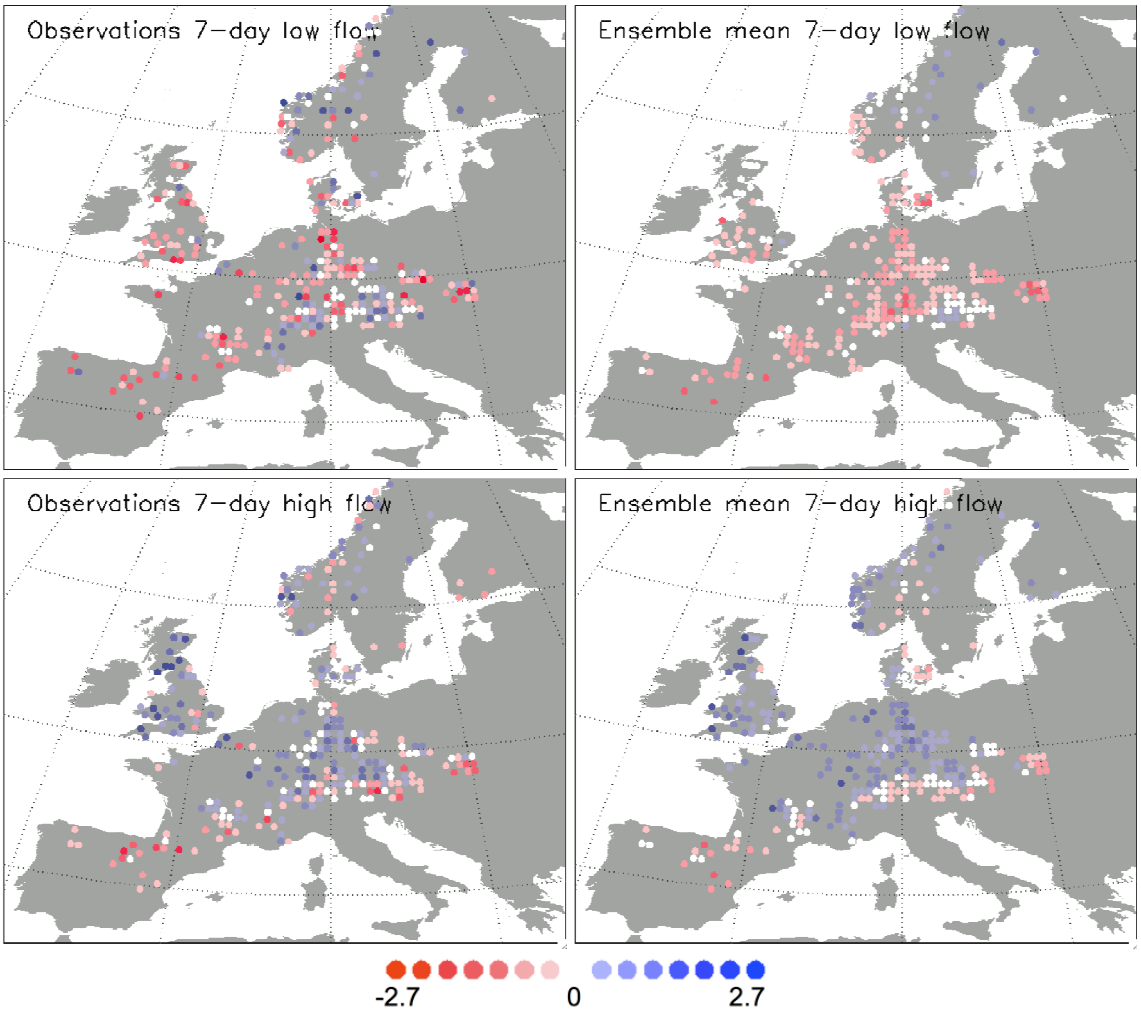


Abb. 3: Trends im 7-tätigen jährlichen Sommerminimum (oben) und im 7-tätigen jährlichen Maximum (unten): Beobachtungen (links) und Mittelwert der acht Modelle (rechts). Einheiten in Standardabweichungen über die Zeitperiode.

4. Diskussion und Schlussfolgerung

Die räumlichen Muster positiver und negativer Jahres- und Monatstrends des Abflusses bestätigen die in der Einleitung beschriebenen Ergebnisse der Studie von STAHL et al. (2010), obwohl der hier betrachtet Zeitraum 1963-2000 etwas kürzer ist und z.B. nicht den extremen Sommer 2003 beinhaltet. Die Trennlinie zwischen positiven jährlichen Abflusstrends im Norden und Westen Europas und negativen Abflusstrends im Süden und Osten Europas wird von den Simulationen der acht Modelle grundsätzlich wiedergegeben. Gleiches gilt für die Trends im 7-tätigen jährlichen Maximum, die v.a. in den Modellen, den Ergebnissen für die Jahreswerte sehr ähnlich sind. Daraus kann geschlossen werden, dass die Modelle zur Betrachtung solcher räumlicher Muster grundsätzlich geeignet sind. Das korrekte grundsätzli-

che Muster dieser Veränderungen, das alle Modelle zeigen, ist jedoch wohl hauptsächlich dem dem fehlerkorrigierten Klimainput zuzuschreiben. Lokale Abweichungen von regionalen Trendmustern, wie z.B. einzelne negative Trends in Deutschland und im Osten Englands, werden nur von wenigen Modellen erfasst. Bei letzteren handelt es sich u.a. um hydrologische Systeme mit größerer Persistenz (z.B. LAIZE & HANNAH 2010), die mit der einfachen Konzeptionalisierung der Boden- und (oft nicht explizit modellierten) Grundwasserspeicher und somit des Basisabflusses in den hier berücksichtigten großskaligen Modelle nicht wiedergeben kann.
Weitere Differenzen wurden in den Monaten, in denen der Abfluss regional von der Schneeschmelze abhängt, deutlich. Die vielerorts über die letzen Jahrzehnte bemerkte Verschiebung der Schneeschmelze zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr verursacht zum Beispiel in Skandinavien positive Trends im März in Schweden und Finnland und im April in Norwegen sowie darauffolgend jeweils negative Trends. Beide werden jedoch von den Modellen nicht in entsprechender Stärke und räumlicher Verteilung reproduziert. In anderen Monaten ist es jedoch schwierig, Veränderungen entweder dem saisonalen Klimainput, den Modellstrukturen, oder aber auch der Repräsentativität des Beobachtungsdatensatzes zuzuschreiben. Hierzu müssten auch Informationen über Trends in den Klimavariablen und detaillierte Gebietsinformationen herangezogen werden. Insgesamt bleibt auch zu berücksichtigen, dass die Einzugsgebiete aus denen die Beobachtungen stammen meist kleiner sind als eine 0,5 Grad Rasterzelle, und dass sie in den Gebirgsregionen tendenziell eher höhere Regionen repräsentieren. Nichtsdestotrotz ermöglicht der Vergleich der Trends Aussagen darüber, welche Modelle Änderungen bestimmter Kenngrößen besser und schlechter wiedergeben können und kann somit die Wahl von Modellen für bestimmte Zwecke unterstützen. Das jeweils beste Abschneiden des Mittelwerts des Modellensembles untermauert auch schon vielfach beschriebene Vorteile eines Ensemble Ansatzes (z.B. TEUTSCHBEIN & SEIBERT, 2010).
Die absoluten Werte der Trends sind schwieriger zu interpretieren, da sie in dieser Arbeit relativ zur Variabilität der jeweiligen Variable ausgedrückt wurden, um einen qualitativen Vergleich über verschiedene Klimazonen mit stark unterschiedlichen Größenordnungen sowie mit großen Unterschieden zwischen intra- und inter-jährlichen Schwankungen, zu ermöglichen. Es fällt jedoch auf, dass die Trends, nicht nur des Ensembles, sondern auch der einzelnen Modelle, oft um etwa die Hälfte geringer sind. Die Ergebnisse hängen auch davon ab, wie gut die Modelle die grundsätzliche Variabilität der Hydrologie und somit der Bezugsgröße in dieser Arbeit simulieren. Deshalb sollten weitere Untersuchungen eine Quantifizierung der Unterschiede anstreben.

Danksagung
Die Autoren bedanken sich bei den Behörden der Länder, die Abflussdaten zur Verfügung gestellte haben, beim WaterMIP Team und dem WATCH Projekt (Vertrag Nr. 036946) für die Bereitstellung der Modellsimulationen, sowie bei Lukas Gudmundsson für das Extrahieren der überlagerten Zeitreihen.

Literatur

DAI, A., T. QIAN, K. E. TRENBERTH & J. D. MILLIMAN (2009): Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004, J. Climate, 22, S. 2773-2791.

GERTEN, D., S. ROST, W. VON BLOH, W. LUCHT (2008): Causes of change in 20th century global river discharge. Geophysical Research Letters, 35, L20405.

HADDELAND, I., D. B. CLARK, W. FRANSSEN, F. LUDWIG, F. VOSS, et al. (eingereicht): Multi-model estimate of the global water balance: setup and first results, J. Hydrometeorol.

HANNAH, D. M., S. DEMUTH, H. A. J. VAN LANEN, U. LOOSER, C. PRUDHOMME, G. REES, K. STAHL, & L. M. TALLAKSEN (2010): Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs, Invited Commentary, Hydrol. Processes, doi:10.1002/hyp.7794 (in press).

KLEIN TANK; A.M.G., J. B. WIJNGAARD, G.P. KONNEN et al. (2002) Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment, Int. J. Climatol., 22, S. 1441–1453.

LAIZÉ, C. R. L. & D.M. HANNAH (2010): Modification of climate-river flow associations by basin properties, J. Hydrol., 389, S.186–204.

MILLY, P. C. D., K. A. DUNNE & A.V. VECCHIA (2005): Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, Nature, 438, S. 347-350.

STAHL, K., H. HISDAL, L. M. TALLAKSEN, H.A.J. VAN LANEN, J. HANNAFORD & E. SAUQUET (2008): Trends in low flows and streamflow droughts across Europe. UNESCO Report. Paris. 39 Seiten.

STAHL, K., H. HISDAL, L. M. TALLAKSEN, H.A.J. VAN LANEN, J. HANNAFORD, E. SAUQUET, M. FENDEKOVA & J. JORDAR (2010): Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. Hydrology and Earth System Sciences, 14, S. 2367–2382.

TEUTSCHBEIN, C. & J. SEIBERT (2010) Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment-Scale: A Review of Recent Modeling Strategies, Geography Compass 4/7, S. 834–860.

THEIL, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Indag. Math., 12, S. 85—91.

VIGLIONE, A., M. BORGA, P. BALANBANIS & G. BLÖSCHL (2010): Barriers to the exchange of hydrometeorological data in Europe: Results from a survey and implications for data policy, J. Hydrol. 394, S. 63-77.

WEEDON, G., S. GOMES, P. VITERBO, H. STERLE, J. ADAM, N. BELLOUIN, O. BOUCHER & M. BEST (2010): The WATCH forcing data 1958-2001: a meteorological forcing dataset for land surface- and hydrological-models, WATCH Technical Report 22, WATCH Technical Report, (www.eu-watch.org).

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime der Eifel-Rur

Bernd Hausmann, Heribert Nacken

Zusammenfassung

Für drei 30-Jahre-Perioden (1961-1990/2021-2050/2071-2100) wurden mit NASIM, einem räumlich hoch aufgelösten prozessdifferenzierten, konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modell, sowie GR4J, einem konzeptionellen Blockmodell, Simulationen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag durchgeführt. Für die Zukunftszustände wurden dabei jeweils ein nasses und ein trockenes Szenario auf Grundlage von Änderungsfaktoren für Nordrhein-Westfalen (NRW) betrachtet.

Bezüglich der mittleren monatlichen Abflüsse wird für beide Zukunftszeiträume unabhängig von der Wahl des Szenarios und des hydrologischen Modells für die Monate von Juni bis September eine Minderung prognostiziert. Für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts werden für das trockene Szenario (CLM) vergleichbare Werte simuliert. Für das nasse Szenario (WETTREG) werden für 2071-2100 größere Werte berechnet als für 2021-2050.

Bezüglich der Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr (Oktober bis März) werden für beide Zukunftszeiträume für das trockene Szenario nur geringe Änderungen prognostiziert. Für das nasse Szenario wird ein stetiger Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts vorhergesagt. Für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren wird ein maximaler Anstieg um ca. 60% (nass, 2071-2100, GR4J) simuliert.

1. Inhalt

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des europäischen Interreg IVb-Projektes AMICE (Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions) durchgeführt. Hauptziel ist die Abschätzung der klimabedingten Veränderungen im Abflussregime der Rur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Für drei 30-Jahre-Perioden (1961-1990/2021-2050/2071-2100) wurden mit einem räumlich hoch aufgelösten prozessdifferenzierten, konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modell (NASIM) sowie einem konzeptionellen Blockmodell (GR4J) Simulationen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag durchgeführt. Für die Zukunftszustände wurden dabei jeweils ein nasses und ein trockenes Szenario betrachtet.

2. Das Projektgebiet

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das 2.338 km² große Einzugsgebiet der Rur, die im Quellbereich 10 Kilometer durch Belgien, anschließend 132 Kilometer durch Deutschland und schließlich im Mündungsbereich 21 Kilometer durch die Niederlande fließt, und in dem ca. 1.1 Millionen Menschen leben. Von knapp 700 m ü. NN im Quellbereich der Eifel fällt die Rur dabei auf ca. 15 m ü. NN an der Mündung in die Maas bei Roermond. Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 855 mm (MUNLV 2005).

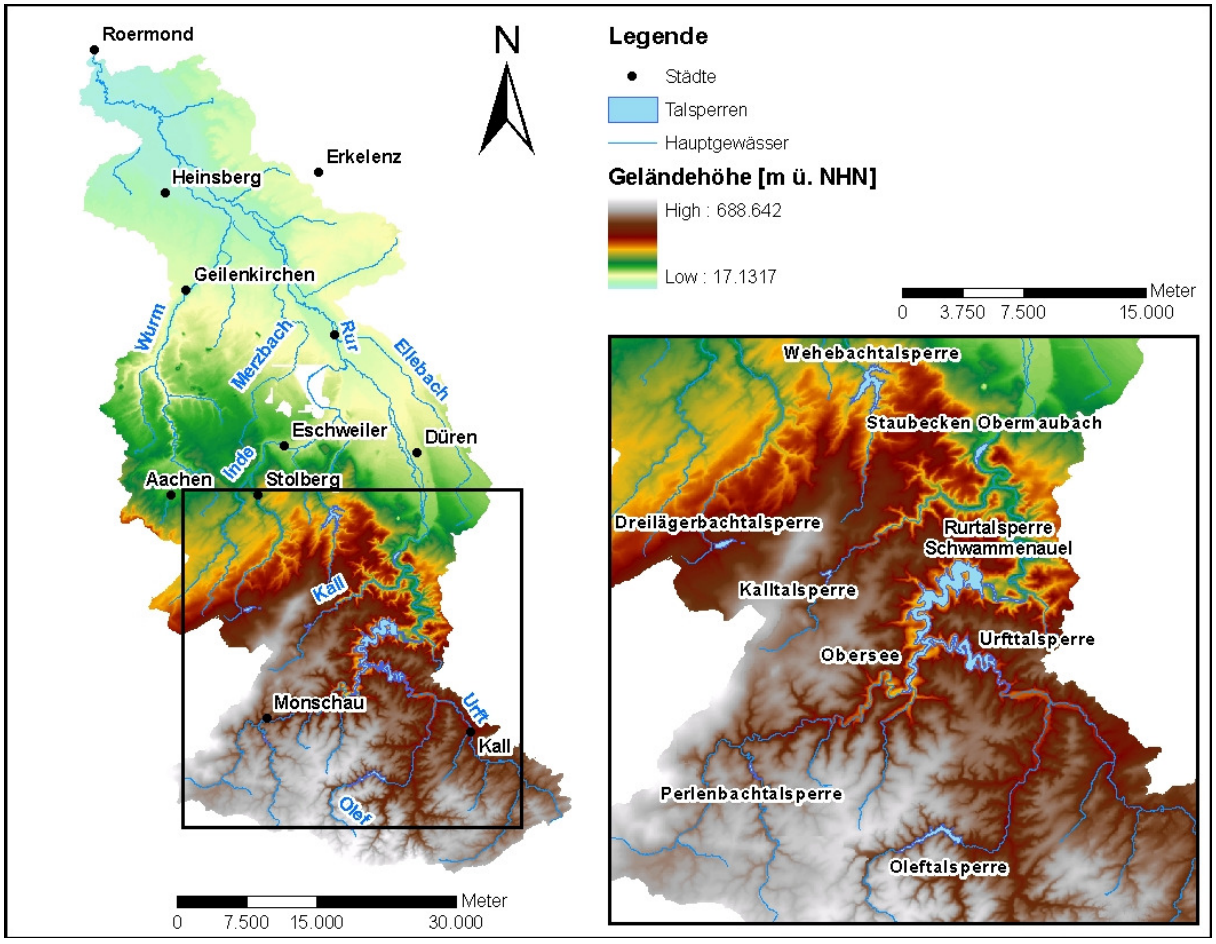


Abb.1: Das Einzugsgebiet der Rur mit Detailansicht der Talsperren der Nordeifel

Das Abflussgeschehen der Rur wird wesentlich beeinflusst von den neun Talsperren mit einem Gesamtstauvolumen von ca. 300 Mio. m³ sowie einer Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken. Eine bedeutende Landnutzung stellt der Braunkohletagebau dar. Obwohl flächenmäßig nur gering, erhält er durch die erforderliche Umgestaltung der Landschaft sowie die weitreichende Absenkung des Grundwassers seine Bedeutung. Für den Tagebau „Inden“ ist die Schaffung eines Restsees vorgesehen. Das Wasser hierfür soll der Rur entnommen werden. Mit der Füllung soll unmittelbar nach dem Ende des Braunkohletagebaus in 2030 begonnen werden.

3. Klimadaten

Für die hydrologischen Simulationen wurden die E-OBS 2.0 Klimadaten verwendet. Die Datenbank enthält für den Zeitraum von 1950-2008 flächenhafte Mittelwerte in täglicher Auflösung für den Niederschlag und die Temperatur (HAYLOCK et al. 2008). Die potentielle Evapotranspiration wurde anhand der Formel von (OUDIN 2005) ermittelt.

Im Rahmen des AMICE-Projektes einigte man sich für die Erstellung von Szenarien für den Niederschlag und die Temperatur aufgrund des begrenzten Zeithorizontes auf die Verwendung des Delta-Ansatzes, bei dem für die relevanten Variablen die Änderungen zwischen Zukunftsszenarien und Kontrolllauf des jeweiligen regionalen Klimamodells herausgefiltert und die Messdaten auf Grundlage dieser Veränderungen modifiziert werden.

Die Änderungsfaktoren (Niederschlag) bzw. -summanden (Temperatur) wurden den Ergebnissen der ersten Phase des ZWEK-Projektes (Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung) des DWD entnommen. Dort wurden die Simulationsergebnisse der regionalen Klimamodelle REMO, CLM, WETTREG und STAR für Deutschland ausgewertet und gegenübergestellt.
Als nasse Szenarien wurden die Ergebnisse des WETTREG-Modells verwendet, als trockene Szenarien die Resultate von CLM. Die Änderungssignale für die jeweiligen Szenarien sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte für Nordrhein-Westfalen. Näherungsweise wurde angenommen, dass die auf den Referenzzeitraum von 1971-2000 bezogenen Änderungen auch für 1961-1990 Gültigkeit besitzen.

Tab.1: Änderungen der mittleren Temperatur [°C] und der mittleren Niederschlagsmengen [%] im Vergleich zu 1971-2000 für Nordrhein-Westfalen

	Nass (WETTREG)				**Trocken (CLM)**			
	2021-2050		2071-2100		2021-2050		2071-2100	
	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT
Winter	20	1,5	55	3,8	-5	1,5	15	3,8
Frühling	10	0,0	5	1,0	5	0,5	5	2,0
Sommer	-5	0,5	-10	2,0	-5	1,5	-25	3,8
Herbst	0	0,5	0	2,0	5	1,5	-5	3,5

4. Hydrologische Modellierung

Die beiden hydrologischen Modelle liefern als Ergebnis den Abfluss am Pegel Stah und decken den Bereich bis zum Staubecken Obermaubach ab, dessen Abflussganglinie als Eingangsgröße benötigt wird. Von Seiten des Wasserverbandes Eifel-Rur wurden dem Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie der RWTH Aachen (LFI) kalibrierte NASIM-Modelle (HYDROTEC 2007) zur Verfügung gestellt. Das GR4J-Modell (PERRIN et al. 2003), das im Rahmen des AMICE-Projektes aufgestellt und kalibriert wurde, bildet das Einzugsgebiet zwischen dem Staubecken Obermaubach und dem Pegel Stah durch ein einziges Element ab. Für das Routing des Abflusses von Obermaubach wurden hier vereinfachte Verfahren für die Translation und die Retention verwendet und die Parameteranpassung iterativ durchgeführt.
Die Abflüsse der im Verbund gesteuerten Talsperren im Einzugsgebiet der Rur hängen sowohl vom Füllungsgrad als auch von den Zuflüssen ab. Die Simulation erfolgt mit der Software TALSIM (SYDRO 2007). Für die meisten der Talsperren existieren für die Simulation ihrer Zuflüsse jedoch zum aktuellen Zeitpunkt keine Niederschlags-Abfluss-Modelle. Für die Bestimmung der Abflussganglinie des Staubeckens Obermaubach für die Zukunftszustände wurden die Annahmen getroffen, dass die nach Jahreszeiten aufgeschlüsselte Abflusssumme das entscheidende Kriterium ist und dass sich die Abflussrelation der Inde übertragen lässt auf die Zuflüsse zu den Talsperren. Außerdem wurde angenommen, dass die bestehenden Steuerungsregeln der Talsperren auch für die Zukunftsszenarien Gültigkeit besitzen.

Für die Füllung des Restsees wurde in Absprache mit dem Wasserverband Eifel-Rur eine Entnahmestrategie angenommen, bei der mit der Entnahme ab einem Abfluss von 5 m³/s am Pegel Jülich begonnen wird und die maximale Entnahme in Höhe von 2,5 m³/s ab einem Abfluss von 12,5 m³/s stattfindet. Es wurde weiter davon ausgegangen, dass die Entnahme 2071 abgeschlossen ist und daher auf den Simulationszeitraum von 2071-2100 keinen Einfluss hat.

5. Ergebnisse

Mittlere monatliche Abflüsse

In Abbildung 2 sind die für den Zeitraum von 1961-1990 simulierten und gemessenen mittleren monatlichen Abflüsse den Prognosewerten für die Zeiträume von 2021-2050 und 2071-2100 gegenübergestellt. Beide Modelle zeigen für 1961-1990 (grüne Linien) eine gute Übereinstimmung mit dem beobachteten Jahresgang (schwarze Linie). Die außerdem dargestellten Änderungsfaktoren wurden ermittelt durch Division der simulierten Werte für die Zukunftszustände durch die simulierten Werte für 1961-1990.

Für beide Zukunftszeiträume wird unabhängig von der Wahl des regionalen Klimamodells und des hydrologischen Modells für die Monate von Juni bis September eine Minderung der mittleren monatlichen Abflüsse prognostiziert. Für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts werden für das trockene Szenario (CLM) vergleichbare Werte simuliert. Für das nasse Szenario (WETTREG) werden für 2071-2100 größere Werte berechnet als für 2021-2050. Die größte Reduktion wird mit einem Änderungsfaktor von 0,63 für den Monat Juni (trocken, 2071-2100, GR4J) prognostiziert. Die größte Zunahme ergibt sich mit einem Änderungsfaktor von 1,75 für den Monat Februar (nass, 2071-2100, GR4J).

Zumindest für die Monate von Dezember bis April ist die durch die Wahl des regionalen Klimamodells bedingte Spannbreite in den Ergebnissen größer als die durch die hydrologischen Modelle verursachte.

Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr (Oktober bis März)

In Abbildung 3 sind die Hochwasserabflüsse für verschiedene Wiederkehrintervalle für alle drei Simulationszeiträume gegenübergestellt. Die auf Grundlage der Simulationen für 1961-1990 berechneten Werte stimmen gut mit den auf Grundlage der Messungen berechneten Werten überein. Es fällt auf, dass GR4J für die Zukunftszeiträume größere Werte vorhersagt als NASIM.

Für beide Zukunftszeiträume werden für das trockene Szenario - insbesondere für große Wiederkehrintervalle - nur geringe Änderungen prognostiziert. Für das nasse Szenario wird ein stetiger Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts vorhergesagt. Für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren wird ein maximaler Anstieg um ca. 60% (nass, 2071-2100, GR4J) vorhergesagt.

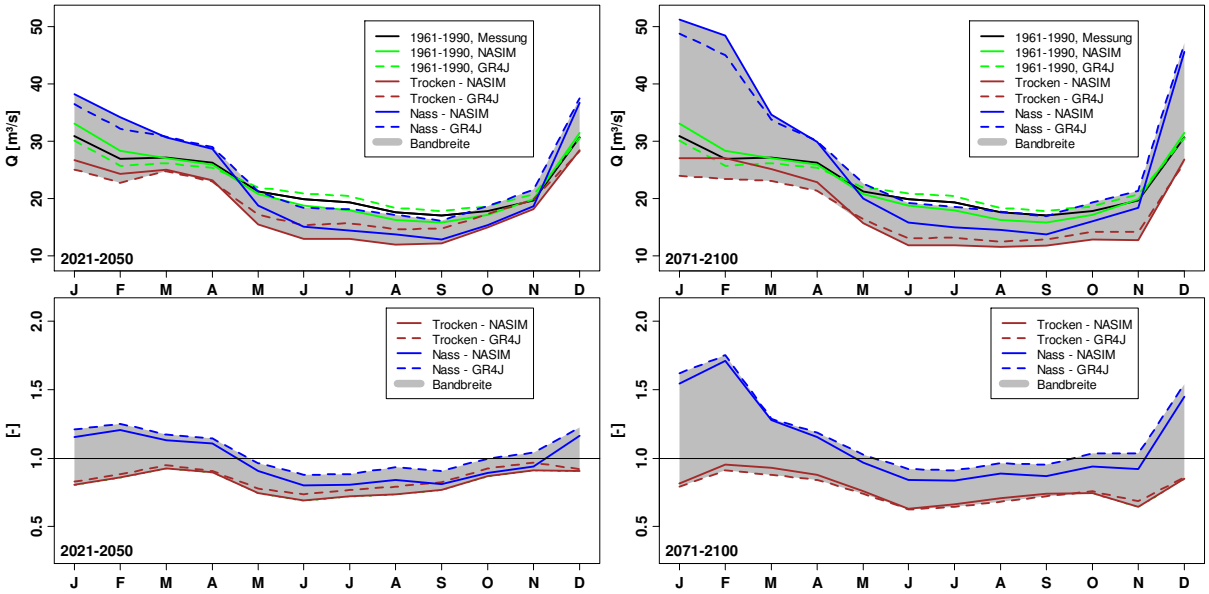


Abb. 2: Vieljährige mittlere monatliche Abflüsse (oben) sowie ihre Änderungsfaktoren (unten) am Pegel Stah in Abhängigkeit von zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen und zwei hydrologischen Modellen für die Zeiträume 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts)

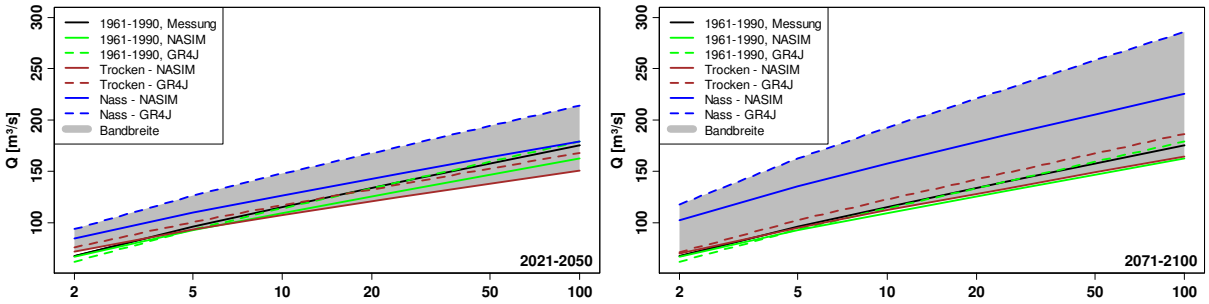


Abb. 3: Hochwasserabflüsse (Winterhalbjahr) für verschiedene Wiederkehrintervalle am Pegel Stah in Abhängigkeit von zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen und zwei hydrologischen Modellen für die Zeiträume 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts)

NM7Q-Werte für das Sommerhalbjahr (April bis September)

Wegen des großen Einflusses der Wasserentnahme auf die NM7Q-Werte (niedrigstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinander folgenden Tagesmittelabflüssen) wurden als Grundlage für die extremwertstatistischen Berechnungen nur die Zeiträume 1970-1990, 2030-2050 und 2080-2100 in Betracht gezogen. Die Analysen wurden nur auf Grundlage der Ergebnisse des GR4J-Modells durchgeführt. Die Simulationsergebnisse für die NM7Q-Werte zeigen im Vergleich zu den Hochwasserabflüssen eine weniger gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Für Wiederkehrintervalle bis zu 20 Jahren liegen alle Prognosewerte unterhalb der Werte für 1970-1990. Wegen der Wasserentnahme werden für das trockene Szenario für 2030-2050 geringfügig kleinere Sommer-NM7Q-Werte simuliert als für 2080-2100. Für das nasse Szenario werden für 2080-2100 größere Werte simuliert als für 2030-2050. Für ein Wiederkehr-

intervall von 20 Jahren liegt der maximal prognostizierte Rückgang der Sommer-NM7Q-Werte (trockenes Szenario für 2030-2050) bei ca. 26%.

Vergleich mit Ergebnissen infolge Änderungsfaktoren für das Maas-Einzugsgebiet

Von jedem der vier Anrainerstaaten der Maas wurden Klimaänderungsfaktoren für ihr Teileinzugsgebiet geliefert. Diese unterscheiden sich z. T. beträchtlich voneinander. Um die Konsistenz der Abflüsse an den Grenzen zu gewährleisten, wurden neben den vorgestellten Ergebnissen infolge von Änderungsfaktoren für NRW auch Simulationen mit über das ganze Maas-Einzugsgebiet gemittelten Faktoren durchgeführt. Die „nationalen" Faktoren wurden bei der Mittelung mit dem Anteil des Teileinzugsgebietes am Gesamteinzugsgebiet der Maas gewichtet. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die für das Maas-Einzugsgebiet gemittelten Änderungsfaktoren.

Tab. 2: Änderungen der mittleren Temperatur [°C] und der mittleren Niederschlagsmengen [%] im Vergleich zu 1961-1990 für das Maas-Einzugsgebiet

	Nass				**Trocken**			
	2021-2050		2071-2100		2021-2050		2071-2100	
	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT	ΔN	ΔT
Winter	10,9	1,2	24,7	2,7	-1,3	1,6	-1,0	3,2
Frühling	3,5	1,2	-3,3	2,5	0,7	1,8	-4,9	3,8
Sommer	-10,3	1,5	-22,2	3,6	-16,1	2,3	-39,9	5,0
Herbst	3,5	1,2	2,9	2,9	-5,2	1,8	-13,1	4,0

Im Vergleich zu den „nationalen" Änderungsfaktoren zeigen die Maas-Mittelwerte etwas geringere Niederschlagsanstiege und größere Minderungen. Die Temperaturanstiege fallen bei den „nationalen" Betrachtungen – mit Ausnahme des Winters – etwas geringer aus.

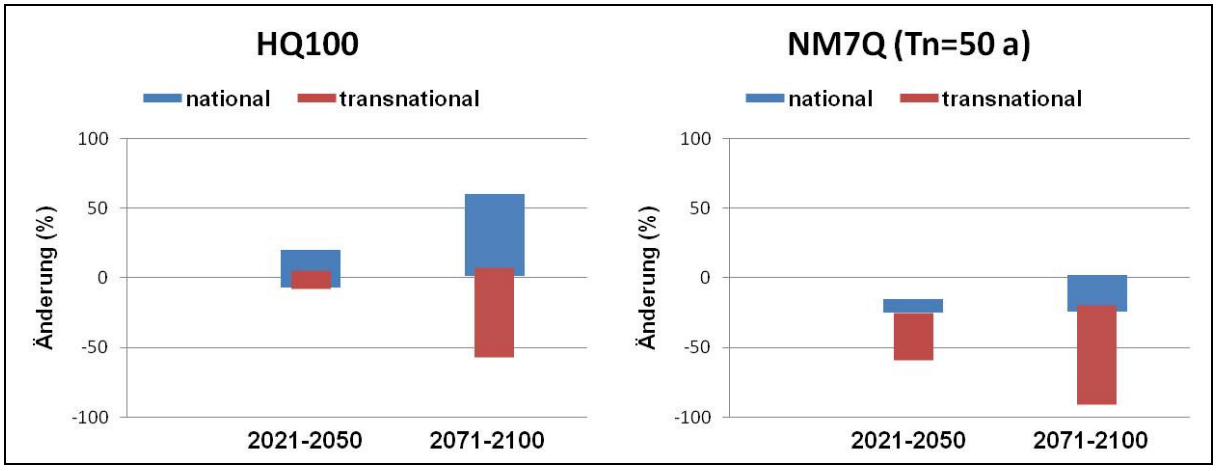


Abb. 4: Änderungsspannbreiten infolge „nationaler" und „transnationaler" (Maas-Mittelwerte) Faktoren für HQ_{100} und NM7Q (T_n = 50 a)

In Abbildung 4 sind die Spannbreiten der Änderungen infolge beider Änderungssignale dargestellt. Es fällt auf, dass die Änderungen infolge der Maas-Mittelwerte gegenüber den Werten für NRW nach unten verschoben sind. Anstiege werden geringer prognostiziert, Minderungen größer. Für die Betrachtung von Hochwasserereignissen stellen die „nationalen" Änderungssignale die ungünstigeren Szenarien dar. Bei Niedrigwasserbetrachtungen verhält es sich hingegen umgekehrt. Die Maas-Mittelwerte führen zu größeren Minderungen und sind somit die ungünstigeren Ergebnisse.

6. Ausblick

Die Ergebnisse der hydrologischen Simulationen stellen die Grundlage für weitere Arbeitspakete des AMICE-Projektes dar. So soll beispielsweise die Steuerung der Talsperren im Rur-Einzugsgebiet vor dem Hintergrund des Klimawandels sowie einer möglichen Niedrigwasseraufhöhung überprüft werden. Außerdem werden zum ersten Mal für die gesamte Maas und ihre wichtigsten Zuflüsse hydraulische Berechnungen auf Grundlage aufeinander abgestimmter hydrologischer Szenarien durchgeführt.

Literaturverzeichnis

HAYLOCK, M. R. et al. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. J. Geophys. Res. (Atmoshperes). 113, 2008

HYDROTEC (2007): Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM - Version 3.6.1. - Hydrotec Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen

MUNLV - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2005): Ergebnisbericht Rur und südliche sonstige Maaszuflüsse. Bearbeitungsgebiet Maas-Deutschland (Süd). Wasserrahmenrichtlinie in NRW – Bestandsaufnahme. Düsseldorf

OUDIN, L. et al. (2005): Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hyrology. 2005, 303, S. 290-306

PERRIN, C. et al. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology. 279, 2003, S. 275-289.

SYDRO (2007): TALSIM v2.2 - Theorie, Sydro Ingenieurgesellschaft für Systemhydrologie, Wasserwirtschaft, Informationssysteme

Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung in der Steiermark

Christian Reszler, Hans Kupfersberger, Heimo Truhetz, Andreas Gobiet, Martin Suklitsch

Zusammenfassung

Diese Studie präsentiert ein einweggekoppeltes Klima-Hydrologie-Modellsystem für den Raum Feldbach in der Südoststeiermark. Ziel ist die Überbrückung der unterschiedlichen Skalen in der Klima- und hydrologischen Modellierung unter Verwendung eines sehr hoch aufgelösten dynamischen Klimamodells, empirisch-statistischer Methoden (Quantile Mapping) und eines sehr dichten Stationsnetzes des Wegener Zentrums (151 Klimastationen, 1 Station je 2 km²). Damit wurde ein Rasterdatensatz des Niederschlages und der Lufttemperatur im Stundenintervall, sowie der potentiellen Verdunstung nach BLANEY-CRIDDLE im Tagesintervall erstellt und dem hydrologischen, flächendetaillierten Wasserbilanzmodell MIKE-SHE übergeben. Das gekoppelte Modellsystem wurde anhand von hydrometeorologischen Daten für die Vergangenheit getestet. In den unkorrigierten Klimamodelldaten zeigt sich für den Niederschlag eine mittlere Überschätzung von rd. 20%, welche sich im berechneten Abfluss aufgrund der Nichtlinearitäten im Modell auf rd. 70% verstärkt. Durch die empirisch-statistische Korrektur der Ergebnisse des Klimamodells konnte dieser Bias verringert und dadurch auch die Ergebnisse des hydrologischen Modells stark verbessert werden. In weiterer Folge kann dieses Modellsystem genutzt werden, um Projektionen über die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserbilanzkomponenten zu erstellen.

1. Einleitung

Prozesse des Wasserkreislaufs laufen auf unterschiedlichsten räumlichen und zeitlichen Skalen ab, wobei sich die einzelnen Prozesse über alle Skalen hinweg gegenseitig bedingen und beeinflussen. Die Beschreibung dieser Prozesse mit Klimamodellen und hydrologischen Modellen unterscheidet sich vor allem in der räumlichen Skala. Bei der Kopplung dieser beiden Modellfamilien, z. B. für die Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserbilanzkomponenten, gilt es daher, über repräsentative Zeiträume des gegenwärtigen und des zukünftigen Klimas hinweg, Felder von meteorologischen Größen (vorgegeben durch globale Klimamodelle mit ~100 km Gitterweite) auf eine physikalisch konsistente Weise in eine für die hydrologische Modellierung brauchbare hohe räumliche (~1 km) und zeitliche (~1 h) Auflösung zu bringen. Zusätzlich sind auch Modellfehler der Klimamodelle sowie die unterschiedliche Detailliertheit der Einbindung von Gebietsdaten (Landnutzung, Eigenschaften der Böden) zu berücksichtigen.

In dieser Arbeit werden in Form einer Einwegkopplung die Ergebnisse eines Klimamodells als Eingangsgrößen für die hydrologische Modellierung in der Region Feldbach / Oststeiermark verwendet. Übergeordnetes Ziel ist es dabei, ein Werkzeug mit einer verbesserten Input-Datenlage für die Prognose von Auswirkungen von klimatisch bedingten Änderungen als Grundlage für die langfristige wasserwirtschaftliche Planung zu schaffen. Zusätzlich besteht mit dem gekoppelten System die Möglichkeit, Ergebnisse des Klimamodells mit kalibrierten Wasserbilanzkomponenten aus dem hydrologischen Modell zu vergleichen.

2. Methodik und Daten

Zur Überbrückung der Skalendiskrepanzen wird das europäische regionale Klimamodell COSMO-CLM (CCLM) (BÖHM et al. 2006) eingesetzt, welches Antriebsdaten für das hydrologische Modell generiert. An der Schnittstelle zwischen den Modellen werden Niederschlag und Lufttemperatur auf Stundenbasis übergeben. Die potentielle Verdunstung wird als Eingangsgröße in das hydrologische Modell aus den Lufttemperaturen nach BLANEY-CRIDDLE auf Tagesbasis berechnet.

Im Allgemeinen weisen Niederschlags- und Temperaturfelder aus regionalen Klimamodellen Abweichungen von Beobachtungsdaten auf, welche teilweise von den Antriebsdaten des Klimamodells und teilweise vom Klimamodell selbst (Modellfehler) herrühren. Um Fehlereinflüsse aus den Antriebsdaten zu minimieren und um reale, mit Beobachtungsdaten vergleichbare, Wetterabläufe zu erhalten, wird CCLM mit operationellen Analysen und Vorhersagefeldern des Wettervorhersagesystems Integrated Forecast System (IFS) (BECHTOLD et al. 2008) des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) angetrieben. Da IFS eine Vielzahl von Beobachtungsdaten (z. B. Satellitendaten und Radiosondendaten) assimiliert, gibt es das tatsächliche Wetter und seinen Verlauf mit hoher Genauigkeit wieder. In einem 2-stufigen Verfahren wird das gröber aufgelöste (~25 km Gitterweite) IFS mittels CCLM sukzessive auf eine höhere Auflösung (10 km Gitterweite im Bereich Alpenraum und 3 km Gitterweite im Bereich der Ostalpen, siehe Abbildung 1 links) gebracht.

In der vorliegenden Studie wurden die Ergebnisse des regionalen Klimamodells mit den Daten des WegenerNet (KIRCHENGAST et al. 2008) in einem 1 km x 1 km Raster aus dem Zeitraum der Simulationsperiode (1.1.2007 bis 31.12.2008) verglichen. Im Mittel zeigt sich bei der Lufttemperatur eine Unterschätzung von 0.1 °C und beim Niederschlag eine Überschätzung von 0.4 mm/d. Um diese Abweichungen auszugleichen, wird eine statistische Korrektur mittels Quantile Mapping anhand der WegenerNet Stationen durchgeführt (THEMEßL et al. 2010). Bei diesem Verfahren werden über kumulierte Häufigkeiten von Modell- und Beobachtungsdaten auf Stationsbasis Korrekturterme bestimmt und auf die modellierten Zeitreihen angewandt. Das Verfahren ist in der Lage, nicht nur Mittelwerte sondern auch die Form der Häufigkeitsverteilung zu korrigieren, zeitliche Korrelationen werden jedoch nicht verbessert. Entscheidend für die Qualität der Korrektur ist die Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten mit langen Zeitreihen, um möglichst viele Witterungsverhältnisse zu erfassen.

Als hydrologisches Modell wird das flächendetaillierte Modell MIKE-SHE (z. B. REEFSGARD & STORM 1995) herangezogen. In diesem Modell werden physikalisch basierte Ansätze, z. B. für die ungesättigte Zone, mit konzeptionellen Ansätzen, z. B. betreffend die gesättigte Zone, kombiniert. Die Verarbeitung der Daten erfolgt auf Rasterbasis (500 m für diese Studie gewählt), auf welcher im Modell die Abflussbildung (Verdunstung, Infiltration) gerechnet wird. Die Abflusskonzentration (Oberflächen- und Grundwasserabfluss) wird auf Einzugsgebietsbasis berechnet. Da sich im Untersuchungsgebiet kein Pegel befindet, wird das Modell an Abflussdaten am benachbarten Gnasbach kalibriert und validiert.

Die Wahl des Modellgebiets im Raum Feldbach in der Südoststeiermark folgt aus der Lage der Stationen des WegenerNets (grau schattierte Fläche in Abbildung 1 rechts). Die Region zeigt einen hügeligen Charakter, die Landnutzung wird dominiert von landwirtschaftlichen Flächen (Mais, Getreide) sowie Flächen mit Laubwald, vor allem an den steileren Hängen.

Die Geologie besteht hauptsächlich aus Tertiärmaterial, und die zugehörigen sandig-schluffigen Böden sind gering mächtig und besitzen relativ geringe Durchlässigkeiten. Der nördliche Teil des Einzugsgebietes des Gnasbaches überschneidet sich mit dem Untersuchungsgebiet (Abbildung 1 rechts). Die physiographischen Bedingungen sind in dieser Region relativ homogen, weshalb die Daten des Pegels Fluttendorf zum Modelltest herangezogen werden können. Lediglich bezüglich Bebauungsanteil unterscheiden sich die zwei Gebiete: im Untersuchungsgebiet liegt die Stadt Feldbach mit einem größeren Anteil an versiegelten Flächen.

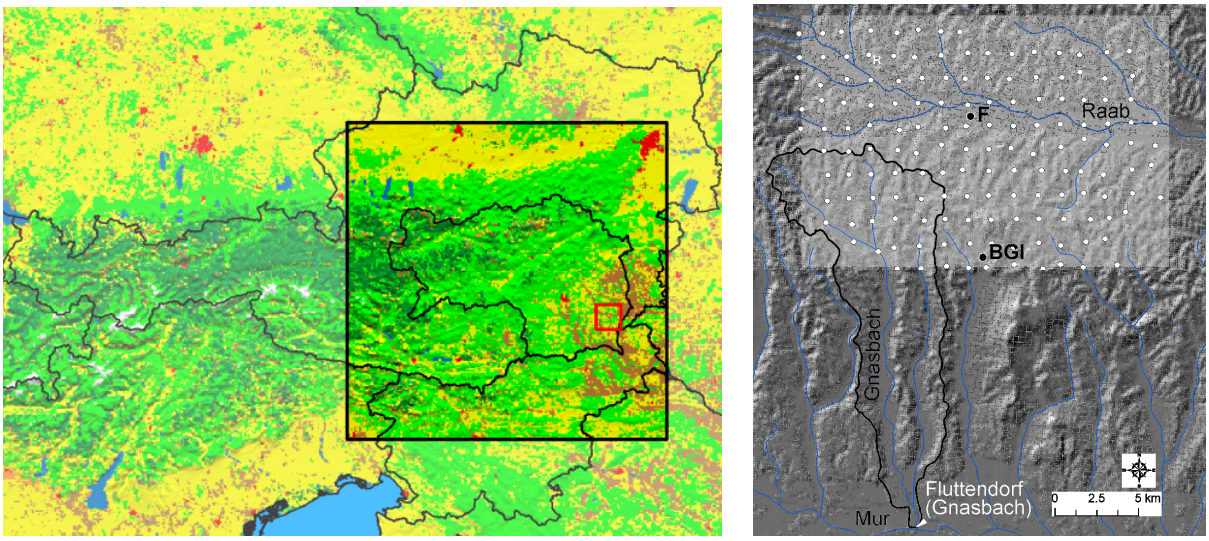


Abb. 1: Simulationsgebiete der gekoppelten klima-hydrologischen Modellierung. Links: Anwendungsgebiet des Klimamodells CCLM (schwarzes Rechteck) und des hydrologischen Modells (rotes Rechteck). Rechts: Hydrologisches Modellgebiet (grau schattiert) mit den Stationen des WegenerNet (weiße Punkte) und dem Einzugsgebiet des Pegels Fluttendorf (Gnasbach) sowie die Lage der ZAMG-Stationen Feldbach (F) und Bad Gleichenberg (BGl).

3. Erstellung und Verifikation des hydrologischen Modells

In den verschiedenen auswählbaren Modulen in MIKE-SHE können einzelne Parameter aus Gebietseigenschaften abgeleitet werden, vor allem jene Parameter in den Modulen mit physikalischem Bezug. Jene aus den rein konzeptionellen Ansätzen müssen aus der Kalibrierung gewonnen werden. Aus den Gebietseigenschaften abgeleitet wurden die generelle Hydrotopaufteilung, aus einer Kombination von Landnutzungskarten und Bodendaten, die Verdunstungsparameter, sowie die bodenphysikalischen Parameter, aus detaillierten Bodenuntersuchungen, die an den Standorten der WegenerNet Stationen durchgeführt wurden.

Die Wahl der konzeptionellen Ansätze und deren Parameter erfolgte nach einer Einschätzung der maßgebenden (dominanten) hydrologischen Prozesse in der Region. Die wichtigsten Prozesse sind der relativ stark ausgeprägte Oberflächenabfluss aufgrund der schlecht durchlässigen Böden und der rasch reagierende Zwischenabfluss (Interflow), vor allem an bewaldeten steileren Hängen. Für die ungesättigte Zone wird nicht die volle Richards-Gleichung verwendet, sondern eine vereinfachte Variante, in welcher der Term des Matrixpo-

tentials vernachlässigt wird („Gravity Flow“). Dies ermöglicht im Modell die Einbeziehung eines Moduls zur Berücksichtigung des Makroporenflusses.
Für den Oberflächenabfluss wurde in MIKE-SHE das Modell von CRAWFORD & LINSLEY (1966) gewählt. Zur Beschreibung des Grundwasserabflusses wurde der Modul mit dem System aus Linearspeichern gewählt. Das System besteht aus einem Zwischenabflussspeicher mit einem lateralen Ausfluss in den Abfluss und einem vertikalen Ausfluss in zwei parallele Basisabflussspeicher, einen rascher auslaufenden, seichteren und einen langsamer auslaufenden, tieferen Speicher. Die kalibrierten Parameter ergaben sich aus einer Anpassung an die Abflussdynamik am Gnasbach. Das Untersuchungsgebiet wird also als hypothetisches Einzugsgebiet angesehen, das ähnliche Eigenschaften besitzt wie das Einzugsgebiet des Gnasbaches. Lediglich der höhere Anteil an versiegelter Fläche im Modellgebiet lässt in der Simulation einen geringfügig höheren Oberflächenabflussanteil im Vergleich zum Gnasbach erwarten.
Die Modellverifikation wurde für die Periode 2004 bis 2008 durchgeführt. Da die WegenerNet Daten erst ab dem Jahr 2007 zur Verfügung stehen, wurden die Daten der Stationen der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) (siehe Abbildung 1 rechts) herangezogen. Als Gebietsniederschlag wurde ein flächengewichtetes Mittel aus den beiden Stationen Feldbach und Bad Gleichenberg verwendet. Die Simulationen erfolgten im Stundenschritt, um auch die kurzen Starkregen, die in der Region häufig auftreten, zu erfassen. Der Fokus der Modellverifikation lag auf der Abbildung der längerfristigen Wasserbilanz (Verdunstung, Abflusshöhen) und der generellen Abflussdynamik. Abbildung 2 zeigt auf Monatsbasis die simulierten Abflusshöhen und die beobachteten Abflusshöhen am Gnasbach. In der Darstellung zeigt sich über den gesamten Zeitraum eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und beobachteten Monatssummen. Zum Vergleich ist auch die Simulation anhand der interpolierten WegenerNet Daten eingetragen, mit welchen für die Periode 2007-2008 ähnliche Ergebnisse erzielt wurden.

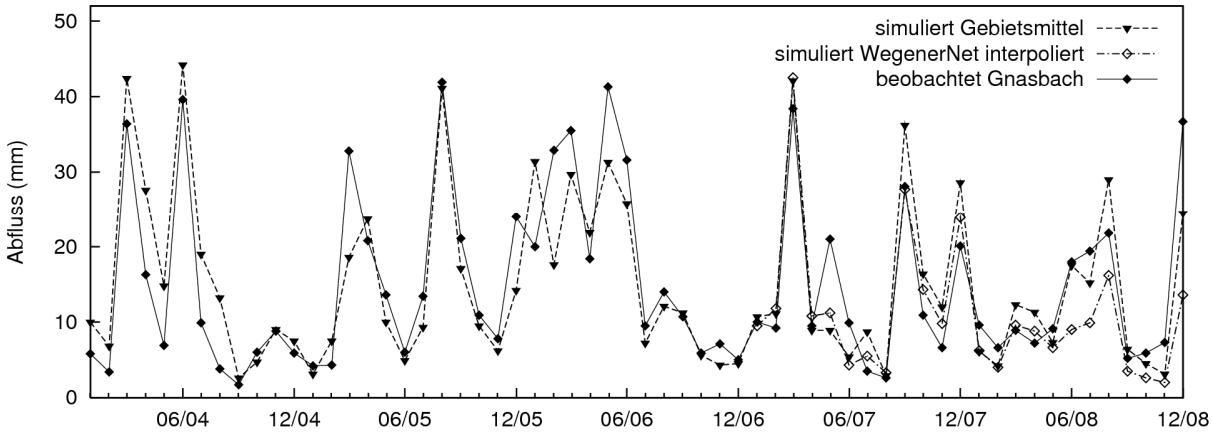


Abb. 2: Simulierte und beobachtete Monatsabflüsse für den Zeitraum der Modellverifikation 2004 bis 2008.

4. Ergebnisse der Modellkopplung

Als Referenz für die Simulationen mit den Eingangsdaten aus dem Klimamodell im Auswertezeitraum 2007-2008 dienen die Simulationen mit den auf ein 1 km² Raster interpolierten

WegenerNet Daten. Die Anfangsbedingungen im Jänner 2007 wurden aus der Langzeitsimulation unter Verwendung der Stationsdaten der ZAMG bestimmt. Um die Auswirkungen der statistischen Korrektur der Klimamodelldaten auf die simulierten hydrologischen Größen zu analysieren, wurde auch eine Variante mit dem unkorrigierten Klimamodell-Output gerechnet. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die in den einzelnen Simulationsvarianten verwendeten Daten.

Tab. 1: Durchgeführte Simulationen unter Verwendung verschiedener Inputdaten.

	Datenquelle	Parameter	Räumliche Auflösung	Periode
Erstellung / Referenz	Stationsdaten ZAMG	P, T, PET	Gebietsmittel	2004 - 2008
	WegenerNet	P, T, PET	1 km² Raster	2007 - 2008
Kopplung	Klimamodell CCLM	P, T, PET	1 km² (9 km²) Raster	2007 - 2008
	Klimamodell CCLM, statistisch korrigiert	P, T, PET	1 km² Raster	2007 - 2008

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse anhand der einzelnen Varianten bzw. Datentypen als Gebietsmittel. Es sind jeweils Monatswerte des Niederschlages sowie der mit dem hydrologischen Modell simulierten Verdunstungs- (akt. ET) und Abflusshöhen dargestellt. Die gute saisonale Korrelation zwischen den Varianten der CCLM/MIKE-SHE-Kopplungen (korrigiert und unkorrigiert) und den WegenerNet-basierten MIKE-SHE Ergebnissen spiegelt die Nähe des IFS zu den realen Witterungsabläufen wider. Das Überschätzen der Niederschläge durch das unkorrigierte CCLM (vgl. Abschnitt 2) zeigt sich auch bei den Monatsniederschlägen (Abbildung 3 oben), was sich in einer Überschätzung der simulierten Abflüsse äußert (Abbildung 3 unten). Die Überschätzung der Niederschläge beträgt im Jahresmittel rund 20%, welche sich im berechneten Gesamtabfluss aufgrund der Nichtlinearitäten im hydrologischen Modell auf rd. 70% verstärkt (vgl. Tabelle 2). Auch bei der aktuellen Verdunstung (Abbildung 3 Mitte) ergeben sich unter Verwendung der unkorrigierten CCLM Daten die höchsten Werte, was die Abhängigkeit der aktuellen Verdunstung vom Niederschlag zeigt. Die potentielle Verdunstung (PET) variiert nur geringfügig unter den einzelnen Varianten. Sie hängt gemäß dem gewählten BLANEY-CRIDDLE Ansatz lediglich von der Lufttemperatur ab, welche vom Klimamodell sehr gut getroffen wird.

Durch die statistische Korrektur kann dieser Bias sowohl in den Eingangsdaten als auch in den hydrologischen Rechenergebnissen ausgeglichen werden. Zusätzlich sind in der Zusammenstellung in Tabelle 2 noch der simulierte Oberflächenabfluss und die tiefere Grundwasserneubildung (GWNb) aufgelistet. Letztere wird im Linearspeichersystem im hydrologischen Modell der Perkolation in den tiefsten, sehr langsam auslaufenden Grundwasserspeicher gleichgesetzt. Sie besitzt einen stark wasserwirtschaftlichen Bezug, da die lokale Grundwasserneubildung in dieser Region einen maßgebenden Faktor für die Wasserversorgung darstellt. Die rascheren Grundwasserabflusskomponenten, wie sie anhand des hydrologischen Modells abgeschätzt werden, können hierfür nicht eingerechnet werden.

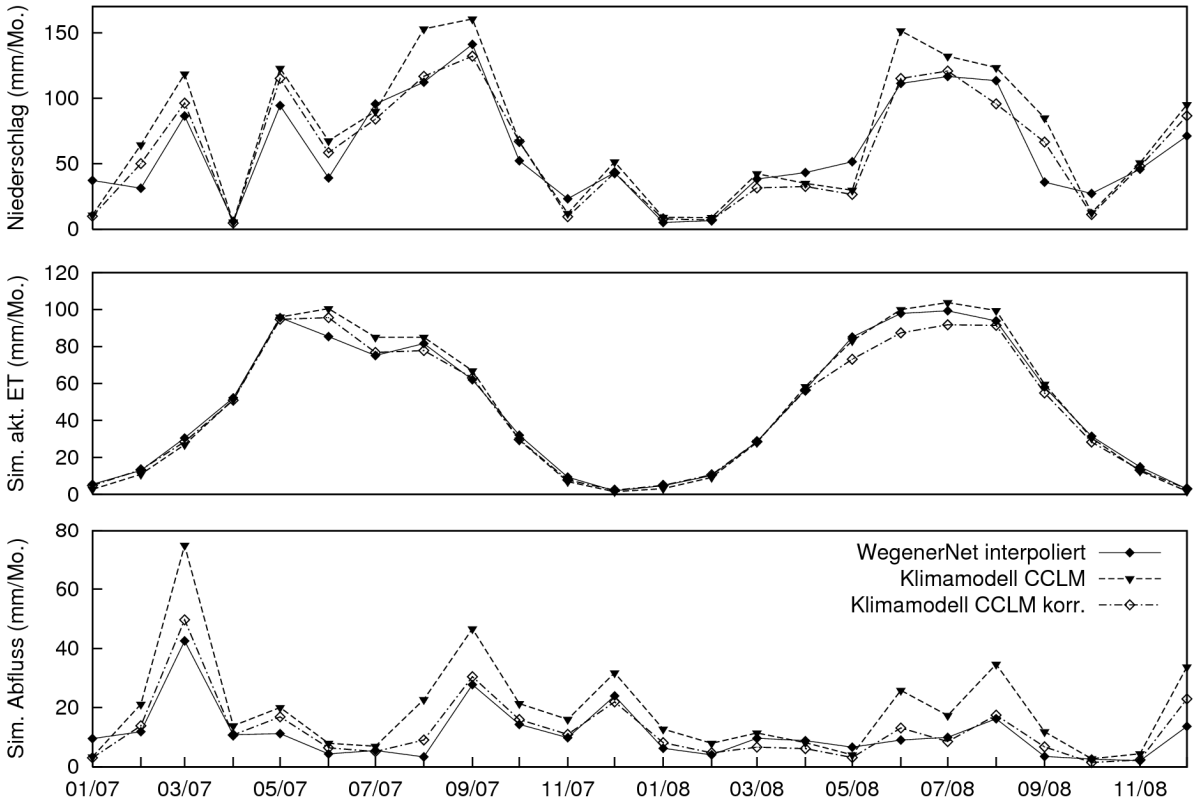


Abb. 3: Niederschläge und mit dem hydrologischen Modell simulierte aktuelle Verdunstungs- (ET) und Abflusshöhen anhand der einzelnen Varianten auf Monatsbasis.

Tab. 2: Wasserbilanzkomponenten in der Modellregion in mm/Jahr (Mittel 2007 und 2008) aus den einzelnen Varianten.

Variante / Datentyp	N	PET	Akt. ET	Abfluss gesamt	Oberfl.-Abfluss	Tiefere GWNb
Stationsdaten ZAMG	788	762	578	167	17	50
WegenerNet interpoliert	714	754	564	134	9	41
Klimamodell CCLM	850	754	576	230	36	66
Klimamodell CCLM, statistisch korrigiert	718	754	544	147	16	44
Gnasbach beobachtet				163		

5. Schlussfolgerungen

Mit der Einwegkopplung zwischen dem regionalen Klimamodell und dem hydrologischen Modell können Auswirkungen von auf Basis von physikalischen Prinzipien berechneten Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf die Grundwasserneubildung stellvertretend für die Trinkwasserversorgung quantitativ beschrieben werden. Allerdings bedürfen die Ergebnisse des Klimamodells einer statistischen Korrektur, bevor sie als Eingangsdaten in das hydrologische Modell verwendet werden können. Voraussetzung dafür sind lange Beobachtungszeiträume und ein dichtes Stationsnetz (wie im Fall des WegenerNet), um die Genauigkeit der Korrekturterme zu erhöhen. Die dabei ermittelten Korrekturfunktionen können aber nicht ohne weiteres auf Regionen mit anderen Niederschlagsregimen übertragen werden.

Betreffend das hydrologische Modell lassen sich im gegenständlichen Anwendungsfall in der Oststeiermark noch Verbesserungen durch die Betrachtung des gesamten Einzugsgebiets eines Pegels erzielen. Als nächste Schritte sehen wir (1) einen Vergleich von hydrologischen Variablen (z. B. Bodenfeuchte, Verdunstung), die in beiden Modellfamilien berechnet werden, um die Modellkopplung weiter voran zu treiben, sowie (2) eine Prognoserechnung zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Wasserbilanzkomponenten in der Region unter Zuhilfenahme eines Beobachtungsdatensatzes, der klimatologisch repräsentative Zeiträume umfasst, sowie eines globalen Klimamodells, welches die bisherigen Antriebsdaten (IFS) ersetzt.

6. Danksagung

Die Studie wurde durchgeführt im Rahmen des Projektes Integriertes Modellsystem Steiermark - Umwelt (IMOS-U), im Auftrag der Steirischen Landesregierung. Die Simulationen wurden teilweise am Jülich Supercomputing Centre (JSC) durchgeführt. Die Antriebsdaten stammen vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) und die Beobachtungsdaten vom Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WegCenter) und der Österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG).

Literatur

BECHTOLD, P., M. KÖHLER, T. JUNG, F. DOBLAS-REYES, M. LEUTBECHER, M. J. RODWELL, F. VITART & G. BALSAMO (2008): Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 134 (634), 1337–1351, doi:10.1002/qj.289.

BÖHM, U., M. KÜCKEN, W. AHRENS, A. BLOCK, D. HAUFFE, K. KEULER, B. ROCKEL, & A. WILL (2006): CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications. *COSMO Newsletter*, 6, 225-235.

CRAWFORD, N.H. & R.K. LINSLEY (1966): Digital simulation in hydrology: the Stanford Watershed Simulation Model IV: Technical Report no. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 210p.

KIRCHENGAST, G., T. KABAS, S. BINDER, A. LEUPRECHT & C. BICHLER (2008): Pionierexperiment WegenerNet Klimastationsnetz: Ein neuartiges Messnetz in der Region Feldbach (Steiermark/Österreich) zur Beobachtung von Wetter und Klima mit sehr hoher Auflösung, *Wissenschaftl. Bericht*, 23-2008, Wegener Center Verlag, Graz, Österreich, ISBN-13 978-3-9502615-0-9.

REFSGAARD, J.C. & B. STORM (1995): MIKE SHE. In: Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P., Ed., Water Resources Publications, Colorado, USA, 809-846.

THEMEßL, M.J., A. GOBIET & A. LEUPRECHT (2010): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.*, in press.

Effizientere Nutzung der Wasserressourcen in der Landwirtschaft

Katrin Drastig, Annette Prochnow, Simone Kraatz

Zusammenfassung

Eine innovative Methode um den Wasserbedarf bei der Produktion von Nahrungsmitteln zu bilanzieren wird momentan am ATB im Rahmen einer Nachwuchsgruppe der Leibniz-Gemeinschaft (WGL) entwickelt. Die Bilanzierung des Wasserbedarfs erfolgt über den Wasserbedarf während der Pflanzenproduktion und durch die Tierhaltung unter Berücksichtigung der Vorketten innerhalb einzelner landwirtschaftlicher Betriebe. In diesen Betrieben unterschiedlicher Art und Größe (unterschiedliche Kulturen, Anzahl der bewirtschafteten Schläge, Tierart und Tierbestand) wird der Gesamtwasserbedarf einer Produktionskette ermittelt. Die relevanten Produktionssysteme zur massenhaften Herstellung von landwirtschaftlichen Produkten sind von der Ausstattung her weltweit vergleichbar. Unterschiede bestehen hauptsächlich durch verschiedene Klima- und Bodenparameter als auch durch unterschiedliche Wasserverfügbarkeiten und abweichende Betriebsgrößen. Die Übertragung der Ergebnisse erfolgt durch das Einbinden unterschiedlicher Klima- und Bodenparameter und veränderter betrieblicher Eingangsgrößen in abgeleitete Algorithmen.

Das Einbinden von verschiedenen typischen Ernährungsweisen von Menschen in das Modellierungssystem ermöglicht anschließend die Berechnung des entsprechenden Wasserbedarfs sowie auch die Ermittlung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

1. Motivation

Wasser ist Grundlage des Lebens und essentielle Produktionsgrundlage der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion. Die Bewässerungslandwirtschaft ist mit ca. 70 % der weltweit größte Wassernutzer (ROSEGRANT et al 2009), und wird es auch bleiben müssen, um zumindest die Nahrungsmittelerzeugung sicherzustellen. Die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen ist eine der effektivsten Maßnahmen zur Sicherung der Erträge. Das gilt in besonderem Maße für die semi-ariden und ariden Klimagebiete. Nach Angaben der FAO werden weltweit ca. 290 Mio. ha bewässert. Das sind 17 % der insgesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Welt. Auf dieser Fläche werden heute 40 % der Nahrungsmittelproduktion erzeugt (MOLDEN 2007). Die Bewässerung hat im letzten Jahrhundert als Teil der sogenannten `Grünen Revolution´ zu einer Verbesserung der Ernährungssituation in vielen Ländern geführt (ROSEGRANT et al. 2002).

Mit dem globalen Wandel kommen wachsende Herausforderungen auf die Landwirtschaft zu. Die Verringerung produktiver Flächen durch Urbanisierung, Versteppung und Verwüstung lässt einen starken Druck auf die Landwirtschaft erwarten. Neben dem Wachstum der Weltbevölkerung (von 6,6 Mrd. Menschen in 2010 auf 9,2 Mrd. Menschen in 2050) und dem steigenden Nahrungsenergiebedarf pro Kopf (von 2.850 kcal/Tag in 2010 auf 3.130 kcal/Tag in 2050) lässt der zunehmende Anteil tierischer Nahrungsmittel einen global stark steigenden Ressourcenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion erwarten (UNDP 2006). Die Ressource Wasser, als Grundlage der Produktion, rückt zudem auch durch die Auswirkungen des Klimawandels in den Mittelpunkt. Auch ohne Klimaänderungseffekte werden die verfügbaren

Wasserreserven im Jahr 2050 um die Hälfte auf 6.300 m³ pro Kopf zurückgehen. Dies basiert ausschließlich auf der wachsenden Weltbevölkerung (RINGLER et al. 2010). Durch die veränderten Klimasituationen sind die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen zusätzlich durch zunehmende Trockenheit, singuläre Ereignisse wie Spätfröste und Starkregenereignisse sowie durch die Veränderung der Vegetationsperiode direkt betroffen.
Die Übernutzung von Wasserressourcen hat in vielen Regionen zu einer starken Wasserverknappung geführt, teilweise in Verbindung mit Minderung der Wasserqualitäten und Bodenversalzungen, so dass dem Ausbau der Bewässerungslandwirtschaft Grenzen gesetzt sind. Neben der begrenzten Verfügbarkeit von Wasser ist zunehmend auch die Konkurrenz zwischen der industriellen oder privaten Wassernutzung und der Nutzung in der Landwirtschaft von Bedeutung. Seit ca. 15 Jahren sind bewässerte Flächen von abnehmenden Wachstumsraten gekennzeichnet (ROSEGRANT et al. 2002; BARKER et al. 1998), während die Wachstumsraten für den industriellen und privaten Bedarf zunehmen. Der Wasserbedarf in der Tierhaltung ist zurzeit noch gering im Vergleich zum Wasserbedarf durch Bewässerungslandwirtschaft. Allerdings wird durch die Steigerung der Tierproduktion in Entwicklungsländern erwartet, dass der damit verbundene weltweite Wasserbedarf um mehr als 50 % bis zum Jahr 2025 zunehmen wird (ROSEGRANT et al. 2002).
Um zukünftig den Nahrungsmittelbedarf der wachsenden Erdbevölkerung decken zu können, sind daher weitere Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft notwendig. Erschwerend kommt hinzu, dass die Ertragszuwächse der wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen seit 1990 rückläufig sind (ALSTON et al. 2009). Der Bewässerungslandwirtschaft bzw. einem effizienteren Wassereinsatz in der Landwirtschaft, auch zur Erzeugung biogener Rohstoffe, kommt daher eine besondere Bedeutung zu.
Trotz einer geringen Wassernutzung in der Landwirtschaft in Deutschland, muss das Augenmerk auch hier auf sparsame und effiziente Techniken gelenkt werden. Der Landmaschinenmarkt lebt stark vom Export und wenn in Deutschland beste, wassereffiziente Technik produziert und eingesetzt wird, dann lässt sich diese Technik auch in wasserarme Länder verkaufen.

2. Forschungsziele

Die bisher beschriebene Problematik führt zu der Forderung, dass mit jedem aufgewendeten Millimeter Wasser eine größere Menge landwirtschaftlicher Produkte erzeugt wird. Die Wassereffizienz bildet die Beziehung zwischen diesem Wasserbedarf und dem entsprechenden Aufbau von Trockenmasse der Kulturpflanzen ab und wird als Zielgröße im Kontext der Ertragsverbesserung bzw. Verbesserung der Wasserproduktivität (‚more crop per drop') verwendet.
Das Ziel der Leibniz (WGL) - Nachwuchsgruppe am Leibniz Institut für Agrartechnik (ATB) ist eine Produktivitätssteigerung in der Landwirtschaft durch die Erhöhung der Wassereffizienz anhand der Beantwortung der folgenden Fragen:

- Wie kann der Wasserbedarf für die Nahrungsmittelproduktion in Anlehnung an Methodenstandards des Life Cycle Assessment bilanziert werden?
- Welche Maßnahmen tragen wesentlich zu einer Erhöhung der Wassereffizienz in der Pflanzenproduktion bei?

- Welche Maßnahmen tragen wesentlich zu einer Erhöhung der Wassereffizienz in der Tierhaltung bei?
- Wie hoch ist der Wasserbedarf in gesamten Produktketten der Nahrungsmittelerzeugung?
- In welchem Maße wird sich der Wasserbedarf für die Nahrungsmittelproduktion infolge der wachsenden Weltbevölkerung, aufgrund steigender Einkommen und steigender Urbanisierung und des damit steigenden Anteils an tierischen und anderen wasserhungrigen Nahrungsmitteln erhöhen?
- Welche landwirtschaftlichen Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz sind am besten geeignet, der zunehmenden Beanspruchung von Wasserressourcen für die Nahrungsmittelproduktion entgegenzuwirken?

Eine innovative Methode basierend auf gängigen Standards soll entwickelt werden, um den Wasserbedarf bei der Produktion von Nahrungsmitteln zu bilanzieren. Die derzeit angewendete Methodik des Water Footprint (CHAPAGAIN & HOEKSTRA 2004) ist wenig ausdifferenziert. Sie arbeitet mit groben Algorithmen und grundlegende Anforderungen an Bilanzierungen, wie z.B. die des Life Cycle Assessment (ISO 2006a, b), bleiben unberücksichtigt. Auch das Konzept der Livestock Water Productivity (DESCHEEMAEKER et al. 2010) wird eingebunden, um Maßnahmen, die der Erhöhung der Wassereffizienz in der Pflanzenproduktion und in der Tierhaltung dienen, zu analysieren und quantifizieren. Die resultierenden Ergebnisse werden in ein zuvor entwickeltes Modellierungssystem eingebunden, das die Wasserflüsse in landwirtschaftlichen Betriebssystemen zur Nahrungsmittelerzeugung abbildet und auch die Bodenwasserbildung berücksichtigt. Dies ermöglicht die Berechnung des Wasserbedarfs verschiedener typischer Ernährungsweisen, die auf Literaturauswertungen basieren.

Das Ziel des Vorhabens, die Wassereffizienz in landwirtschaftlichen Betriebssystemen über die am besten geeigneten Maßnahmen zu erhöhen, stellt durch die Synergie des hydrologischen und agrarwissenschaftlichen Ansatzes eine innovative Möglichkeit dar, die Produktion den globalen Veränderungen anzupassen, der zunehmenden Übernutzung, bzw. Beanspruchung von Wasserressourcen für die Nahrungsmittelproduktion entgegenzuwirken und ein nachhaltiges Wirtschaften zu ermöglichen.

3. Struktur der Arbeitsgruppe

Das Projekt gliedert sich in fünf vernetzte Arbeitspakete, die aufeinander aufbauen und sich ergänzen (Abbildung 1).

3.1 Beschreibung der Arbeitspakete

Im Rahmen des **Arbeitspakets Methodenstandard (AP1)** wird die Entwicklung eines globalen Methodenstandards für die Bilanzierung des Wasserbedarfs bei der Produktion von Nahrungsmitteln exemplarisch vorgenommen. Für definierte Tierhaltungssysteme (z.B. Rinderhaltung wie bei KRAATZ, 2009) werden die methodischen Ansätze variiert und deren Einfluss auf das Bilanzierungsergebnis im Sinne einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Fundamental ist die Einführung von Referenzsystemen (z.B. potenzielle natürliche Vegetation, Brache, Forstwirtschaft oder Grünland), welche die Evapotranspiration in Abzug bringen, die auf

jeder Fläche auch ohne eine Nahrungsmittelproduktion stattfindet. Bedeutsam ist ebenfalls die Aufteilung des Wasserbedarfs bei Produktionsverfahren mit mehreren Produkten (z.B. Milch und Fleisch bei der Milchviehhaltung). Verschiedene Allokationsansätze (z.B. nach Masse oder nach Energie) werden hier geprüft.

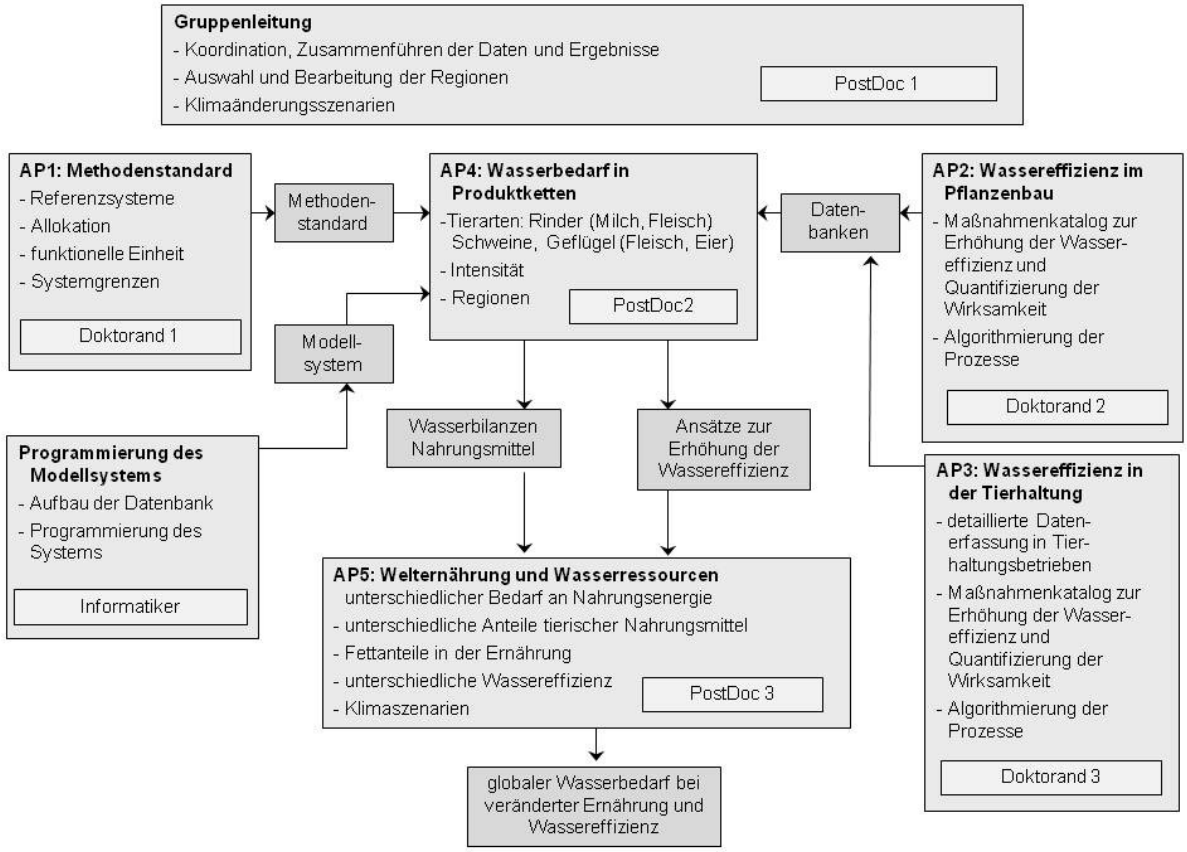


Abb. 1: Arbeitspakete, Aufgaben und Struktur der Arbeitsgruppe

In den beiden folgenden Arbeitspaketen zur Wassereffizienz werden die Wirkungen einzelner Maßnahmen quantifiziert, Wechselwirkungen betrachtet und standortspezifisch besonders effektive Maßnahmen abgeleitet. Hierfür werden Literaturdaten ausgewertet, Algorithmen erarbeitet und eigene Modellierungen und Simulationsläufe durchgeführt. Im Ergebnis entstehen Module und Datenbanken, mit denen die **Wassereffizienz im Pflanzenbau (AP2)** unter unterschiedlichen standörtlichen Bedingungen und für ein breites Spektrum acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen und **Maßnahmen in der Tierhaltung (AP3**) quantitativ ermittelt werden kann (DRASTIG im Druck). Die gewonnenen Daten der beiden Arbeitspakete werden in einer Datenbank zusammengestellt, die im Arbeitspaket 4 weiter verarbeitet wird.
Im Arbeitspaket **Wasserbedarf in Produktketten (AP4)** wird das Modellierungssystem, das der Berechnung des Wasserbedarfs in verschiedenen landwirtschaftlichen Betriebssystemen für gesamte Produktketten der Nahrungsmittelerzeugung dient, aufgebaut und angewandt. Es werden zum einen Systeme zur Erzeugung ausschließlich pflanzlicher Nahrungsmittel wie Getreide, Reis, Mais, Hirse, Kartoffeln und Speiseöle untersucht. Zum anderen werden

Tierhaltungssysteme betrachtet, die die Futterproduktion und Reproduktion einschließen und Rinder (Milch, Fleisch), Schweine und Geflügel (Eier, Fleisch) umfassen sollen. Für die Wasserbilanzierung wird der Methodenstandard aus Arbeitspaket 1 verwendet. Die Module und Datenbanken aus den Arbeitspaketen 2 und 3 werden in die Systemzusammenhänge eingeordnet. Für unterschiedliche Pflanzenbau- und Tierhaltungssysteme werden dadurch verschiedene Parameter variiert, um die Wassereffizienz bei unterschiedlichen Standortbedingungen, Landnutzungsintensitäten und Tierhaltungsformen bestimmen zu können. Die Bandbreite von extensiven hin zur intensiven Produktionsverfahren soll abgedeckt werden. Global relevante Regionen werden für nähere Betrachtungen ausgewählt. Im Ergebnis können Wasserbedarf und Wassereffizienz für unterschiedliche Produktionsverfahren von Nahrungsmitteln durchgehend ermittelt und Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz im Gesamtsystem abgeleitet werden.

Im Arbeitspaket **Welternährung und Wasserressourcen (AP5)** werden globale Szenarien typischer Ernährungsweisen auf der Grundlage von Literaturauswertungen ausgewählt, um den Wasserbedarf zu quantifizieren. Dabei werden die tägliche Nahrungsenergieaufnahme, der Anteil tierischer Nahrungsmittel und der Fettanteil variiert. Für die in bestimmten Regionen typischen Ernährungsweisen wird der Bedarf an entsprechenden Nahrungsmitteln bestimmt und der Wasserbedarf für die Bereitstellung dieser Nahrungsmittel bei unterschiedlicher Wassereffizienz zugeordnet. Die Auswahl der Szenarien wird eng in Abstimmung mit den Kooperationspartnern am International Food Policy Research Institute (IFPRI) geschehen. Im Ergebnis werden Aussagen abgeleitet, wie sich der Wasserbedarf bei unterschiedlichen Szenarien der Welternährung auch unter Berücksichtigung von Klimaszenarien entwickeln wird und welche Maßnahmen zur Steigerung der Wassereffizienz im Gesamtsystem am wirkungsvollsten sind.

4. Ausblick

Die neuartige interdisziplinäre Verbindung des Fachwissens aus der experimentellen Agrarwissenschaft und Maßnahmen, um die Wassereffizienz im System landwirtschaftlicher Betriebe zu erhöhen, eröffnet ein innovatives und zukunftsweisendes Forschungsfeld an der Schnittstelle zwischen Agrarwissenschaften, Agrartechnik und Hydrologie. Die Arbeitsgruppe trägt maßgeblich zur Beantwortung der folgenden, wichtigen Frage bei: Wie kann eine dauerhafte Produktivitätssteigerung in der Landwirtschaft durch die Erhöhung der Wassereffizienz gesichert werden?

Literatur

ALSTON, J.M. et al. (2009): Agricultural Research, Productivity, and food prices in the long run. Science 325, 1209-1210.

BARKER, R. et al. (1998): The outlook for water resources in the year 2020: challenges for research on water management in rice pro-duction. Assessment and orientation towards the 21st century. Proceedings of 19th session of the International Rice Commission FAO, Cairo, Ägypten, 96-109.

CHAPAGAIN, A.K. & A.Y. HOEKSTRA (2004): Water footprints of nations. UNESCO-IHE.

DESCHEEMAEKER, K. et al. (2010): Improving water productivity in mixed crop–livestock farming systems of sub-Saharan Africa. Agr. Water Manag. 97, 579–586.

DRASTIG, K . et al. (im Druck): Water for Agriculture in Brandenburg (Germany) - Wassermanagement in der Landwirtschaft in Brandenburg (Deutschland), Die Erde.

ISO (2006a): ISO Norm 14040: 2006. Life Cycle Assessment: Principles and Framework. Environ. Manage.

ISO (2006b): ISO Norm 14044: 2006. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. Environ. Manag.

KRAATZ, S. (2009): Ermittlung der Energieeffizienz in der Tierhaltung am Beispiel der Milchviehhaltung (Determination of the energy efficiency in livestock husbandry at the example of dairy farming). Humboldt Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Dissertation.

MOLDEN D. (ed.) (2007): Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London/Colombo, Sri Lanka: Earthscan/Int.Water Manag. Inst.

RINGLER, C. et al. (2010): Water and Food Security Under Global Change. In: RINGLER, C., et al. (Eds.), Global change: Impacts on Water and Food Security. Springer, Berlin, Heidelberg, 3-15.

ROSEGRANT, M.W. et al. (2002): World water and food to 2025: Dealing with scarcity. IFPRI, Washington DC.

ROSEGRANT, M.W. (2009): Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity, Annu. Rev. Environ. Resour.34: 205–22.

UNDP (2006): Human Development Report 2006 - Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis. United Nations Development Programme, New York, 422.

Modellierung der Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder mit dem Tageswertmodell BEWASYS

Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer, Jürgen Ihringer, Patrick Preuß, Katharina Richter

Zusammenfassung

Für die Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder wurde das Tageswertmodell mit dem Acronym BEWASYS zur nachhaltigen, überregionalen, energetisch optimierten und ganzheitlichen Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder weiterentwickelt und angepasst. Zusätzlich waren Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten. Die Methodik des Modells, welches erstmalig mit dieser Zielstellung an deutschen Bundeswasserstraßen zur Anwendung kommt sowie die Besonderheiten der Bewirtschaftung von Schifffahrtsstraßen werden in diesem Beitrag erläutert. Anhand eines Vergleichs von simulierten Größen (Wasserstände, Pumpwasser- und Entlastungswassermengen, elektrische Arbeit) mit tatsächlichen Werten werden Aussagen zur Modellgüte getätigt. Die Auswirkungen veränderter Randbedingungen in der regionalen und überregionalen Bewirtschaftung auf den Wasserhaushalt der Haltungen werden gezeigt und diskutiert.

1. Einleitung und Motivation

Die Binnen- und Seeschifffahrt sind die Lebensadern der deutschen Wirtschaft und ein sicherer und umweltfreundlicher Verkehrsträger im transeuropäischen Verkehrsnetz. Für dieses Verkehrsnetz bilden die deutschen Wasserstraßen die entscheidende infrastrukturelle Basis. Der Schwerpunkt der deutschen Binnenschifffahrt liegt in Nord-Süd-Richtung auf dem Rhein und seinen für die Schifffahrt ausgebauten Nebenflüssen. Zusammen mit den Wasserstraßen in West-Ost-Richtung bilden sie ein wesentliches Rückgrat des europäischen Wasserstraßennetzes. Die Wasserstraßen im West-Ost-Korridor stellen den Gütertransport zwischen den Häfen vom Rhein bis nach Hamburg, Berlin und weiter nach Stettin sicher.

Für den 1300 km langen West-Ost-Korridor, der ämter- und einzugsgebietsübergreifend ein wasserwirtschaftliches Gesamtsystem darstellt, hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Zusammenarbeit mit der Universität Karlsruhe (KIT) und mit Unterstützung der Arbeitsgruppe der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes „Überregionale Wasserbewirtschaftung“ ein Tageswertmodell zur Wassermengenbewirtschaftung weiterentwickelt, parametrisiert und angewendet. Ziel ist eine ganzheitliche Bewirtschaftung des Kanalsystems nach einheitlichen Grundsätzen und Regeln. Hierfür waren folgende Aspekte zu gewährleisten: (1) Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs, (2) Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter Einhaltung der drei Aspekte der Nachhaltigkeit Ökonomie, Ökologie, Soziologie und (3) Reduzierung der Pumpkosten.

2. Methodik

Das BEwirtschaftungsmodell für WAsserwirtschaftliche SYSteme (BEWASYS) ist ein modulares Tageswertmodell, bei dem unterschiedliche Modellbausteine beliebig miteinander verbunden werden können. Linienförmige Modellbausteine wie Fließgewässer, Kanal- oder

Flussstauhaltungen können durch punktförmige Elemente (Knotenpunkte) wie Talsperren, Schleusenstandorte, Seitenzuflüsse, Entnahmen und Rückleitungen sowie Wehre und Pumpwerke (siehe auch BRUDY-ZIPPELIUS 2003) weiter spezifiziert werden.
Die Steuerung einer Kanal- bzw. Flussstauhaltung erfolgt auf den jeweilig gültigen Sollwasserstand, der zeitlich variabel sein kann und sich zwischen dem unteren und oberen Betriebswasserstand befindet. Das Ziel der Modellierung ist es, bei auftretenden Defiziten die Pumpwerke an jeder Haltung so zu steuern, dass unter Beachtung ihrer Kapazitäten der Sollwasserstand der Haltung bei ausreichendem Wasserdargebot zum Ausgleich der Defizite gehalten werden kann. Treten dagegen Überschüsse auf, wird die Haltung entsprechend der Vorgaben entlastet. Die spezifische regionale Wasserbewirtschaftung wird mit Hilfe spezieller Modell-Algorithmen zur Steuerung der Pump- und Entlastungsanlagen berücksichtigt. Für eine ausführliche Beschreibung der Methodik wird auf BRUDY-ZIPPELIUS (2003) verwiesen.
Im Rahmen der hier vorgestellten Anwendung war es notwendig, Modellerweiterungen insbesondere bei der Steuerung von Kanal- und Flussstauhaltungen gegenüber BRUDY-ZIPPELIUS (2003) vorzunehmen. Das bedeutet, dass zu Beginn eines Zeitschritts für jede Kanal- und Flussstauhaltung alle für den jeweiligen Tag zu erwartenden bilanzwirksamen Größen wie Niederschlag, Zufluss aus Oberflächen- und Grundwasser, Einleitungen, Schleusungswasser, Verdunstung, Versickerung und Entnahmen ermittelt und aufsummiert werden. Im nächsten Schritt wird diese Summe mit dem Volumen der Haltung zum Ende des vorherigen Zeitschrittes verrechnet. Über einen Vergleich mit dem haltungsspezifischen Sollvolumen wird das jeweilige Defizit bzw. der Überschuss ermittelt. Entsprechend des vorgegebenen Pump- und Entlastungsalgorithmus erfolgt der Ausgleich des Defizits oder die Entlastung des Überschusses (PREUß 2008).

3. Untersuchungsgebiet und Datenbasis

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Netz der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder hat eine Gesamtlänge von ca. 1300 km, auf der drei Schiffshebewerke und 84 Schleusen den Schiffen zur Überwindung von Höhenunterschieden dienen. Abbildung 1 zeigt eine Systemskizze des Untersuchungsgebietes. Das Gewässersystem besteht zu 50 % aus Kanalstrecken, zu ca. 20 % aus staugeregelten Flussstrecken und zu 30 % aus Gewässern. Durch Schleusen, Pumpwerke und Entlastungsanlagen sind die Stauhaltungen u. a. mit den Flüssen Rhein, Lippe, Weser, Elbe und Oder verbunden. Kurze frei fließende Flussstrecken sind nur in der Unteren Havel-Wasserstraße (UHW) und der Ruhr zu finden. Im Westen beginnt das Netz der Bundeswasserstraßen am Rhein mit einer Höhe von ca. 15 m ü NN am Wesel-Datteln-Kanal (WDK) bzw. 20 m ü NN am Rhein-Herne-Kanal (RHK), überbrückt dann die Wasserscheiden zur Ems, Weser, Elbe und Oder und endet an der Oder ca. 29 m ü NN an der Spree-Oder-Wasserstraße (SOW) bzw. 0 m ü NN an der Havel-Oder-Wasserstraße (HOW). Höchste Haltung der Hauptstrecke ist die Scheitelhaltung des Mittellandkanals (MLK)/ Elbe-Seitenkanals (ESK) mit 65 m ü NN (FINKE 2004).

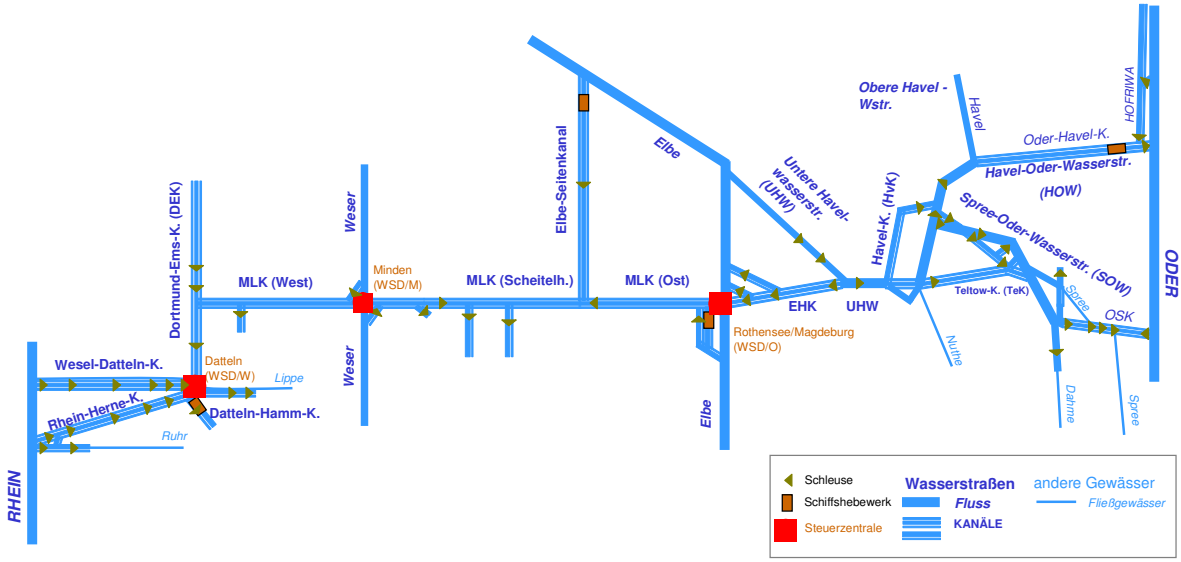


Abb. 1: Systemskizze des Untersuchungsgebietes

3.2 Datenbasis

Für die Parametrisierung des Modells werden hydrologische und meteorologische Daten sowie Parameter zur Beschreibung der Geometrie der Haltungen benötigt. In Tabelle 1 sind die Daten aufgelistet, die zur Parametrisierung der Modellbausteine Kanalhaltung, Flussstauhaltung, Gewässer und der Knotenpunkte benötigt werden.

Tab.1: Übersicht zu den Eingangsdaten

Kanalstauhaltung	Flussstauhaltung	Gewässer	Standorte
• Länge der Haltung • mittlere Wasseroberfläche der Haltung • Stauziel		• Parameter der doppelten Speicherkaskade	• tägliche Anzahl an Schleusungen • Fläche der Schleusenkammern • Anzahl der Sparbecken • Angaben zum Spaltwasser
• Potenzielle Verdunstung • Niederschlag		• Zwischengebietszuflüsse • Randzuflüsse	• maximale Kapazität für Pumpwerke
• Wasserstand-Volumen- Beziehung			• maximale Kapazität der Entlastungsanlage
• Versickerung ins Grundwasser • Speisung des Kanals durch Grundwasser			• Einleitungen • Rückleitungen • Überleitungen
	• Translationszeit		
	• Gefälle-Durchfluss-Beziehung		

4. Plausibilisierung der Ergebnisse und Durchführung von Variantenrechnungen

4.1 Plausibilisierung ausgewählter Ergebnisse des Gesamtsystems

Die Plausibilisierung der Modellergebnisse erfolgte für den Simulationszeitraum vom 01.01.2005 bis 31.12.2007, da für diesen Zeitabschnitt für alle Haltungen sowohl die Eingangsdaten als auch die zum Vergleich dienenden Beobachtungen vorlagen. Anhand einer Gegenüberstellung ausgewählter simulierter und beobachteter Größen lassen sich Aussagen zur Modellgüte treffen. Die tagesaktuelle Bewirtschaftung, die zum Beispiel eine Reaktion auf temporäre Pumpenausfälle oder auf lokale Starkniederschläge beinhaltet, wird mit

dem Bewirtschaftungsmodell nicht simuliert. Demzufolge kann es keine vollständige Übereinstimmung im Vergleich der tatsächlichen Werte mit den simulierten Daten geben.

In Abbildung 2 ist ein Vergleich der simulierten (SIM) und tatsächlichen Entnahmemengen (BEO) aus der Lippe zur Speisung der Scheitelhaltung des Westsystems über den Datteln-Hamm-Kanal (DHK) dargestellt. Trotz einer leichten Überschätzung der tatsächlichen Entnahmemengen, ist der innerjährliche Verlauf der Entnahme, d.h. insbesondere der Rückgang in den Sommermonaten, gut abgebildet.

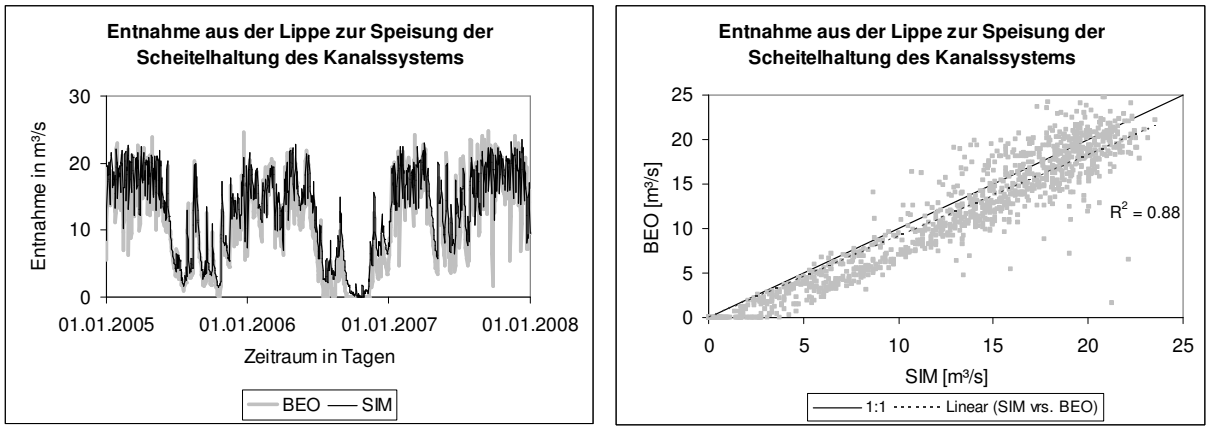


Abb. 2: Entnahme aus der Lippe (links Ganglinie, rechts: Scatterplot)

In Abbildung 3 sind beispielhaft für den Pumpenstandort Friedrichsfeld / WDK die simulierten Pumpwassermengen (SIM) den Beobachtungen (BEO) gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die tatsächlichen Pumpwassermengen etwas überschätzt werden. Die innerjährlichen Schwankungen im Pumpwasserbedarf werden durch das Modell gut abgebildet.

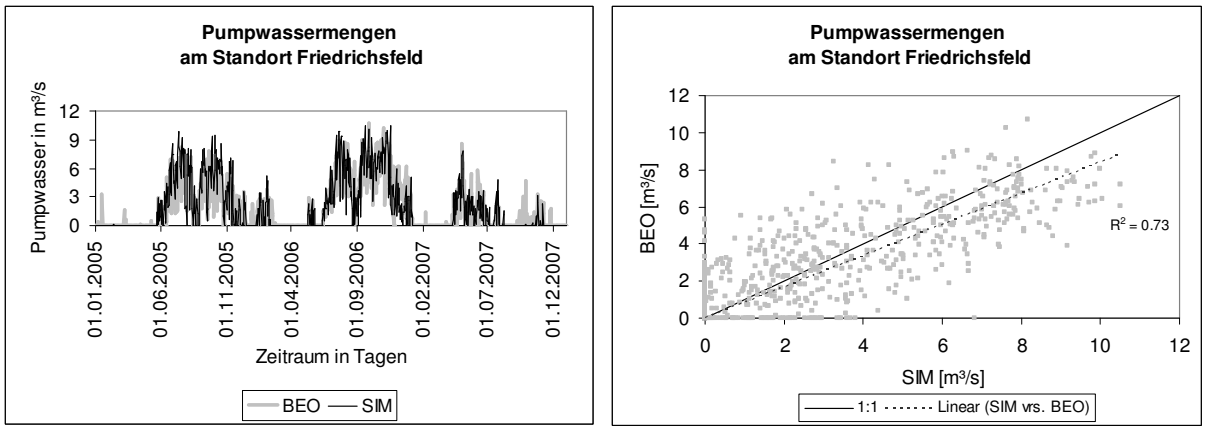


Abb.3: Pumpwasser am Standort Friedrichsfeld (links Ganglinie, rechts: Scatterplot)

Neben den Pumpwassermengen wurden auch simulierte Freiwasser- (bzw. Entlastungswasser-) mengen und Wasserstände mit Beobachtungsdaten verglichen. In Abbildung 4 (links) ist ein Vergleich der simulierten (SIM) mit den tatsächlichen Freiwassermengen (BEO) am Standort Hünxe / WDK dargestellt. Eine recht gute Übereinstimmung ist sichtbar.

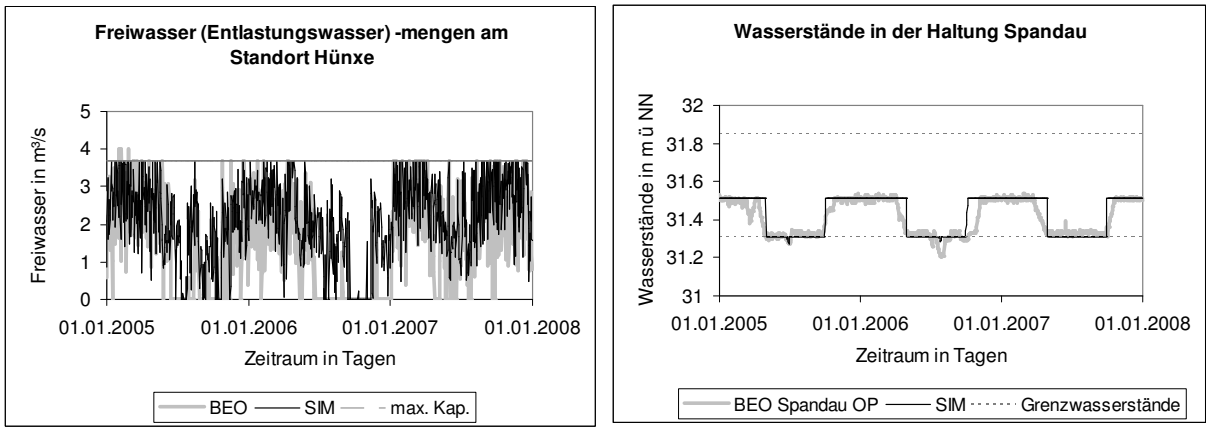


Abb. 4: Freiwasser am Standort Hünxe, Wasserstände in der Haltung Spandau

In Abbildung 4 (rechts) ist der simulierte Wasserstand in der Haltung Spandau dargestellt. Der Zielwasserstand variiert innerhalb des Jahres. Sowohl der Sommer- auch als der Winterstau kann mit dem Modell zufriedenstellend simuliert werden.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die simulierten Modellergebnisse die Beobachtungen im Zeitraum 2005-2007 gut wiedergeben. Anhand der Plausibilitätsprüfungen wurde eine Basisvariante für die Bewirtschaftung des Gesamtsystems festgelegt, welche für weitere regionale und überregionale Variantenrechnungen als Bezugsgröße dient.

4.2 Auswirkungen veränderter Randbedingungen in der regionalen Bewirtschaftung auf den Wasserhaushalt der Haltungen

In dieser Variante wurden die Auswirkungen einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens im DHK, RHK und WDK untersucht. Grundannahme dieser Variante ist, dass sich aufgrund des Baus von Kohlekraftwerken am DHK der Bedarf an Kohle und damit die Anzahl der Schiffstransporte erhöht. Es wurde von einer Erhöhung von den derzeit durchschnittlich ca. 6 Schleusungen am Tag um zusätzliche 12 Schleusungen pro Tag am DHK ausgegangen. Da die Route der zusätzlich notwendigen Schiffe nicht bekannt ist, wurde angenommen, dass sich der zusätzliche Schiffsverkehr auf RHK und WDK gleichmäßig verteilt. Tabelle 2 enthält für alle untersuchten Schleusenstandorte an DHK und WDK eine Übersicht über die durchschnittlichen Veränderungen bei Schleusungs-, Frei- und Pumpwassermengen, die bei einer entsprechenden Erhöhung der Schleusungszahlen im Vergleich zu den tatsächlichen Schleusungen zu erwarten wären.
Auf Basis der Simulationsrechnungen lässt sich feststellen, dass durch den Mehrbedarf an Pumpwasser zu keinem Zeitpunkt und an keinem Standort im DHK und WDK die maximale Pumpkapazität erreicht wird. Das bedeutet, dass Haltungsdefizite aufgrund einer zu geringen Wasserversorgung nicht eintreten. Ein großer Anteil des Mehrbedarfs an Wasser wird durch höhere Entnahmen aus der Lippe um durchschnittlich 1.25 m³/s (= 10 % der bisherigen Entnahmen) sowie höhere Pumpwassermengen am Standort Münster um durchschnittlich 0.30 m³/s (= 16 % des bisherigen Pumpwassers) ausgeglichen. Durch die teilweise Erhöhung der Freiwassermengen (zum Beispiel am Standort Hünxe) wird jedoch vermehrt die maximale Kapazität der Hochwasserentlastungsanlagen an verschiedenen Stauhaltungen erreicht. Dies kann dazu führen, dass das einer Stauhaltung von oberhalb zufließende Wasser unter

Umständen nicht vollständig aus der Haltung abgeführt werden kann und in der Konsequenz der Wasserspiegel in der Haltung ansteigt.

Tab. 2: Veränderung von wasserwirtschaftlichen Größen bedingt durch eine verkehrliche Erhöhung am DHK und WDK im Zeitraum 01.01.2005 bis 31.12.2007 (Erhöhung: Werte > 0, Rückgang: Werte < 0)

Standort	Änderung Schleusungswasser		Änderung Freiwasser		Änderung Pumpwasser	
	[m³/s]	[%]	[m³/s]	[%]	[m³/s]	[%]
Hamm / DHK	0.19	119	1.06	8	0.01	-
Datteln / WDK	1.21	22	-0.05	-3	0.42	47
Ahsen / WDK	1.16	22	-0.02	-1	0.4	43
Flaesheim / WDK	0.64	20	0.28	8	0.19	44
Dorsten / WDK	1.43	18	-0.01	-25	0.68	30
Hünxe / WDK	0.89	18	0.28	13	0.44	28
Friedrichsfeld / WDK	1.26	19	0.06	7	0.59	32

4.3 Auswirkungen veränderter Randbedingungen in der überregionalen Bewirtschaftung auf den Wasserhaushalt der Haltungen

Ein Defizit in der Scheitelhaltung des Mittellandkanales (MLK) kann nicht auf natürlichem Wege ausgeglichen werden, da es keine ober- bzw. unterirdischen Zuflüsse gibt. Die Speisung erfolgt mittels Pumpwerke über drei verschiedene Wege: (1) aus der Westhaltung des MLK (Pumpwerk (PW) Anderten) und aus der Weser (PW Minden), (2) aus der Osthaltung des MLK (PW Sülfeld), aus dem Rothenseer Verbindungskanal (PW Rothensee) und aus der Elbe bei Magdeburg oder (3) über das PW Uelzen aus der Haltung des ESK und aus der Elbe am Standort Scharnebeck. Aus der Westhaltung des MLK wird zusätzlich Wasser am Standort Münster in die Scheitelhaltung des Westdeutschen Kanalsystems gepumpt.

In einem ersten Schritt wurde versucht, einen allgemein gültigen Steueralgorithmus für die Speisungsbauwerke mit Hilfe von Variantenrechnungen zu finden. Anhand von Vergleichen (siehe Abschnitt 4.1) wurde die Basisvariante festgelegt. Im Postprocessing kann auf Basis der mit BEWASYS simulierten Wasserstände und den Pumpwassermengen die elektrische Arbeit für jeden Pumpenstandort in Kilowattstunden (kWh) ermittelt und entsprechend der Energierahmenverträge in Pumpkosten umgerechnet werden. Damit lassen sich die Auswirkungen veränderter Randbedingungen auf den Wasserhaushalt des Kanalsystem ökonomisch bewerten. Beispielhaft hierfür ist in Abbildung 5 die gesamte zu verrichtende elektrische Arbeit für jeden Pumpenstandort über den Zeitraum von 2005 bis 2007 auf der Grundlage von zwei unterschiedlichen Pumpstrategien zur Bedarfsdeckung der Scheitelhaltung des MLK angegeben.

Der Vergleich von Alternativvariante mit Basisvariante zeigt eine Erhöhung der elektrischen Arbeit an den Pumpwerken Sülfeld und Rothensee und eine Reduzierung an den Standorten Anderten und Uelzen. Unverändert bleiben die Pumpwassermengen in Minden und Münster. Obwohl in der Gesamtsumme der elektrischen Arbeit fast keine Unterschiede zwischen beiden Varianten erkennbar sind, können aufgrund ämterspezifisch vereinbarter Energieverträge im finanziellen Gesamtaufwand durchaus Unterschiede bestehen.

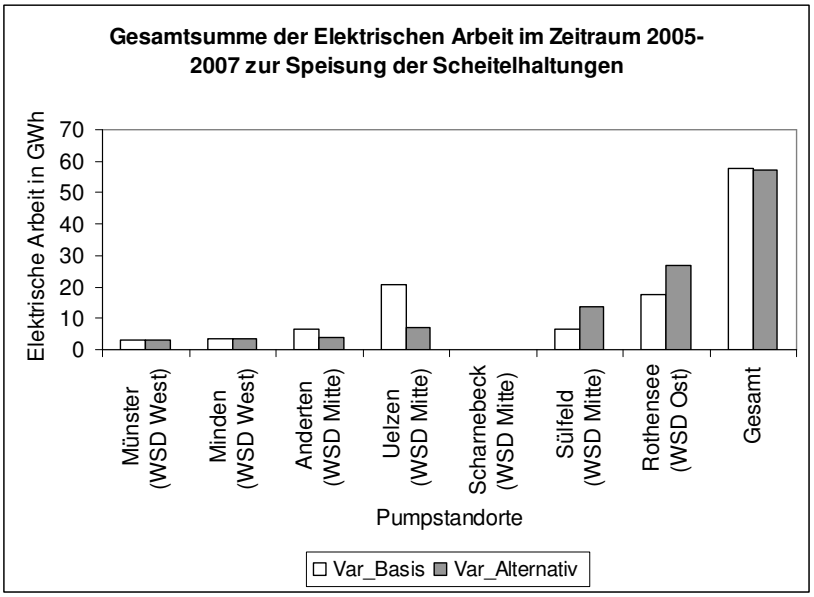


Abb. 5: Elektrische Arbeit im Zeitraum 2005 bis 2007 zur Speisung der Scheitelhaltungen

5. Fazit

Mit Hilfe des Modellsystems BEWASYS können Variantenrechungen zur Untersuchung der Auswirkungen von veränderten wasserwirtschaftlichen Randbedingungen auf den Wasserhaushalt simuliert und unter ökonomischen Gesichtspunkten ausgewertet werden

Literatur

BRUDY-ZIPPELIUS, T. (2003): Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr: Simulation und Echtzeitbetrieb. Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) Heft 221.

FINKE, W. et. al (2004): Istzustandsanalyse der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse des Kanalsystems zwischen Rhein und Oder. BfG, Bericht (1427): 15 Seiten.

PREUß, P.: Das weiterentwickelte Wasserbewirtschaftungsmodell BEWASYS. BfG-Kolloquium „Wasserbewirtschaftung & Niedrigwasser“ 26./27. Mai 2008, Koblenz, S. 96-101.

Hochaufgelöste Modellierung der Beschattung von Fließgewässern durch Vegetation und Topographie mittels LiDAR Daten

Hannes Leistert und Markus Weiler

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird, unter Nutzung hochaufgelöster LiDAR Daten, der Einfluss der Topographie und der gewässernahen Vegetation und Gebäude auf die direkte Solareinstrahlung in die Fließgewässern Baden Württembergs bestimmt. Es wurde ein Modell entwickelt, das mittels zwei LiDAR Datensets (Topographie und Vegetation + Gebäude) für einzelne Tage im Jahr die Beschattung jede 2m entlang der Fließgewässer berechnet und für 100 Meter lange Gewässerabschnitte mittelt. Die Beschattung wird durch Strahlungsverhältnisse und nicht Verhältnisse von Sonnenscheindauern bestimmt. Die potentielle direkte Solarstrahlung wird als Funktion der Solarkonstanten, eines atmosphärischen Transmissionskoeffizienten, der Ausrichtung des Gewässers und des Sonnengangs berechnet. Die Bestimmung der direkten Solarstrahlung mit Beschattung wird einmal für die Geländeoberfläche ohne Vegetation und Gebäude und einmal mit der Vegetation und Gebäude bestimmt. Das Gelände und die Gebäude werden als strahlungsundurchlässig angenommen, die Vegetation als teilweise durchlässig, indem eine Vegetationstransmissivität basierend auf der „Vegetationsdichte“ entlang des Sonnenstrahls bestimmt wird. Die erfolgreiche Validierung der Ergebnisse erfolgte durch den Vergleich mit 31 hemisphärische Aufnahmen (Fish-Eye Objektiv) entlang verschiedener Fließgewässer und den Punktmodellrechnungen. Die Ergebnisse für Baden-Württemberg (Modellierung für mehr als 34000 km Fließgewässer) zeigen einen deutlichen Einfluss der Vegetation auf den Strahlungshaushalt der Gewässer an einem wolkenlosen Sommertag. So ist der Anteil der durch direkte Strahlung induzierte Energie entlang der Fließgewässer Baden-Württembergs um etwa 32% geringer bei der Modellierung mit der Vegetation und Gebäuden als nur durch die Topographie.

1. Einleitung

Die direkte Solarstrahlung (DS) ist als wesentlicher Bestandteil der Energiebilanz ein wichtiger Faktor für mikrometeorologische, hydrologische und biophysikalische Vorgänge in der aquatischen Umwelt. Die Zufuhr direkter Solarstrahlung in den Wasserkörper steuert die Erwärmung, Verdunstung (Wasserbilanz) und hat entscheidenden Einfluss auf die Primärproduktion, das Wachstum und die Aktivität von Flora und Fauna (z.B. GATES 1980, MOORE et al. 2005). Die ufernahe Vegetation und die Topographie haben großen Einfluss auf die DS und somit auch auf den Wärmehaushalt des Wasserkörpers (z.B. JOHNSON & JONES 2000, BOURQUE & POMEROY 2001). Verschiedene Studien zeigten einen deutlichen Anstieg der Wassertemperatur in Gewässerabschnitten nach dem Abholzen der ufernahen Vegetation (z.B. BESCHTA 1997, JOHNSON & JONES 2000). Eine Experiment im H.J. Andrews Einzugsgebiet in dem Forschungswald (Oregon, USA) mit einem künstlich beschatteten 200 Meter Gewässerabschnitt zeigte, dass in diesem ein Energieverlust und in dem nicht-beschatteten ein deutlicher Energiegewinn im Sommer zur Mittagszeit stattgefunden hat (WEBB et al. 2008). Zur Ermittlung der Beschattung entlang eines Gewässers gibt

es die Möglichkeit der Punktmessungen vom Boden mit optischen Geräten oder die Nutzung von Fernerkundungsmethoden aus der Luft. Eine Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten und die Qualität der bodenbasierenden Methoden geben TETI & PIKE (2005). Fernerkundungsmethoden können Daten von großflächigen Gebiete liefern und speziell LiDAR Daten (Light Detection and Ranging) sind geeignet, Vegetationseigenschaften wie die Vegetationshöhen und Lichtungen (KOUKOULAS & BLACKBURN 2005) zu ermitteln und wurden u.a. von DeGASPERI (2005) zur Bestimmung der Beschattung entlang eines Gewässers genutzt.
In dieser Arbeit wurde die Beschattung entlang des gesamten Fließgewässernetzes in Baden Württembergs ermittelt. Das entwickelte Modell berücksichtigt die Topographie, die Vegetation und die Gebäude als schattengebende Objekte und nutzt die landesweit hochaufgelösten verfügbaren LiDAR Daten um einen hohen Grad an Genauigkeit zu erreichen

2. Methode

Modellierungsgebiet und Daten

Als Datengrundlage für die Topographie, die Vegetation und Gebäude dienen die landesweit flächendeckenden Laserscan Datensätze des Bundesland Baden-Württemberg (BW). Diese liegen in 1000x1000m Kacheln für Bodenpunkte (Last-Pulse) und Vegetations- und Gebäudepunkte (First-Pulse) in einer Auflösung von 1m vor. Die Unterscheidung zwischen Vegetation und Gebäuden wurde mit einem Abgleich der First-Pulse Dateien und den Amtlichen Liegenschaftskataster BW bewerkstelligt. Das Amtliche Digitale Wasserwirtschaftliche Gewässernetz (AWGN) wurde herangezogen, um die Kilometrierung und die Gewässerkoordinaten der Fließgewässer in BW zu ermitteln. Die Modellierung wird für die im AWGN enthaltenen Fließgewässer von BW durchgeführt. Dies sind knapp 15000 (14964) Fließgewässer mit insgesamt 34038 km Fließlänge.

Modellierung der solaren Einstrahlung

Der Sonnenstand bzw. die Position der Sonne zu einem bestimmten Zeitpunkt kann mit dem Azimut und dem Höhenwinkel der Sonne beschrieben werden. Diese werden mittels geometrischer Betrachtungen in Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit sowie dem Ort (der Geographischen Breite) berechnet (z.B. FUNK 1983, KUMAR et al. 1997, FISCHER & GILGEN 2002). Die DS an einem Ort und Zeitpunkt ist von extraterrestrischen, atmosphärischen und terrestrischen Bedingungen abhängig. Die extraterrestrischen bestimmen die Energiemenge, die in die Atmosphäre gelangen (das solare Strahlungsspektrum oder integriert über die Wellenlängen, die extraterrestrische Strahlung). Diese sind von der Sonnenaktivität und von dem saisonal variierenden Abstand Sonne - Erde abhängig. Im Modell wird eine Solarkonstante von 1367 W/m² angenommen. In der Atmosphäre wird die DS durch Reflexion, Absorption und Streuung gemindert. Hier spielen Gaskonzentrationen (vor allem H_2O und O_3), Bewölkung, Aerosole und die Weglänge des Sonnenstrahls durch die Atmosphäre eine Rolle. Diese Prozesse sind Wellenlängenabhängig und zusätzlich abhängig von der zeitlich und örtlich variablen Zusammensetzung der Atmosphäre. In dieser Arbeit soll nicht der aus der direkten Solarstrahlung ermittelte Energiewert, sondern der Anteil der Minderung durch Beschattung bestimmt werden. Durch die Bildung von Verhältnissen verlieren die den atmo-

sphärischen Minderungen zugehörigen meist unbekannten Variablen (Gas- und Aerosolkonzentrationen) an Bedeutung und entscheidend wird die in der Atmosphäre zurückgelegte Distanz des Strahls. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit der Ansatz von KUMAR et al. (1997) gewählt, der nicht die Wellenlängenabhängigkeit berücksichtigt, sondern die atmosphärischen Prozesse (Reflexion, Absorption und Streuung) mittels eines Transmissionskoeffizienten vereinfacht als Funktion der in der Atmosphäre zurückgelegten Distanz der Solarstrahlung beschreibt. Der Transmissionskoeffizient stellt eine Mittelung über die Wellenlängen der atmosphärischen Prozesse dar. Dieser wird mittels einer empirischen Formel von KREITH & KREIDER (1978) in Abhängigkeit der relativen Luftmasse berechnet
Einen zusätzlichen Einfluss auf die Strahlungsmenge, die auf eine Fläche trifft, ist deren Ausrichtung. Trifft die Strahlung nicht orthogonal auf die Fläche, wird die Strahlung auf eine größere Fläche verteilt. Diese eventuelle Minderung wird mit dem Cosinus des Winkels zwischen Strahlrichtung und Flächennormale (β) beschrieben. β wird anhand geometrischer Funktionen in Abhängigkeit von Sonnenstand (Tages- und Jahreszeit), Fließrichtung und Gefälle des Gewässers berechnet. Die Ausrichtung und das Gefälle des Gewässers werden anhand der LiDAR Daten bestimmt.

Beschattung durch Topographie und Vegetation

Die Energie die ein Ort über einen Zeitraum (Tag) durch die DS erhält, ist zusätzlich zum Ort (Breitengrad) und Jahreszeit davon abhängig, inwieweit seine nähere und oder fernere Umgebung die ankommende Strahlung blockiert. Zum einen kann dies durch die Topographie geschehen, zum andern durch Objekte, wie Vegetation oder Gebäude die den Strahlengang unterbrechen. Die Blockierung der DS durch die Topographie und die Gebäude ist Komplett (keine Transmission) und der Einfluss der Topographie findet sowohl im Nahbereich (bis 50m) wie auch im Fernbereich statt. Etwas anders verhält es sich bei der Vegetation; hier ist nur der Nahbereich von Interesse, da der Unterschied im Fernbereich zu der Topographie vernachlässigbar gering ist. Im Nahbereich wiederum muss die Blockierung durch die Vegetation nicht Komplett sein (Transmission ≥ 0%). Die Menge an DS, die durch die Vegetation dringen kann, hängt von Faktoren wie Vegetationsart, Bestandsalter, Zeitpunkt der Vegetationsperiode, Blattdichte und -ausrichtung und auch von dem Einstrahlwinkel der Sonne ab. Die mögliche Transmission wird in dem Modell mit einem Transmissionsfaktor berücksichtigt.
Um die Beschattung durch die Topographie zu bestimmen, wird in Richtung der Azimut Winkel der maximale Winkel zwischen Gerinnepunkt und Geländeoberfläche ermittelt. Dieser wird mit dem jahres- und uhrzeitabhängigen Sonnenstand verglichen. Steht die Sonne tiefer, geht das Modell von totaler Beschattung aus und die DS ist Null. Um die Rechenzeit zu verringern wird im Fernbereich mit einem LiDAR basiertem DEM mit einer Auflösung von 25m gerechnet, da der Fehler vernachlässigbar ist. Im Nahbereich wird mit den hochaufgelösten 1m Daten gerechnet.
Das Vorgehen zur Bestimmung der Beschattung durch die Vegetation und Gebäude entspricht grundsätzlich dem der Topographie. Jedoch wird hier noch zusätzlich zu dem maximalen Winkel, die Anzahl der Vegetationspixel ermittelt, die ein durchgängiger Sonnenstrahl unter der Voraussetzung, dass er über der Geländeoberfläche verläuft treffen würde. Dieser Wert wird zur Berechnung der Transmissivität benutzt.

Die Transmissivität setzt sich aus dem Anteil der DS zusammen, die zum einen durch ‚Lücken' im Bestand durchstrahlt, und zum andern auch durch das Durchstrahlen der Materie (Blätter) selbst, wobei sich hier zusätzlich die spektrale Zusammensetzung durch Absorptionsprozesse ändert (z.B. FEDERER & TANNER 1966, ATZET & WARING 1970). Um der Komplexität besser gerecht zu werden, wird hier der Ansatz verfolgt, dass sich die Transmissivität mit der Anzahl der Hindernisse gemäß dem Gesetz von Beer reduziert. Jedes Hindernis (hier: Vegetationspunkt) entlang des Sonnenstrahl stellt eine Schicht (Filter) dar, die die Strahlung um einen bestimmten Anteil mindert. Gebäude werden als undurchlässig Materie behandelt und die Transmissivität bzw. der Strahlungswert auf Null gesetzt. Der Minderungsfaktor unterscheidet nicht verschiedene Vegetationsarten, da diese nicht aus dem benutzten LiDAR Datensatz zu entnehmen sind. Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Transmission eher von dem Alter der Vegetation abhängt (TETI & WINKLER 2008). Wie dem auch sei, dies bedeutet, dass die Transmission an manchen Stellen über- bzw. unterschätzt wird.
Aus den so ermittelten Tagesenergiewerten für die 3 Fälle: (1) ohne Beschattung, (2) mit Einbezug der Beschattung durch Topographie und (3) mit Einbezug der Beschattung durch Topographie, Vegetation und Gebäuden werden Verhältnisse zu dem Tagesenergiewert ohne Beschattung bestimmt für Fließgewässerpunkte im Abstand von 2 Meter. Diese werden dann für Gewässerabschnitte von 100m Länge gemittelt. Somit stellt das Ergebnis einen mittleren Beschattungsgrad bzw. der Anteil der möglicher DS für diese Gewässerabschnitte dar.

3. Validierung

Zur Evaluation des Modells wurden entlang verschiedener Fließgewässer mittels einer Fish-Eye Objektiv Kamera hemisphärische Aufnahmen gewonnen. Die Aufnahmen wurden ebenso wie das Modell in einem 6 minütigen Zeitintervall für den jeweiligen Sonnenverlauf des entsprechenden Tag im Jahr ausgewertet. Zusätzlich wurden per GPS die Koordinaten der Orte aufgenommen, um die Punktdaten direkt mit den im Modell an diesen Fließgewässerpunkten ermittelten Tageswerten zu vergleichen. Aufgrund Ungenauigkeiten des GPS (5-10m) und der Datengrundlage stimmten die im Feld aufgenommenen Punktkoordinaten oftmals nicht exakt mit dem Verlauf der Fließgewässer der Datengrundlage überein. An heterogenen Abschnitten entlang des Fließgewässers können diese Ungenauigkeiten dazu führen, dass man sehr unterschiedliche Orte miteinander vergleicht. An homogeneren Abschnitten ist diese Problematik nicht so sehr gegeben. Zur Validierung wurden daher nur Feldaufnahmen verwendet, deren Abstand zu einem Fließgewässerpunkt laut Datengrundlage (AWGN) weniger als 15 Meter betrug (31 Punkte). Verglichen wurden der modellierte Beschattungsanteil mit Topographie, Vegetation und Gebäuden mit den Auswertungen der hemisphärischen Aufnahmen. Tabelle 1 zeigt die Statistik der Ergebnisse. Die Validierung der 31 einzelnen Punkten ergab als maximale Differenz zwischen Modellrechnung und hemisphärischer Fotoauswertung einen Beschattungsgrad von 65%, die minimale Abweichung betrug 0% und der Median der Abweichungen lag bei 0% bzw. bei Betrachtung der absoluten Differenzen bei 8%. Die Differenz der Summen der 31 Punkte liegt unter 1% (0.4%).

Tab. 1: Auswertung der Validierung: Abweichungen der mit LiDAR Daten modellierten und der mit hemisphärischen Fotos ermittelten Beschattung (%)

Anzahl = 31	Mittelwert	Median	25%	75%	Max	Min	Varianz
Differenzen	0	0	- 6	9	66	- 42	4
Absolute Differenzen	13	8	18	3	66	0	2

4. Ergebnisse

Die Modellergebnisse für 3 Tage im Jahr (21.12., 21.03., 21.06.) zeigen zum einen deutliche saisonale Unterschiede in der Reduktion der DS, die die Fließgewässer erreicht und zum anderen den Einfluss der gewässernahen Vegetation. Der Einfluss der Topographie nimmt erwartungsgemäß im Winter durch die tieferstehende Sonne deutlich zu. Im Sommer beträgt die mittlere Reduktion der DS durch die Topographie 7%, an den Äquinoktien steigt sie auf 13% und im Winter erreicht sie 53%. Betrachtet man zusätzlich die Vegetation und die Gebäude, steigt die Beschattung im Mittel im Sommer auf 39%, an den Äquinoktien auf 51% und im Winter auf 76%.

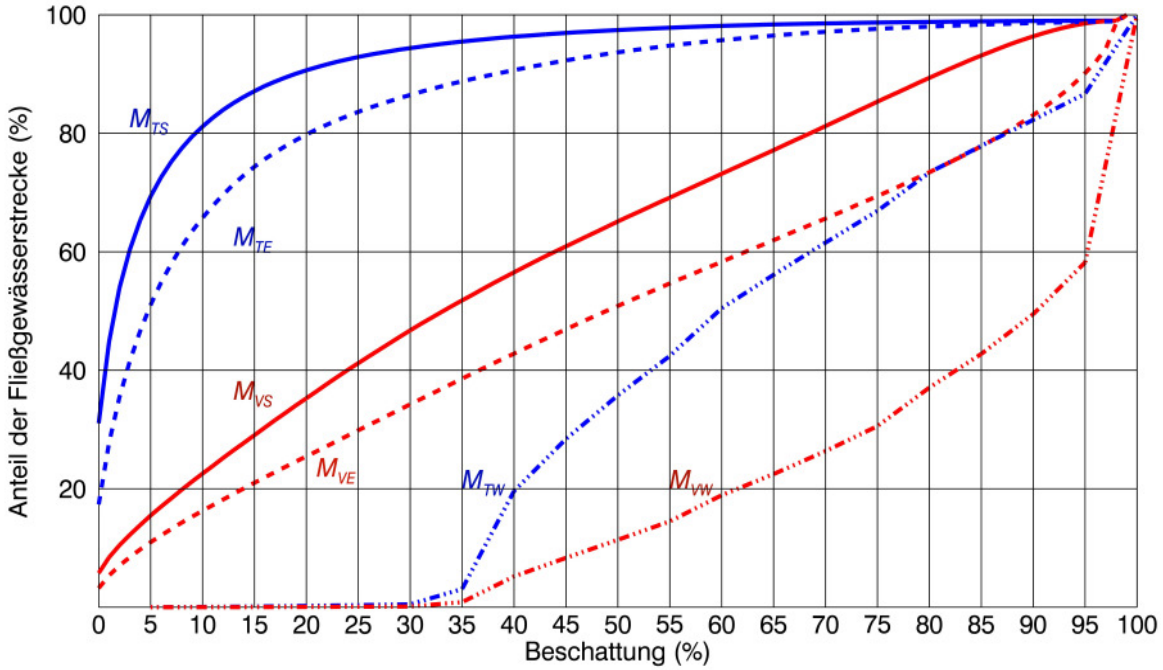


Abb.1: Kumulierte Häufigkeiten der Beschattung für entlang der Fließgewässer BW: Blaue Kurven, Modellierung des Einflusses der Topographie, Rot: Modellierung des Einflusses der Topographie, Vegetation und der Gebäude. MTS und MVS: 21.06. (durchgezogene Linie), MTE und MVE: 21.03. (gestrichelte Linie), MTW und MVW: 21.12. (Strich-Punkt Linie).

Abbildung 1 zeigt die Summenhäufigkeiten der Beschattung für den Tag mit der längsten Sonnenscheindauer (21.06.), den Tag mit der Tag-Nachtgleiche (21.03. bzw. 23.09.) und den Tag mit der kürzesten Sonnenscheindauer (21.12.). Zu erkennen ist die Zunahme der Beschattung vom Sommer zum Winter, aber auch der deutliche Einfluss der gewässernahen Vegetation. Hervorzuheben ist, dass die potentiellen Energiemengen der DS in den ver-

schiedenen Jahreszeiten sehr unterschiedlich sind (1:8:18, Winter:Äquinoktien:Sommer) und daher die reduzierte Energie im Sommer etwa das 8.5-fache der reduzierten Energie im Winter bzw. das 1.5-fache der an den Tagesgleichen ist.
Die Unterscheidung der gewonnen Daten nach naturräumlichen Einheiten innerhalb BW zeigt die unterschiedlichen Einflüsse von Topographie, Landnutzung und Kulturlandschaft. Die höchste Energiereduktion erfährt der Schwarzwald. Hier reduziert die Topographie im Mittel die DS um 14% und mit der Vegetation und Gebäuden um 56%. Die geringste Strahlungsreduktion findet man in dem Gebiet der Mainfränkische Platten. Hier wird die DS durch die Topographie um 4% reduziert und mit der Vegetation um 20%. Tabelle 2 zeigt die unterschiedlichen Strahlungsreduktionen von den 13 naturräumlichen Einheiten.

Tab. 2: Mittelwerte der Energiereduktion der DS durch die Topographie sowie Topographie, Vegetation und Gebäude unterteilt nach naturräumlichen Einheiten innerhalb BW am 21.06.:

Naturräumliche Einheit	Σ Länge (km)	Mittlere Reduktion (%) durch Topographie	Vegetation	Differenz (%)
Schwarzwald	7097	14	56	42
Odenwald	675	8	47	38
Hochrheingebiet	205	9	46	37
Schwäbisches Keuper-Lias-Land	5963	7	45	38
Schwäbische Alb	1715	7	34	27
Neckar- und Tauber-Gäuplatten	7454	5	33	28
Voralpines Hügel- und Moorland	3313	5	32	27
Nördliches Oberrhein Tiefland	1279	2	30	28
Südliches Oberrhein Tiefland	986	3	27	24
Fränkisches Keuper-Lias-Land	155	3	26	23
Donau-Iller-Lech-Platte	2239	3	24	21
Mittleres Oberrhein Tiefland	1803	2	23	21
Mainfränkische Platten	58	4	20	16

5. Fazit

Es wurde ein Modell entwickelt und validiert, das mittels hochaufgelöster LiDAR-, Fließgewässer- und Gebäudedaten die Beschattung durch die Topographie, Vegetation und Gebäude entlang der Fließgewässer in Baden Württembergs bestimmt. Als Ergebnis wird die anteilige Reduktion der durch die direkte Solarstrahlung induzierte Energie für Gewässerabschnitte mit 100 Meter Länge ausgegeben. Das Modell zeigt deutlich den Einfluss der gewässernahen Vegetation auf den aquatischen Energiehaushalt und den Zustand der Gewässer BW hinsichtlich ihrer Beschattung.

Literatur

ATZET, T. & R. H. WARING (1970): Selective Filtering of Light by Coniferous Forests and Minimum Light Energy Requirements for Regeneration. - Canadian Journal of Botany, 48, 2136-2167.

BESCHTA R.L. (1997): Riparian shade and stream temperature: an alternative perspective. Rangelands, 19, 25–28.

BOURQUE C.P.-A. & J. H. POMEROY (2001) :Effects of forest harvesting on summer stream temperatures in New Brunswick, Canada: an inter-catchment, multiple-year comparison. Hydrology and Earth System Sciences, 5(4), 599-613.

FEDERER C.A. & C. B. TANNER (1966): Spectral Distribution of Light in Forests. – Ecology, 47, 555-560.

FISCHER H-S. & H. GILGEN (2002): DACHRad – Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung in Deutschland, Österreich und der Schweiz. - Bulletin of the Geobotanical Institute ETH, 68, 83–94

FUNK, M. (1983): Berechnung der Globalstrahlung auf der Basis eines digitalen Geländemodells. - Berichte und Skripten, Nr.15; Zürich, 1983.

GATES D.M. (1980): Biophysical Ecology. - Springer-Verlag New York, Inc.

JOHNSON S.L. & J. A. JONES (2000): Stream Temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57:30-39

KING COUNTY (2005): Riparian Shade Characterization Study. Prepared by Curtis DeGasperi, Water and Land Resources Division. Seattle, Washington

KOUKOULAS, S. & G. A. BLACKBURN (2005): Spatial relationships between tree species and gap characteristics in broad-leaved deciduous. - Journal of Vegetation Science. 2005. 16: p. 587-596.

KREITH, F. & J. F. KREIDER (1978): Principles of Solar Engineering. - New York: McGraw-Hill

KUMAR L., A. K. SKIDMORE & E. KNOWLES (1997): Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. - Int.J. Geographical Information Science, 1997, vol. 11, no. 5, 475-497

MOORE, R. D., D. L. SPITTLEHOUSE & A. STORY (2005): Riparian Microclimate and Stream Temperature Response to Forest Harvesting: A Review. - Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 41(4):813-834.

TETI P. & R. WINKLER (2008): Snow hydrology and solar radiation in growing and deteriorating pine stands. - BC Journal of Ecosystems and Management, Volume 9, Number 3

TETI P. & R.G. PIKE (2005): Selecting and testing an instrument for surveying stream shade. B.C. Journal of Ecosystems and Management 6(2):1-16

WEBB B. W., D. M. HANNAH, R. D MOORE, L. E. BROWN & F. NOBILIS (2008): Recent advances in stream and river temperature research, - Hydrological Processes, 22, 902-918

Die Bedeutung der hydrologischen und biogeochmischen Dynamik in Auen für das Wasserqualitätsmanagement

Jan Fleckenstein, Sven Frei, Klaus-Holger Knorr und Christina Weyer

Die Auezone (riparian zone) von Fließgewässern stellt eine charkteristische Übergangszone zwischen Oberflächen- und Grundwasser dar, die die Wasser- und Stoffflüsse zwischen den beiden Umweltkompartimenten entscheidend beeinflusst. Die Abflussbildung in Vorflutern kleiner Ordnung wird oft maßgeblich durch die geologische und topographische Struktur der Aue gesteuert (z.B. FREI et al. 2010). Die ereignisbezogene hydrologische Dynamik bewirkt wiederum spezifische Raum- und Zeitmuster biogeochemischer Bedingungen in der Aue, die Transformation, Freisetzung und Transport von Stoffen (z.B. DOC, Sulfat, Nitrat) steuert und einen häufig hoch-nichtlinearen Verlauf der Stoffkonzentration im Abfluss bewirkt. Felddaten aus einem vorfluternahen Niedermoor deuten darauf hin, dass sowohl die Wasserqualität als auch die Abflussgenerierung während intensiver Niederschlagsereignissen, maßgeblich von der Interaktion zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser beeinflusst werden. Die für Abflussgenerierung und Gewässergüte wichtigsten Prozesse finden dabei in der ufernahen Zone statt. Ein besseres Verständnis dieser Dynamik und dabei vor allem des Wechselspiels zwischen hydrologischen und biogeochemische Prozessen stellt eine wichtige Voraussetzung für die Charakterisierung und Quantifizierung von Stoffflüssen dar, die für die Abschätzung und Bewertung von Wasserqualitätstrends, z.B. im Lichte des Klimawandles, dringend benötigt wird. Diese Zusammenhänge werden anhand von Felddaten aus einem kleinen Einzugsgebiet im Fichtelgebirge und explorativen Simulationstudien untersucht. Sowohl die Abflussgenerierung als auch chemische Signatur des Abflusses zeigen eine deutlich nichtlineare, hysteretische Dynamik. Der Austrag von Stoffen ist darüber hinaus stark von den hydrologischen und daraus resultierenden biogeochemischen Vorbedingungen beeinflusst.

Literatur:

FREI, S., G. LISCHEID & J. H. FLECKENSTEIN (2010): Effects of micro-topography on surfacesubsurface exchange and runoff generation in a virtual riparian wetland – a modelling study, Advances in Water Resources, 30(11), doi:10.1016/j.advwatres.2010.07.006

Methoden für die Abschätzung der Massenflüsse von Xenobiotika in verschiedenen Maßstäben in städtischen Gebieten

Frido Reinstorf, Sebastian Leschik, Andreas Musolff, Karsten Osenbrück, Gerhard Strauch, Mario Schirmer

Zusammenfassung

Im Verbindung mit nachhaltigem urbanen Wassermanagement spielt die Ermittlung von Massenflüssen für die Bewertung von anthropogenen Einflüssen durch Xenobiotika eine bedeutende Rolle. Zahlreiche bekannte Methoden existieren für die Bestimmung von Parametern und zur Prozessidentifikation in Aquiferen und Oberflächengewässern. Deshalb entstand ein Bedarf an speziellen Methoden, die in urbanen Gebieten anwendbar sind. Dieser Beitrag liefert einen Überblick über neue und bekannte Methoden, die in unseren Untersuchungen zur Ermittlung von Massenflüssen innerhalb und zwischen verschiedenen Kompartimenten angewandt wurden. Es werden multiskalige Anwendungen diskutiert, die Mess- und Modellierungsmethoden auf Skalen von groß (> 100 km^2) und mittel (< 10 km^2) kombinieren. Außerdem werden Methoden berücksichtigt, die die Quantifizierung der Interaktionen zwischen Kompartimenten auf kleiner Skale (< 1000 m^2) ermöglichen.

1. EINLEITUNG

Urbane Gewässer werden häufig mit Xenobiotika in Spurenkonzentrationen, so genannten Mikroverunreinigungen, belastet. Es handelt sich dabei z.B. um Arzneimittel, endokrin wirksame Stoffe und industrielle Stoffe, für die bestimmte Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit vermutet werden. Nur wenig Information liegt über das Gefährdungspotenzial bei langfristiger Exposition für Menschen und anderen Lebewesen gegenüber einem Gemisch von Mikroverunreinigungen vor. Derzeit ist eine umfassende Risikobewertung nur sehr beschränkt möglich, da valide Daten nach wie vor fehlen (REINSTORF et al. 2008).

In diesem Artikel wird eine Auswahl von neuen und bekannten Untersuchungs- und Auswertungsmethoden für städtische Gebiete auf unterschiedlichen räumlichen Skalen und für verschiedene Dimensionen vorgestellt. Für diese Methoden wird eine Anleitung zur Abschätzung der Stoffflüsse auch für stark heterogene Systeme, wie z.B. urbanen Grundwasserleitern und dem hyporheischen Interstitial, gegeben. Der Beitrag soll die Auswahl geeigneter Methoden bzw. Methodenkombinationen erleichtern, um das Verhalten von Xenobiotika in städtischen Gebieten zielgerichtet untersuchen zu können. Die Maßstäbe der Untersuchungsmethoden reichen von großen (> 100 km^2), mittleren (< 10 km^2) bis kleinen Skalen (< 1000 m^2). Die Dimensionen variieren von 1D bis 3D. Auch Methoden für die Bilanzierung eines gesamten Stadtgebietes werden vorgestellt.

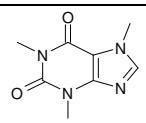
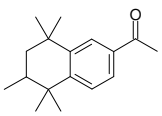
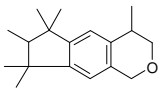
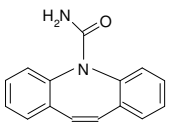
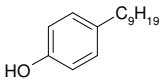
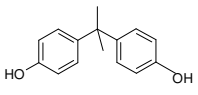
Die Methoden wurden für die Substanzen technisches Nonylphenol (t-NP), Bisphenol-A (BPA), Koffein (CAF), Galaxolid (GAL), Tonalid (TON), Carbamazepin (CBZ) sowie Indikatoren für Abwasser-Einflüsse, wie Bor (B), Chlorid (Cl^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) entwickelt bzw. ausgewählt und getestet.

2. Kurze Beschreibung der berücksichtigten Methoden und Indikatoren

2.1 Indikatoren zur Identifizierung von anthropogen verursachten Massenflüssen

Für die Verunreinigung urbaner Wasserressourcen können verschiedene Quellen verantwortlich sein. Eine Unterscheidung der Quellen kann oft durch typische Komponenten, die einem speziellen Input zugeordnet werden können, durchgeführt werden. CAF, synthetische Duftstoffe, z.B. GAL und TON, und Arzneimittelwirkstoffe, z.B. CBZ, können als Indikatoren für kommunale Abwässer genutzt werden. Ihre polaren und persistenten Eigenschaften ermöglichen die Beobachtung in der aquatischen Umgebung über lange Zeiträume hinweg (BUERGE et al. 2003). Jedoch nicht alle "urbane Verunreinigungen" erfüllen diese Voraussetzung einer hohen Polarität und Persistenz. BPA und Nonylphenole, z.B. t-NP, die v.a. in industriellen Abwässern gefunden werden, besitzen Halbwertzeiten von einigen Tagen bis Wochen (in Abhängigkeit von den Abbaubedingungen). Die Eigenschaften von BPA und t-NP erlauben diesen Stoffen die Adsorption an Oberflächen organischer Kohlenstoffen. Trotzdem können Nonylphenole und lineare Alkylbenzenketten als nützliche Indikatoren industrieller Verunreinigungen verwendet werden (DIEZ et al. 2006).
Die Eigenschaften und die chemische Analytik der untersuchten Substanzen sind in REINSTORF et al. (2008) beschrieben. Einen Überblick zeigt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Strukturen, log K_{ow} und analytische Parameter urbaner Indikatoren, die für die Methodenuntersuchung verwendet wurden.

Komponente	Struktur	CAS-Nr.	pK_{OW}	LOQ (Oberflächenwasser) [ng/L]	Literaturquelle
Koffein		58-08-2	–0.07	5	BUERGE et al. 2003
Galaxolid®		1222-05-5	5.9	1	FROMME et al. 2001
Tonalid®		1506-02-1	5.7	1	FROMME et al. 2001
Carbamazepin		298-46-4	2.45	5	FENZ et al. 2005
technisches-Nonylphenol		104-40-5 (4-nNP)	5.76 (4-nNP)	10	SACHER et al. 2001
Bisphenol A		80-05-7	3.32	10	BURSCH et al. 2004

2.2 Methoden, Skalen und Dimensionen

Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die berücksichtigten Methoden, die für die Ermittlung von Massenflüssen auf verschiedenen Skalen und Dimensionen angewendet wurden.

Isotopen, z.B. des Wassers wie ^{2}H, ^{18}O und ^{3}H, und hydrochemische Signaturen, z.B. von den Elementen H, C, N, O und S, wurden genutzt, um die Prozesse der Fluss - Grundwasser - Interaktion (FGI) und der Transportbedingungen sowie der Quellen von Verunreinigungen zu identifizieren. Dies wird beispielhaft gezeigt anhand der FGI auf der kleinen Skale eines Flussabschnittes der Saale in der Stadt Halle und für die Transportsimulation für die Saale auf mittlerer und großer Skale.

Die "direct push"-Technologie, eine innovative Bohrmethode, wurde angewandt, um die hydraulische Leitfähigkeit und deren Heterogenität auf einem Testgebiet mit einem undichten Abwasserkanal in der Stadt Leipzig zu ermitteln (Wasser-Abwasser-Einzugsgebiet, genannt W-A-EZG). Passive Probennehmer wurden verwendet, um die Massenflüsse von Substanzen zeitintegriert in Fließgewässern und im Grundwasser zu ermitteln.

Geophysikalische Methoden, insbesondere Salinitäts- und Temperatur-Logs, kombiniert mit Isotopensignaturen wurden verwendet um die Eigenschaften von aufsteigendem Tiefengrundwasser in einer Grundwassermessstelle in der Stadt Halle/Saale zu interpretieren.

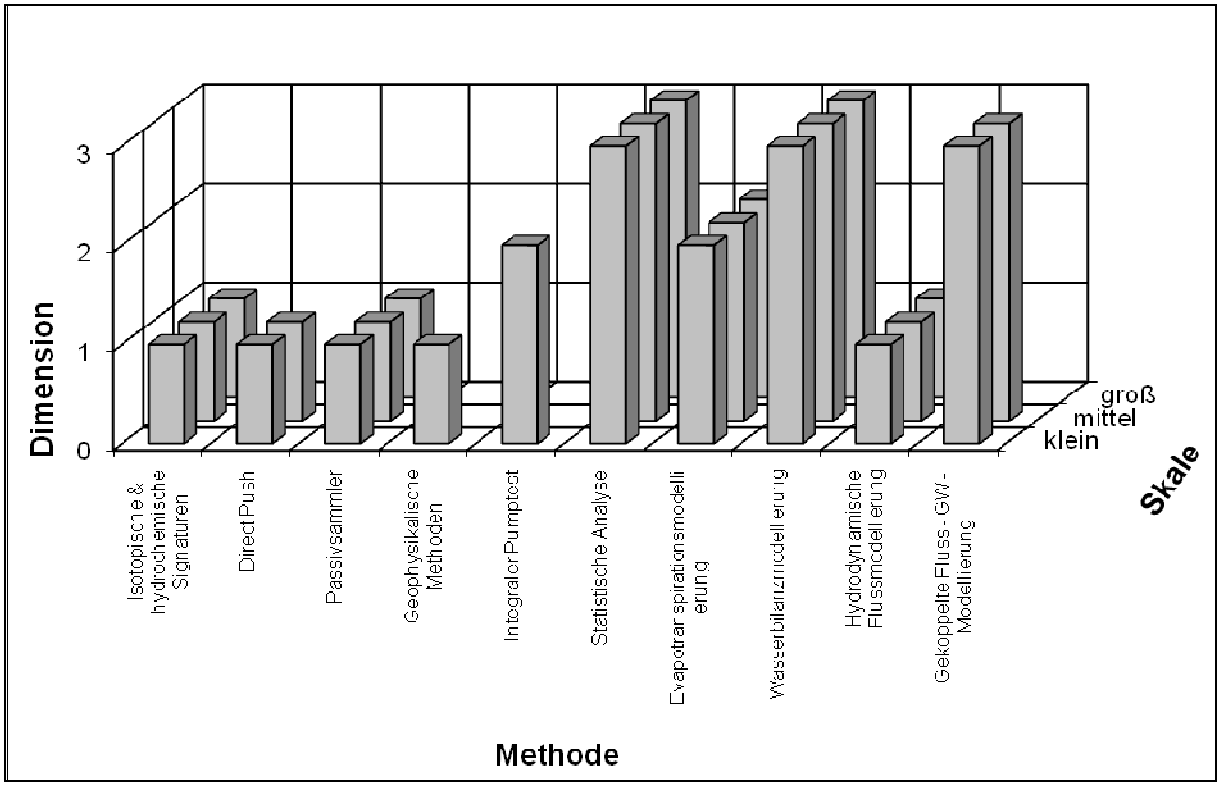


Abb. 1: Überblick über die berücksichtigten Methoden auf verschiedenen Skalen und Dimensionen. Die Skalen bedeuten "klein" (< 1000 m^2), "mittel" (< 10 km^2) und "groß" (> 100 km^2)

Der integrale Pumptest wurde verwendet, um auf dem W-A-EZG den Massenfluss der Kontaminanten unter Berücksichtigung der räumlichen Heterogenität der Aquifer-

eigenschaften zu untersuchen. Mit Hilfe statistischer Methoden, wie Faktoren- und/oder Korrelationsanalyse von Zeitreihen wurde die Diversität der Indikatoren im W-A-EZG untersucht und eine Optimierung des Messstellennetzes im Verlauf der Saale in der Stadt Halle durchgeführt (MUSOLFF et al. 2010).
Die Modellierung von Evapotranspiration und Grundwasserneubildung wurde durchgeführt, um die Variabilität der oberen Randbedingung für numerische Grundwassermodelle in den Städten Halle und Leipzig zu ermitteln (REINSTORF et al. 2008).
Ein gekoppeltes Fluss-Grundwasser-Modell wurde erstellt, um in der Stadt Halle die Massenflüsse der Xenobiotika durch die Interaktionszone zwischen Grundwasser und Fluss zu simulieren (REINSTORF et al. 2008).

3. Schlussfolgerungen

Die Bestimmung von Massenflüssen auf verschiedenen Skalen in urbanen Wässern hat eine fundamentale Bedeutung für das integrierte Wasserressourcenmanagement (IWRM). Zahlreiche Methoden existieren, um diese Flüsse im Oberflächenwasser, im Grundwasser und in der Interaktionszone zu messen. Die Methoden unterscheiden sich in der räumlichen Auflösung, im Beprobungsvolumen und in den zeitlichen und räumlichen Skalen, die sie repräsentieren sollen. Es ist zu beachten, dass die Skale auf der eine bestimmte Methodik angewandt wird, signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben kann. Dies führt z.B. zu Unterschieden zwischen den Ergebnissen, die anhand einer Rasterbeprobung gewonnen werden und denen, die auf rein großskaligen Techniken basieren. Deshalb kann eine bessere Repräsentativität der Ergebnisse erzielt werden, wenn Messungen auf verschiedenen Skalen durchgeführt werden und großskalige Methoden daran "geeicht" werden.
Das Studienziel spielt eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der geeigneten Methoden. Für regionale Untersuchungen sind großskalige Techniken eher geeignet während Prozessstudien Messungen mit hoher zeitlichen und räumlicher Auflösung erfordern. Alle Methoden habe ihre Grenzen und Unsicherheiten. Jedoch reduzieren multiskalige Anwendungen, die verschiedene Techniken koppeln, die Unsicherheiten nachweislich.
Durch kombinierte Analysen ausgewählter Xenobiotika, die als Indikatoren genutzt wurden, in Verbindung mit verschiedenen Modellierungstechniken, konnte ein besseres Verständnis für die Ausbreitung und den Transport, für die Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser sowie den natürlichen Abbau von anthropogen Verunreinigungen in urbane Gewässern erzielt werden.

Danksagung

Wir danken John Molson (Quebec City, Canada) und Marion Martienssen (BTU Cottbus, Deutschland) für die vielen hilfreichen Diskussionen. Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ (POF 5.1.1.3) und durch die Europäische Union FP6 Integrated Project AquaTerra (Project no. 505428) unter der thematischen Priorität “Sustainable development, global change and ecosystems”.

Literaturverzeichnis

BUERGE, I. J., T. POIGER, M. D. MÜLLER, & H. R. BUSER (2003): Caffeine, an anthropogenic marker for wastewater contamination of surface waters. *Environ. Sci. Technol.* 37(4), 691–700.

BURSCH, W., M. FUERHACKER, M. GEMEINER, B. GRILLITSCH, A. JUNGBAUER, N. KREUZINGER, E. MOESTL, S. SCHARF, E. SCHMID, S. SKUTAN, & I. WALTER (2004): Endocrine disrupters in the aquatic environment: the Austrian approach – ARCEM. *Water Sci. Technol.* 50(5), 293–300.

DIEZ, S., E. JOVER, J. ALBAIGÉS, & J. M. BAYONA (2006): Occurrence and degradation of butyltins and wastewater marker compounds in sediments from Barcelona harbour, Spain. *Environ. Inter*. 32, 858–865.

FENZ, R., A. P. BLASCHKE, M. CLARA, H. KROISS, D. MASCHER & M. ZESSNER (2005): Quantification of sewer exfiltration using the anti-epileptic drug carbamazepine as marker species for wastewater. *Water Sci. Technol.* 52(9), 209–217.

FROMME, H., T. OTTO, & K. PILZ (2001): Polycyclic musk fragrances in different environmental compartments in Berlin (Germany). *Water Res.* 35(1), 121–128.

MUSOLFF, A., S. LESCHIK, M.-T. SCHAFMEISTER, F. REINSTORF, G. STRAUCH, R. KRIEG, & M. SCHIRMER (2010): Evaluation of xenobiotic impact on urban receiving waters by means of statistical methods. *Water Sci. Technol.* 62(3), 684 - 692.

REINSTORF, F., G. STRAUCH, K. SCHIRMER, H.-R. GLÄSER, M. MÖDER, R. WENNRICH, K. OSENBRÜCK & M. SCHIRMER (2008): Mass fluxes and spatial trends of xenobiotics in the waters of the city of Halle, Germany. *Environ. Pollut.* 152, 452–460.

SACHER, F., F. T. LANGE, H.-J. BRAUCH, & I. BLANKENHORN (2001): Analytical methods and results of a monitoring program in Baden-Württemberg, Germany. *J. Chromatography A* 938(1–2), 199–210.

Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern

Stephan Hannappel, Sarah Zeilfelder, Gabriele Lemke, Beate Schwerdtfeger

Zusammenfassung

Für die gesamte mit Lockergesteinen bedeckte Landesfläche von Mecklenburg-Vorpommern wurden unter Nutzung vorhandener digitaler Daten sowie darauf basierender Berechnungen die Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten ungesättigten Zone nach einem in der DIN 19732 aufgeführten Algorithmus ermittelt. Eingangsdaten sind die Grundwasserneubildung, die Feldkapazität und der Flurabstand des Grundwassers. Diese erstmals in einem Bundesland flächenhaft unter Nutzung des vorhandenen - u.a. in Bohrungsdatenbanken und Kartenwerken abgelegten - hydrogeologischen Kenntnisstandes ermittelten Daten werden digital für zukünftige Modellierungen des Nährstoffhaushaltes im Untergrund mit dem Ziel der Identifizierung von Eintragspfaden und Fließwegen verwendet. Die Verweilzeiten des Sickerwassers unterscheiden sich aufgrund der Lagerungsbedingungen des Grundwassers in den eiszeitlich geprägten Gebieten mit kleinräumigen Inhomogenitäten erheblich: sie reichen von wenigen Wochen bzw. Monaten in Entlastungsgebieten mit sehr geringen Flurabständen bis zu mehr als 100 Jahren in Grundmoränengebieten mit mächtigen bindigen Überlagerungen. Damit sind sie für die angestrebte Nutzung eine wertvolle Informationsquelle.

1. Einleitung

Die Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone werden als Input-Daten für die Modellierung des Stoffhaushaltes im System Boden - ungesättigte Zone - Grundwasser mit einer auch in anderen Regionen Norddeutschlands erprobten Methode (WENDLAND et al. 2010) benötigt. Sie wurden daher im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) des Landes Mecklenburg-Vorpommern mit dem Algorithmus der DIN 19732 (1997) im Sinne der „intrinsischen“ Empfindlichkeit des Grundwassers (HANNAPPEL & VOIGT 1999) berechnet.

Unter diesem Begriff werden die ausschließlich auf die natürliche Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers bezogenen Eigenschaften verstanden. Die intrinsische Empfindlichkeit ist das „worst case scenario“ eines Schadstoffeintrages in die ungesättigte Zone, bei dem keine Wechselwirkung des Schadstoffes mit den Medien in der ungesättigten Zone stattfindet. Sie kann auf Basis der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung eingeschätzt werden. Die Methode zur Berechnung dieser Verweilzeiten nach der DIN 19732 basiert ausschließlich auf Daten, die in den Beständen der Staatlichen Umweltverwaltungen bzw. Geologischen Dienste in Deutschland - so auch im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern - vorhanden sind bzw. aus ihnen abgeleitet wurden. Große Bedeutung kommt dabei den Bohrungsdaten sowie den Flurabständen bei.

Die Methode wurde bereits in anderen Regionen Norddeutschlands erfolgreich angewendet (HEINKELE et al. 2001). Die resultierenden Verweilzeiten sind gut geeignet, die im eiszeitlich überprägten Untergrund des Landes Mecklenburg-Vorpommern stattfindenden Prozesse in z.T. sehr langen Zeiträumen darzustellen.

2. Methodik zur Ermittlung der Verweilzeiten nach der DIN 19732

In die Berechnungen nach der DIN 19732 gehen folgende Parameter ein:

- die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung bzw. der Flurabstand des Grundwassers im oberen, großräumig zusammenhängenden und wasserwirtschaftlich genutzten Hauptgrundwasserleiter,
- die Feldkapazität der gesamten Grundwasserüberdeckung,
- die flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate.

Die Verweilzeit des Sickerwassers dann nach folgender Formel berechnet:

$t_s = \Sigma M_i * FK_i / GWNB = (M_1 * FK_1 + M_2 * FK_2 + \ldots + M_n * FK_n) / GWNB$

mit:

GWNB	Grundwasserneubildungsrate in mm$*$ a^{-1}
FK	Feldkapazität der gesamten Grundwasserüberdeckung in mm * dm^{-1}
M	Mächtigkeit der gesamten Grundwasserüberdeckung in dm

Der durch hydrodynamische Dispersion verursachte voraus- oder nacheilende Stoffffluss wird nicht berechnet. Bevorzugte Fließwege (z.B. Makroporenfluss) können je nach Aufenthaltsort des Stoffes die Verlagerungsgeschwindigkeit erhöhen (wenn der Stoff direkt an der Oberfläche von Poren vorliegt) oder verringern (wenn der Stoff in der Bodenmatrix vorliegt).

Der Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone kommt im quartären Lockergestein besonders Gewicht zu, da aufgrund der unterschiedlichen Lagerungsverhältnisse sehr große Differenzen auftreten können.

Prozesse des Makroporenflusses und des preferential flow werden bei der Anwendung der DIN 19732 nicht berücksichtigt. Diese Prozesse spielen vor allem in bindigen, quellfähigen und gefügereichen Böden aus Festgesteinen im Mittelgebirgsbereich eine Rolle.

In der Reihenfolge Feldkapazität → Grundwasserneubildung → Flurabstand nimmt die Bedeutung der Faktoren bei der Berechnung der Verweilzeiten zu.

3. Methodisches Vorgehen und verwendete Daten

Folgende Eingangsdaten werden zur Berechnung der Verweilzeiten benötigt und wurden vom LUNG digital zur Verfügung gestellt:

- Digitales Geländehöhenmodell DGM 25,
- Daten zu den oberirdischen Fließ- und Standgewässer,
- Daten zur Grundwasseroberfläche in ungespannten Gebieten,
- Daten der Hydrogeologischen Karte 1 : 50 000 (HK 50, Voigt 1987),
- Schichtbezogene Daten der Landesbohrdatenbank des LUNG,
- Feldkapazitäten der Bodenzone,
- Grundwasserneubildungsraten (HGN 2008).

Abbildung 1 zeigt die flächenhafte Verteilung der zuletzt aufgeführten Daten. Berechnet wurden sie mit dem BAGLUVA-Verfahren unter Anwendung des ATV-Merkblattes M 504 (HGN 2008). Es handelt sich um langjährige Mittelwerte unter Berücksichtigung des direkten Oberflächenabflusses. Entsprechend der klimatischen Einordnung des Landes mit niedrigen Niederschlags- und hohen Verdunstungsraten sind die Neubildungsraten im überregionalen

Vergleich mit anderen Bundesländern in Deutschland niedrig, lokal besteht sogar in einigen Teilbereichen des Landes im Osten Grundwasserzehrung.

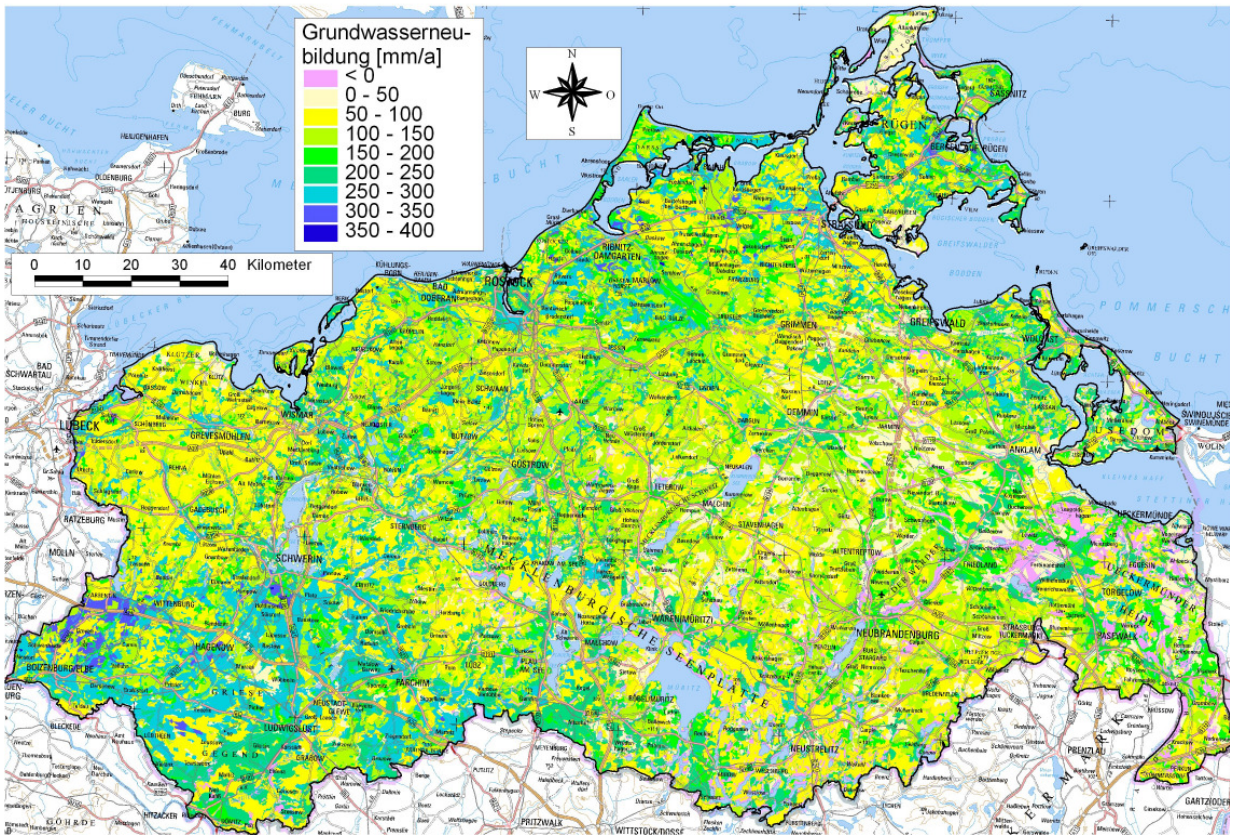


Abb. 1: Mittlere langjährige Grundwasserneubildungsraten in Mecklenburg-Vorpommern

4. Berechnungen der notwendigen Teildaten

4.1 Flurabstand des oberen großräumig zusammenhängenden Grundwassers

Hierfür wurde unterschieden zwischen Gebieten mit ungespanntem und gespanntem Grundwasser nach den digital vorliegenden Daten der Hydrogeologischen Karte 1:50000 (VOIGT 1987). Bei ungespanntem Grundwasser entspricht der Flurabstand der lotrechten Differenz zwischen der Gelände- und der Grundwasseroberfläche. Da diese Daten aktuell und landesweit in hoher Qualität zur Verfügung standen, konnte der Flurabstand im GIS automatisiert errechnet werden.

In den gespannten Gebieten hingegen musste zur Ermittlung des Flurabstandes zunächst die Unterkante der - den Grundwasserleiter überlagernden - bindigen Deckschicht ermittelt werden. Dafür wurden insgesamt 22.139 Bohrungen mit 166.107 vertikal definierten Schichtdatensätzen bis 50 Meter Tiefe verwendet, die jeweils lithologische und genetische Informationen enthalten. Mit diesen Daten - und unter Hinzuziehung kartenbasierter Zusatzinformationen aus der HK 50 - wurde pro Bohrung der Flurabstand in Meter unter Gelände festgelegt. Unterschieden werden musste hierbei wiederum zwischen gespannten und ungespannten Grundwässern, da unter den glaziären Bedingungen des Landes auch ungespanntes Grundwasser unter einer bindigen Bedeckung vorkommen können. Abbildung 2 zeigt die Häufigkeitsverteilungen mit deutlich niedrigeren Werten von ungespannten Grundwässern, da hier die Mächtigkeit der bindigen Deckschichten im Hangenden geringer ist. Diese Daten

wurden anschließend einer Variogrammanalyse (s. Abbildung 3) unterzogen und mit Kriging in das regelmäßige 100 x 100-Meter- Berechnungsraster überführt.

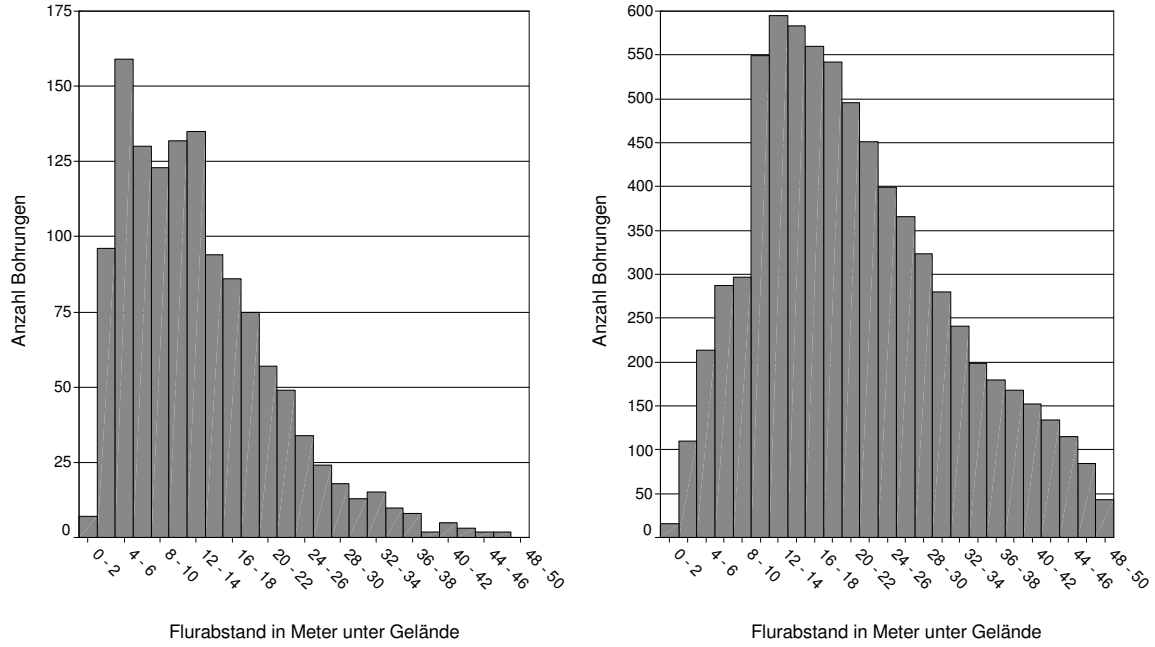


Abb. 2: Flurabstände von ungespannten (links) und gespannten (rechts) Grundwässern unter jeweils bindiger Grundwasserüberdeckung

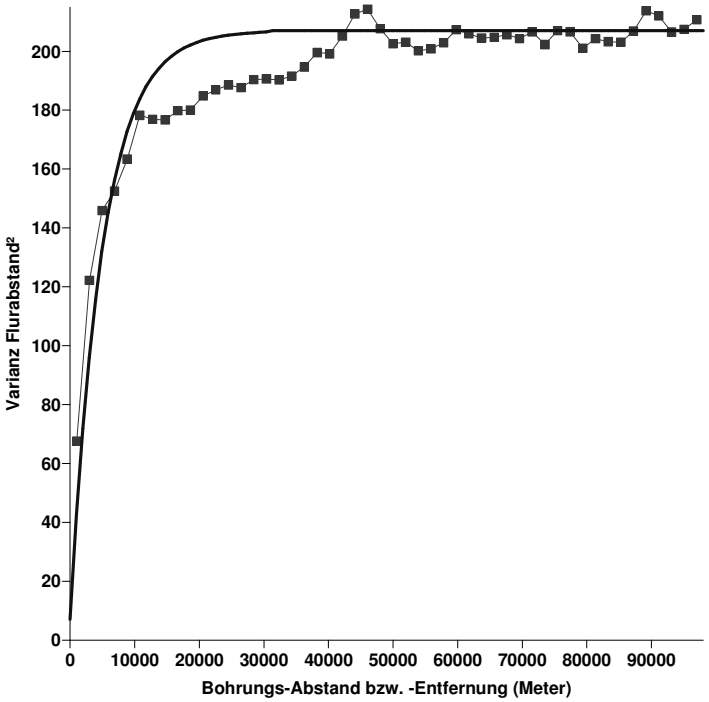


Abb. 3: Variogramm der Regionalisierung der bohrungsbezogen und mächtigkeitsgewichtet für die ungesättigte Zone unterhalb des Bodens aufsummierten FK-Werte

Zusammen mit den Flurabständen in den Gebieten mit ungespanntem Grundwasser sind diese Berechnungsergebnisse in Abbildung 4 dargestellt. Erkennbar sind die großräumigen hydrogeologischen Lagerungsverhältnisse des Landes mit den zusammenhängenden Ge-

schiebemergelhochflächen (Flurabstände zumeist > 10 Meter) sowie die Niederungen mit den Entlastungsgebieten. Hier befindet sich das Grundwasser oberflächennah in weniger als 2 Meter Tiefe.

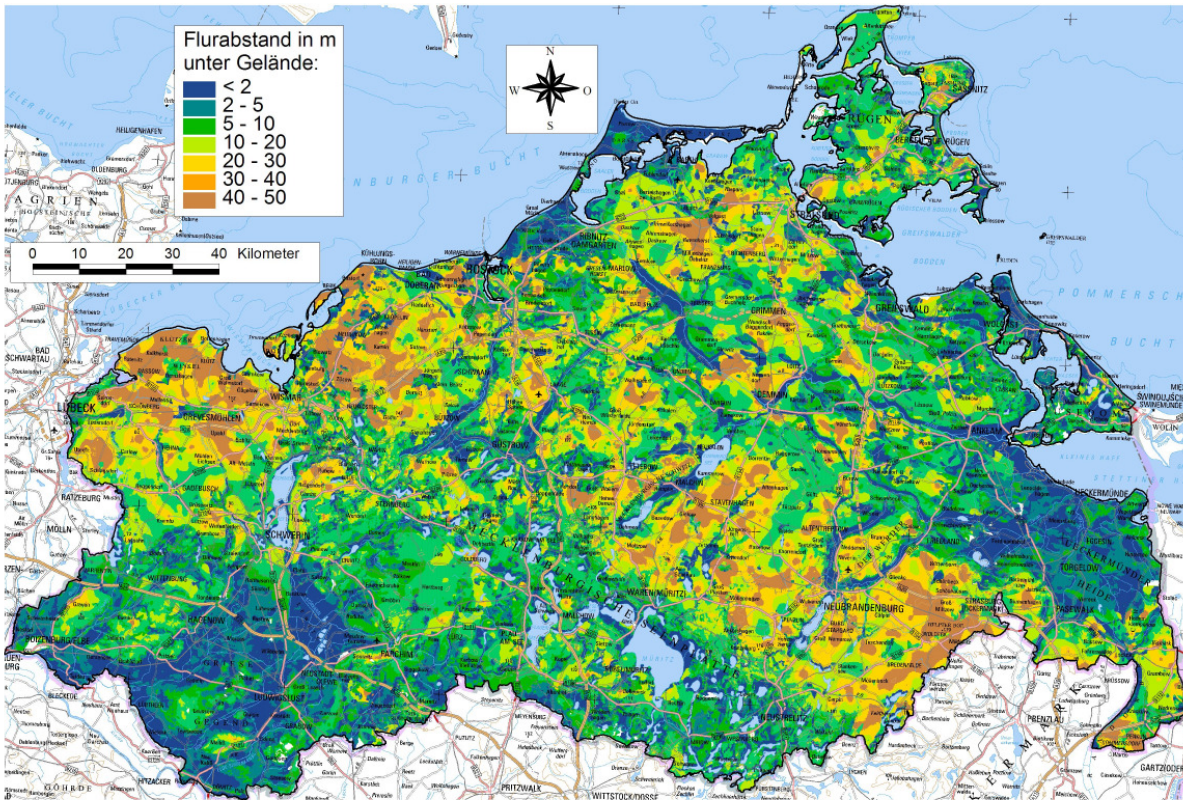


Abb. 4: Flurabstand des oberen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserleiters

4.2 Feldkapazitäten in der gesamten ungesättigten Zone

Die Feldkapazitäten wurden ebenfalls anhand der Schichtbeschreibungen der Bohrungsdaten und unter Verwendung von in der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (2005) aufgeführten tabellarischen Zuordnungen ermittelt.

Für den Bereich des Bodens bis 2 Meter Tiefe wurden vom LUNG digitale Daten zu den summarischen Feldkapazitäten übermittelt, die anhand hochaufgelöster bodenkundlicher Kartenwerke und ebenfalls unter Nutzung der KA 5 erstellt worden waren. Sie wurden zu den Werten der darunter liegenden ungesättigten Zone bis zur Grundwasseroberfläche addiert. Abbildung 5 zeigt die resultierenden Werte für die gesamte ungesättigte Zone.

Deutlich erkennbar sind vergleichbare Strukturen wie bei den Flurabständen, da in den Grund- und Endmoränengebieten des Landes zugleich hohe Flurabstände und hohe Feldkapazitäten aufgrund der überwiegend bindigen Struktur der Sedimente vorliegen.

5. Ermittlung der Verweilzeiten der Grundwasserüberdeckung

Nach der in Kap. 2 aufgeführten Formel wurden abschließend die Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung berechnet. Abbildung 6 zeigt sie flächenhaft in einer siebenfach gewählten Intervallskalierung. Die Daten sind als GIS-lesbares Grid digital abgelegt und können in beliebiger Skalierung dargestellt werden.

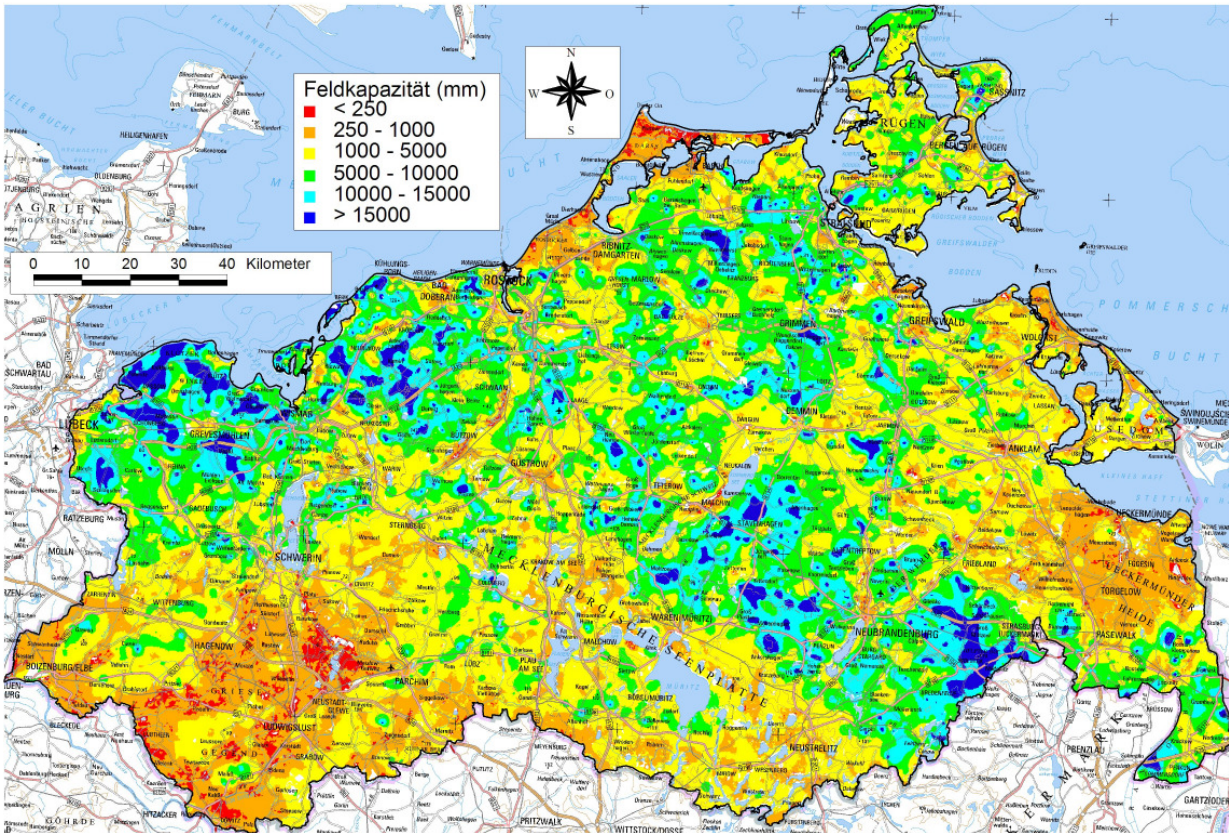


Abb. 5: Summarische Feldkapazitäten der gesamten Grundwasserüberdeckung von der Geländeoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche inklusive des Bodens

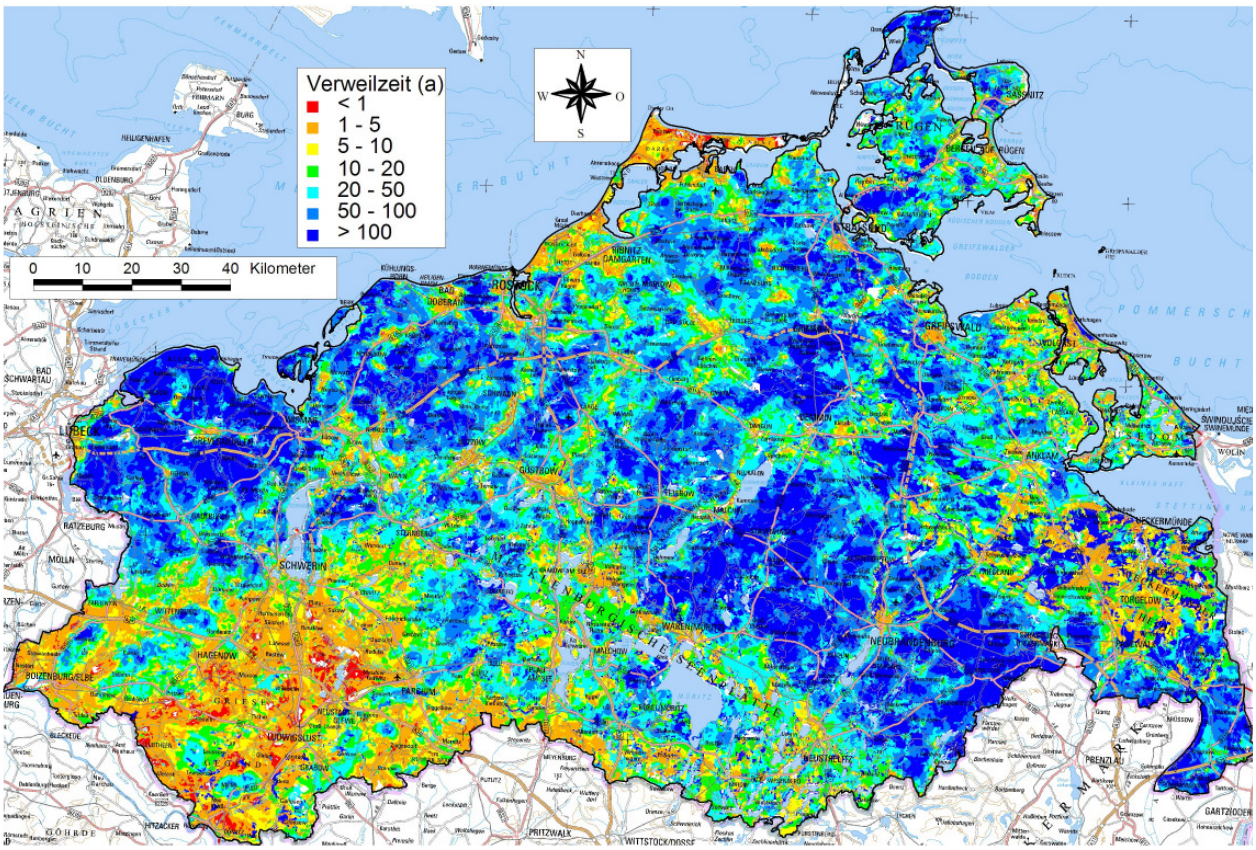


Abb. 6: Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdeckung

Die Karte zeigt sehr große Unterschiede der Verweilzeiten des Sickerwassers. In den Niederungen betragen sie oft nur wenige Jahre, manchmal auch nur wenige Wochen bis Monate. Hiervon betroffen ist z.B. der Südwesten des Landes mit überwiegend sandigen Substraten und entsprechend niedrigen Feldkapazitäten, hohen Neubildungsraten sowie geringen Flurabständen. In Entlastungsgebieten mit primär anmoorigen Auflagen hingegen können die Verweilzeiten trotz niedriger Flurabstände aufgrund der dort höheren Feldkapazitäten auch höher liegen, das betrifft z.B. die Ueckermünder Heide im Osten des Landes an der Grenze zu Polen, wo auch die Niederschläge und daher die Neubildungsraten des Grundwassers entsprechend gering sind.
Im deutlichen Gegensatz dazu stehen die sich von Nordwest nach Südost - entsprechend der Vereisungsvorstöße bzw. Endmoränenlagen - erstreckenden Hochflächengebiete mit zumeist lehmigen Substraten und hohen Flurabständen. Hier liegen die Verweilzeiten des Sickerwassers in großen Landesteilen bei bis zu 100 Jahren und mehr, z.B. südöstlich von Neubrandenburg im Südosten des Landes im Bereich der Feldberger Seenlandschaft an der Landesgrenze zu Brandenburg.

Literatur

DIN 19732 (1997): Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen.- Normenausschuss Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin.

HANNAPPEL, S. & H.-J. VOIGT (1999): Vulnerability maps as bricks for groundwater protection - experiences in East Germany. Proc. of the XXIX IAH Congress, 59-65, Bratislava.

HEINKELE, T., S. HANNAPPEL, C. JAHNKE, H.-J. VOIGT & E. DONAT (2001): Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern. Hrsg.: Umweltbundesamt, FB 29922278, 118 S., Berlin.

HGN (2008): Ergebnisbericht Ermittlung der Grundwasserneubildung Mecklenburg-Vorpommerns, Stand 2007. Gutachten der HGN Hydrogeologie GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Schwerin, 23.01.2008 (unveröff).

KA 5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. Auflage, 438 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

VOIGT, H.-J. (1987): Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik 1:50000, Nutzerrichtlinie Grundkarte, Karte der hydrogeologischen Kennwerte und Karte der Grundwassergefährdung. Hrsg.: Zentrales Geologisches Institut, 16 S., Berlin.

WENDLAND, F., H. BEHRENDT, U. HIRT, P. KREINS, U. KUHN, P. KUHR, R. KUNKEL & B. TETZLAFF (2010): Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen zur Reduktion der Stickstoffbelastung von Grundwasser und Oberflächengewässer in der Flussgebietseinheit Weser. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4, 54. Jg, 231-244, Koblenz.

Grundwasserneubildung als schnelle Antwortfunktion auf Starkniederschläge

Hartmut Wittenberg

Zusammenfassung

In praktischen und auch in wissenschaftlichen Studien und Verfahren wird die Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Analogie zum Gesetz von Darcy meist als sehr langsamer und quasi stationärer Durchsickerungsprozess unterstellt. In vielen Einzugsgebieten erreicht jedoch das nach stärkeren Regenfällen infiltrierende Wasser über Makroporen und präferenzielle Fließwege innerhalb von Stunden den obersten, ungespannten Grundwasserkörper und die Neubildungsphase nach einem Ereignis erstreckt sich über wenige Tage. Die steigenden Grundwasserstände erhöhen sehr schnell die Exfiltration und damit die Wasserführung der Flüsse, so dass auch der grundwasserbürtige Basisabfluss einen deutlichen Beitrag zum Hochwasserabfluss leistet.

Nach Separation des Basisabflusses von Zeitreihen täglicher Gesamtabflüsse an Pegelstationen mit dem nichtlinearen Speichermodell werden in dieser Untersuchung aus den Anstiegen der Grundwasserspeicherung die Grundwasserzugänge in ihrer zeitlichen Abfolge bestimmt. Aus diesen lassen sich nach dem Prinzip der Einheitsganglinie typische Antwortfunktionen auf Niederschläge ableiten.

In Fallstudien für Einzugsgebiete im Norddeutschen Tiefland werden die ermittelten Antwortfunktionen mit Sickerwasserganglinien in Lysimetern und Grundwasserständen, sowie mit den Ergebnissen internationaler Untersuchungen verglichen, die die schnelle Durchsickerung der Vadose Zone bestätigen. Die Erkenntnis, dass Grundwasserneubildung und Durchsickerung im Wesentlichen schnelle und hoch instationäre Vorgänge sind, hat Bedeutung für eine realistische Einschätzung der zeitlichen Variabilität und für die Modellierung des Wasser- und Stofftransports, z.B. von Düngemitteln und Pestiziden, in das Grundwasser.

1. Einleitung

Die meisten Flüsse der Erde werden überwiegend mit Grundwasser gespeist, das durch Ufer und Sohle in die Gewässerbetten eintritt. Dieser Vorgang prägt nicht nur das Abflussgeschehen bei Trockenwetter und unter Niedrigwasserbedingungen; auch Hochwasserereignisse enthalten neben Direktabfluss wesentliche Grundwasseranteile (BRONSTERT et al. 2005). In vielen Fällen beginnt schon wenige Stunden nach einem starken Regenereignis eine Zunahme des grundwasserbürtigen Basisabflusses, bei dem es sich jedoch nicht um „neues“ Wasser aus dem Ereignis handelt. Durch Makroporen und präferenzielle Fließwege der ungespannten Grundwasseroberfläche rasch zugesickertes Niederschlagswasser erhöht vielmehr die Druckhöhe des Aquifers, wodurch mehr „altes“ Wasser in das Gewässer „ausgepresst“ wird. Eine schnelle Durchsickerung der ungesättigten (Vadose) Zone wird in vielen Untersuchungen und praktischen Anwendungen nicht erwartet und beachtet, da von einer quasi Darcy’schen und damit sehr langsamen Bewegung des Wassers durch den Boden ausgegangen wird. Für die meisten Lysimeterstationen werden daher die Sickerwassermengen nur als Monatswerte ermittelt und verfügbar gemacht. Die zeitliche Auflösung der Grundwasserneubildung, ihre Geschwindigkeit und Instationarität werden dabei ignoriert. Sie

sind jedoch relevant für die Austauschprozesse zwischen Grund- und Oberflächenwasser, einschließlich des Transports von Stoffen in das Grundwasser. Der vorliegende Aufsatz gibt auch Aussagen einer früheren Arbeit des Verfassers (WITTENBERG 2006) wieder.

2. Ermittlung der Grundwasserneubildung aus dem Basisabfluss

Basisabfluss wird hier verstanden als der grundwasserbürtige Anteil des Gesamtabflusses in einem Gewässer. Er ist nicht identisch mit der ebenfalls Basisabfluss genannten langsamen Abflusskomponente (slow flow), die klassischerweise für den Zweck der Hochwasseranalyse und der Synthese von Ereignisganglinien (quick flow) abgetrennt wird (CHOW et al. 1988) und meist einen deutlich kleineren Anteil am Gesamtabfluss hat als der Grundwasserabfluss. Nach dem Abklingen des Direktabflusses beschreibt der Abflussrückgang das Auslaufen des oberflächennahen und mit dem Fluss verbundenen Grundwasserspeichers und erlaubt Rückschlüsse auf seine Eigenschaften. Durch die Identifizierung der typischen Rückgangsform wird eine Abtrennung des Basisabflusses vom Gesamtabfluss möglich. Diese erfolgt, praktischerweise durch ein Computerprogramm, entgegen der Zeitachse durch Anlegen von Rückgangskurvenabschnitten als untere Umhüllende an die Ganglinie des Gesamtabflusses (WITTENBERG 1997). Die einzelnen Rückgänge sind immer wieder durch Grundwasserneubildungsphasen unterbrochen, die typischerweise mit Niederschlagsereignissen und Direktabflussphasen einhergehen. Die sinnvolle Verbindung der Trockenwetterganglinien an diesen Stellen ergibt die kontinuierliche Ganglinie des Basisabflusses. Im deutschen Sprachraum stellte NATERMANN (1958) eine entsprechende graphische Methode zur Separation des Basisabflusses vor, um hieraus die Grundwasserneubildung zu bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Grundwasserneubildung als Zugang zum Grundwasserspeicher aufgrund der Volumenkontinuität über einen längeren Zeitabschnitt gleich dem Basisabflussvolumen ist. Die zeitliche Auflösung der Grundwasserneubildung, sowie andere Abgänge aus dem Grundwasser, z.B. durch Verdunstung, lassen sich hieraus nicht bestimmen. Die mathematische Formulierung des Abflussrückganges und die daraus abgeleiteten Beziehungen zwischen Basisabfluss und Speicherinhalt ermöglichen jedoch die automatische Abtrennung, sowie durch inverse Speicherrechnung die Bestimmung von Zeitreihen der Grundwasserneubildung. Abbildung 1 zeigt dieses am Beispiel des Pegels Bienenbüttel/Ilmenau (A_{Eo} = 1430 km^2) in der Lüneburger Heide. Darin sind die typischen Rückgänge des Basisabflusses mit *R* gekennzeichnet. Die Übergangsfunktionen *Ü* kennzeichnen den Anstieg des Basisabflusses während der Grundwasserneubildung *GWN*. Die Zusickerung zum Grundwasser ist sichtlich kein stetiger Vorgang. Sie erfolgt hauptsächlich in kurzen Phasen nach stärkeren Niederschlägen.

Für die folgend beschriebenen Untersuchungen wurde der Algorithmus des nichtlinearen Einzelspeichers angewandt, der davon ausgeht, dass die Umsatzräume der unterirdischen Abflussanteile eines Gebietes hydraulisch kommunizieren (WITTENBERG 1997). Die nichtlineare Speicher-Ausfluss-Beziehung ist hier:

$$S = a \cdot Q^b \qquad (1)$$

mit S in m^3 oder mm, Q m^3/s oder mm/d und a in m^{3-3b} bzw. $mm^{1-b}d^b$. Der Exponent b ist ohne Einheit. Aufgrund der Kontinuität ohne Zufluss $dS/dt = -Q$ ergibt sich die Formel für den Abflussrückgang des nichtlinearen Speichers, ausgehend von einem Anfangswert Q_0 zu:

$$Q_t = Q_0 \left(1 + \frac{(1-b) Q_0^{1-b}}{ab} t \right)^{\frac{1}{b-1}} \qquad (2)$$

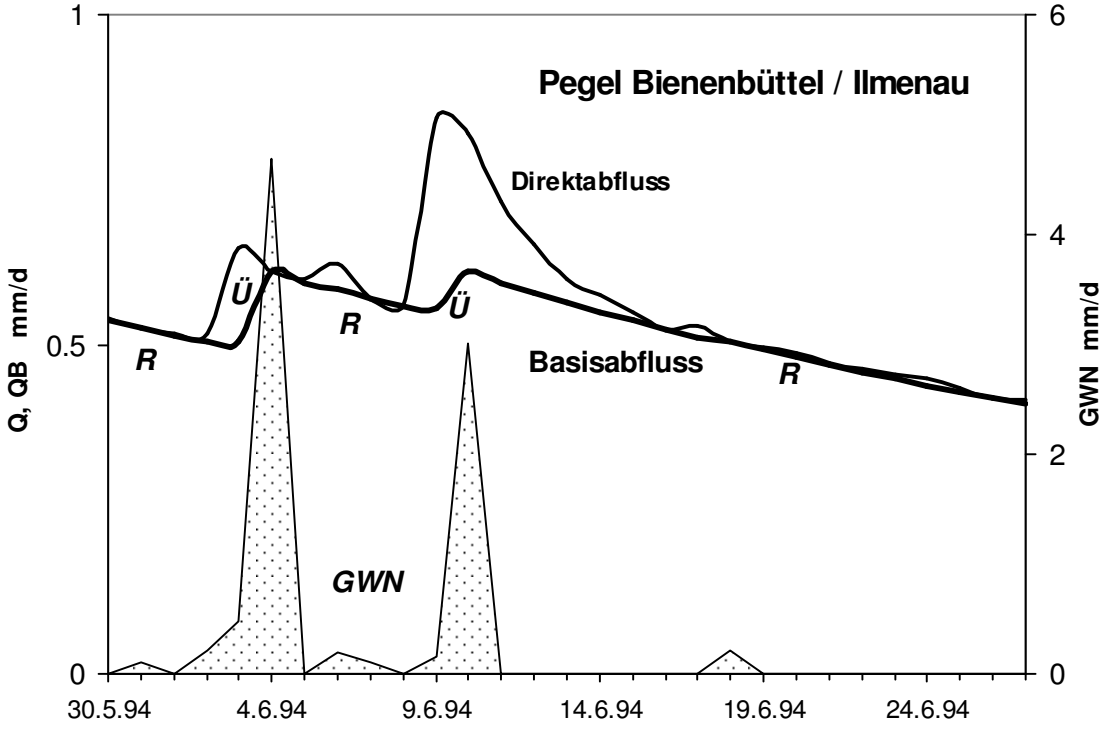


Abb. 1: Separation des Basisabflusses (*R* Rezession, *Ü* Übergang, Neubildungsphase, *GWN* Grundwasserneubildung, Perkolation)

Die für beobachtete Rückgangslinien täglicher Durchflüsse einer großen Anzahl von Pegeln in Deutschland und anderen Regionen WITTENBERG 1997, WITTENBERG & SIVAPALAN 1999) nach dem Kriterium der kleinsten Fehlerquadratsumme ermittelten Werte für den Exponenten b konzentrieren sich um einen Mittelwert von etwa 0.5 und weichen damit systematisch von der klassischen Annahme $b = 1$ des Linearspeichers ab. Ein Wert von 0.5 wird auch durch die theoretische Ableitung unter der Forchheimer-Dupuit-Bedingung für ungespannte Grundwasserspeicher bestätigt (SCHOELLER 1962), während der Faktor a auf Porenvolumenanteil, Durchlässigkeit und Ausdehnung des Aquifers, sowie auf weitere Abgänge aus dem Grundwasser zurückgeführt werden kann. Für die praktische Anwendung wird hier der Exponent auf $b = 0.5$ fixiert und der Koeffizient a aus den Daten Q der Rückgangslinien ermittelt. Dieser Koeffizient ist einer jahreszeitlicher Variation unterworfen, die nicht immer vernachlässigt werden darf. Insbesondere Verdunstung aus dem Grundwasserspeicher durch kapillaren Aufstieg und Transpiration führen im Sommer zu einem schnelleren Rückgang des Basisabflusses und damit zu kleineren Werten als im Winter. Durch saisonale Variation des Koeffizienten a bei der Berechnung der Rückgangslinien für die Separation des

Basisabflusses kann auch die Zeitreihe der Verdunstungsverluste *ET* ermittelt werden (WITTENBERG & SIVAPALAN 1999).
Die Separation des Basisabflusses erfolgt rückwärts gegen die Zeitrichtung gemäß Abbildung 1 durch Anlegen berechneter Rückgangslinien *R* als untere Umhüllende an die Ganglinie des Gesamtabflusses. Die zeitliche Umkehrung von Gleichung 2 zu diesem Zwecke hat die Form:

$$Q_{t-\Delta t} = \left(Q_t^{b\text{-}1} + \frac{\Delta t \,(b-1)}{ab} \right)^{\frac{1}{b\text{-}1}} \tag{3}$$

Der Übergang *Ü*, die Verbindung zwischen zwei Rückgangslinien, wird nach dem Prinzip eines digitalen Filters hergestellt. Der damit verbundene Anstieg zeigt eine Grundwasserneubildungsphase an.
Die Grundwasserneubildung *GWN* als Speicherzufluss ergibt sich in jedem Zeitintervall *i* als Summe der Veränderung des Speicherinhalts *S* und des abgeflossenen Basisabflussvolumens, sowie eventueller Verdunstungsabgänge *ET* zu:

$$GWN_i = S_i - S_{i-1} + \int_{ti-1}^{ti} Q \, dt + ET_i \tag{4}$$

Die Abtrennung des Basisabflusses und die daraus berechneten Grundwasserzugänge sind in Abbildung 1 dargestellt. Abbildung 2 zeigt ein weiteres Beispiel für das Versuchsgebiet Eisenbach in der Lüneburger Heide.

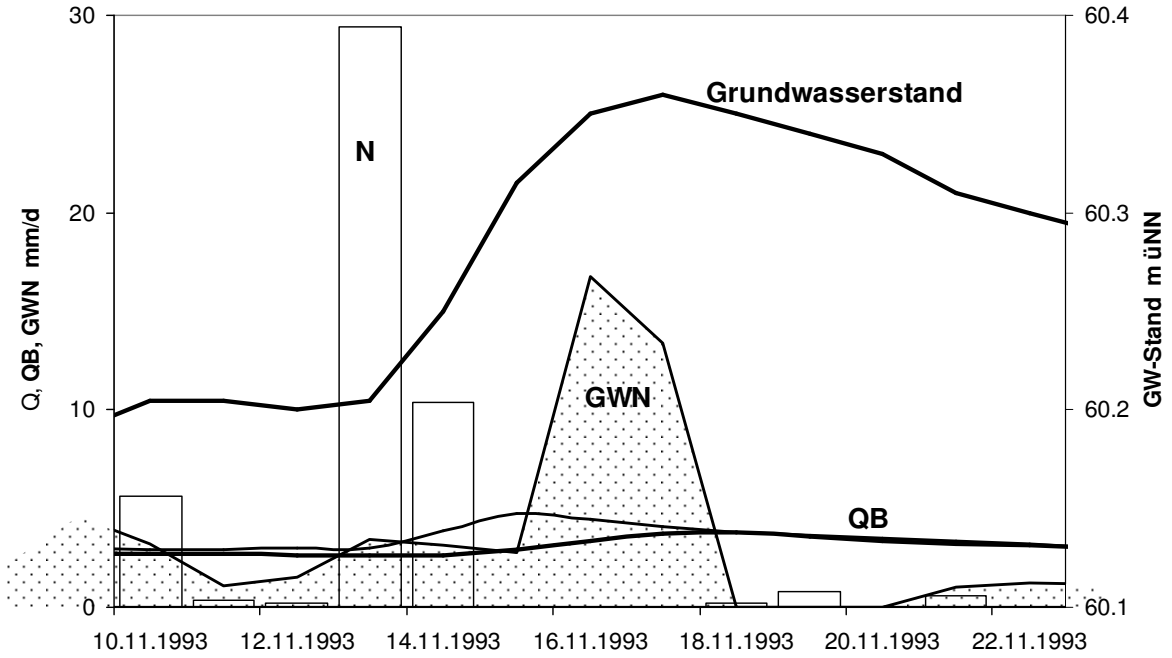


Abb. 2: Niederschlag N, Grundwasserneubildung (Perkolation) GWN und Basisabfluss QB, Pegel P10, Grundwasserstand, Nienwohlde, Eisenbach, A_{Eo} = 0.87 km^2

Die aus dem Basisabfluss berechnete Grundwasserneubildung folgt auf starke Niederschläge innerhalb weniger Tage. Der ebenfalls gemessene Grundwasserstand, der entsprechend ansteigt und danach durch Basisabfluss wieder abnimmt, bestätigt die Rechenergebnisse.
Das Bestimmtheitsmaß des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Werten der aus separiertem Basisabfluss nach Gleichung 1 berechneten Grundwasserspeicherung und den gemessenen Grundwasserständen für das Wasserwirtschaftsjahr 1994 ist $R^2 = 0.89$.

3. Vergleich mit Lysimeterdaten

Die Stationsdichte von Lysimetern ist gering und meist erfolgt nur die Auswertung in Monatswerten. Die mit 14-Tageswerten abgeglichenen, berechneten täglichen Sickerwasserraten für die Lysimeterstation Hohenzethen im Landkreis Uelzen (SCHÄFER & FIER 2009) zeigen aber eine schnelle Durchsickerung innerhalb weniger Tage an.

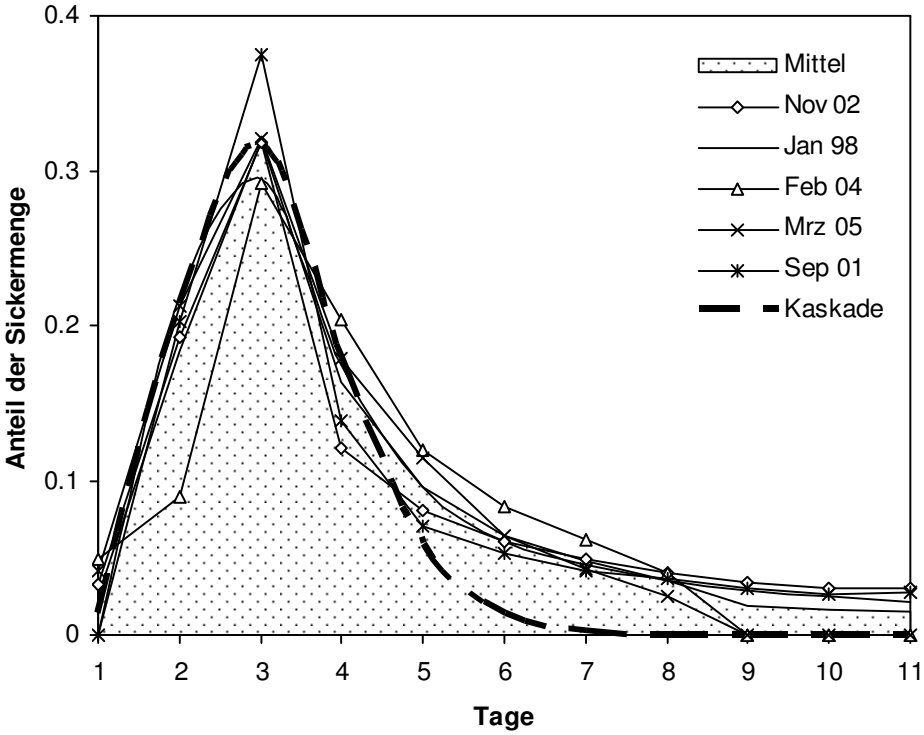


Abb. 3: Ganglinien täglicher Sickerwassermengen (normiert) mit kalibrierter Funktion der linearen Speicherkaskade, Lysimeterstation Groß Lüsewitz; Daten: Institut für Umweltingenieurwesen, Universität Rostock, (WITTENBERG 2006)

Tageswerte der Durchsickerung waren für die Lysimeterstation Groß Lüsewitz der Universität Rostock erhältlich. Die Bodenverhältnisse, lehmiger Sand, sind mit den Verhältnissen in der Lüneburger Heide vergleichbar. Abbildung 3 zeigt normierte (Summe =1) Durchsickerungsganglinien nach kurzen Starkregen zu verschiedenen Jahreszeiten. Auch hier wird das Maximum der Perkolation am zweiten Tag nach Regenbeginn erreicht und die in der Größe jahreszeitlich schwankende Grundwasserneubildung endet im Wesentlichen jeweils nach wenigen Tagen (vergl. Abbildungen 1 und 2). Allerdings ist ein längerer Auslauf, zum Teil auch durch nachfolgende Regen verstärkt, zu beobachten. Dieser Nachhang ist für die Transportvorgänge durch die Vadose Zone jedoch von geringer Bedeutung. Die nach der

Momentenmethode angepasste und eingezeichnete Funktion einer linearen Speicherkaskade kann als typische Übertragungsfunktion gelten (BESBES & DE MARSILY 1984).

4. Systemantwort der Zusickerung auf Niederschlag

Offenbar haben die Antwortfunktionen des Grundwasserzugangs auf ein Niederschlagsereignis für ein Einzugsgebiet immer eine ähnliche, zeitinvariante Form. BESBES & DE MARSILY (1984) und WU et al. (1997) leiteten aus Bodenkennwerten, sowie Brunnen- und Lysimeterdaten Einheitsantwortfunktionen, definiert als die Verteilungsfunktion der Durchsickerungszeit in d^{-1} aufgrund eines effektiven versickernden Niederschlages von 1 mm Höhe im Sinne von Einheitsganglinien ab. Die Grundwasserneubildung *GWN* aus infiltrierendem Regen *I(t)* kann folglich durch Faltung mit der Antwortfunktion *h* beschrieben werden:

$$GWN_i = \sum_{k=1}^{i} \left(I_{i-k+1} \cdot h_k \right) \Delta t \qquad (5)$$

Umgekehrt können aus gegebenen Tagesniederschlägen *I* und Grundwasserneubildungsraten *GWN* Systemantworten *h* bestimmt werden. Gleichung 5 stellt dann hinsichtlich der Terms *h* ein überbestimmtes Gleichungssystem dar, das nach dem Gaußschen Kriterium der kleinsten Fehlerquadratsumme aufgelöst wird.

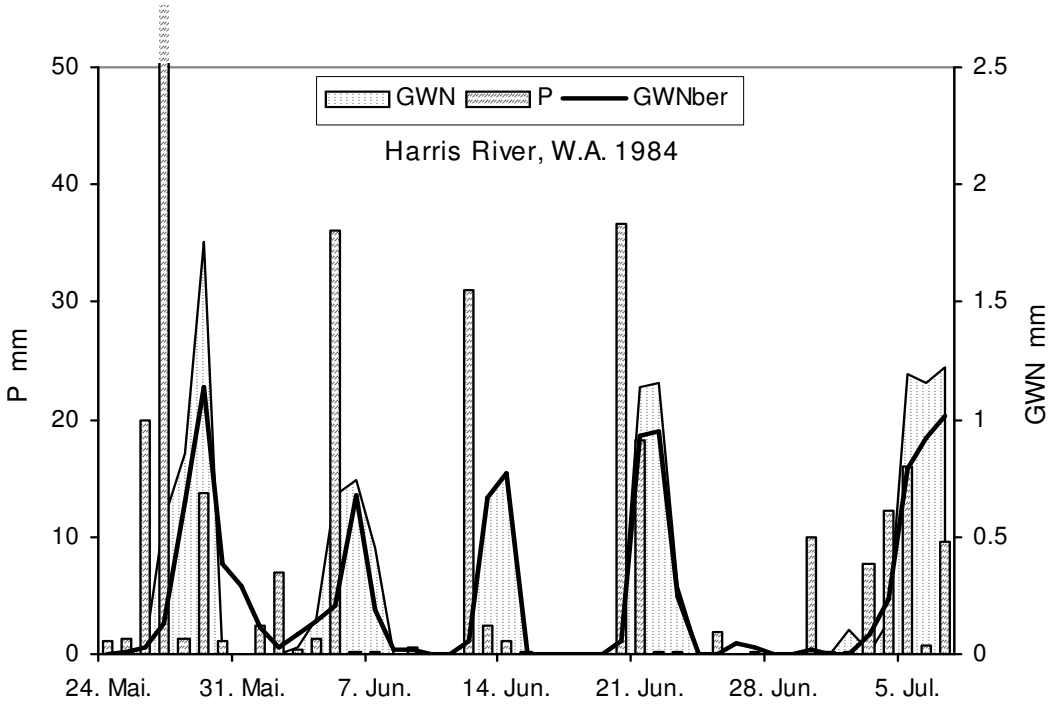


Abb. 4: Grundwasserneubildung *GWN* (Flächen, aus Basisabfluss) und *GWNber* (Linien, berechnet aus Niederschlägen *P*, Harris River, Tallanalla Rd., Westaustralien

Berechnungen für Ereignisse in verschiedenen Monaten des Jahres 1984 für den Harris River in Westaustralien (WITTENBERG & SIVAPALAN 1999) ergaben, dass die Durchsickerungszeitverteilung praktisch jahreszeitlich invariant ist. Auch hier wird der Scheitelabfluss bereits am zweiten Tag nach Regenbeginn erreicht; die Perkolation endet nach fünf bis sechs Tagen. Das Neubildungs-Regen-Verhältnis *a* weist eine starke jahreszeitliche Variation auf. Die in Abbildung 4 gezeigte berechnete Ganglinie der Grundwasserneubildung

GWNber ergab sich durch Faltung der Antwortfunktion für den Monat Juni mit den gemessenen Niederschlägen. Die aus dem Basisabfluss bestimmten Grundwasserneubildungen GWN sind als gepunktete Flächen dargestellt. Es zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Grundwasserbeobachtungen im benachbarten Versuchseinzugsgebiet des Salmon Brook (JOHNSTON 1987) bestätigten die schnelle Zusickerungsfunktion. Das Sickerwasser erreicht dort innerhalb von 12-14 Stunden die Grundwasseroberfläche und endet nach weiteren vier Tagen.

5. Folgerung

Die Durchsickerung der ungesättigten Zone infolge eines Niederschlagsereignisses und die entsprechende Grundwasserneubildung ist typischerweise kein langsamer Prozess, sondern findet durch präferentielle Fließwege im Wesentlichen innerhalb weniger Tage statt. Entsprechende Antwortfunktionen lassen sich für Einzugsgebiete aus Zeitreihen separierter Basisabflüsse und örtlich aus Lysimetermessungen ableiten. Die Bewegung der Grundwasserstände bestätigt diese Ergebnisse. Der schnelle, ereignisbezogene und damit instationäre Ablauf der Grundwasserneubildung muss bei der Analyse und Modellierung des Wasser- und Stofftransports in Einzugsgebieten beachtet werden.

Literatur

BESBES, M. & G. DE MARSILY (1984): From infiltration to recharge: Use of a parametric transfer function. J. Hydrol., 74, S. 271-293

BRONSTERT, A. et al. (2005): Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 13.05.

BRONSTERT, A. & E. PLATE (1997): Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. J. Hydrol., 198, S.177-195

CHOW et al. (1988): Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, S. 135

JOHNSTON, C.D. (1987): Preferred water flow and localised recharge in a variable regolith. J. Hydrol., 94, S. 129-142

NATERMANN, E. (1958): Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem AU-Linien-Verfahren. Düsseldorf: MfELF

SCHÄFER, W. & FIER, A. (2009): Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentration und der Nitratfrachten am Standort Hohenzethen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover

SCHOELLER, H. (1962): Les eaux souterraines. Masson Éditeurs, Paris

WITTENBERG, H. (1997): Der nichtlineare Speicher als Alternative zur Beschreibung von Basisabfluss, Grundwasserspeicherung und Trockenwetterganglinie. Wasserwirtschaft, 12, S. 570-574

WITTENBERG, H. & M. SIVAPALAN (1999): Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. Journal of Hydrology, 219/1-2, S. 20-33

WITTENBERG, H. (2006): Die Zusickerung zum Grundwasser als Systemantwort auf Tagesniederschläge. Dresdner Schriften zur Hydrologie, Heft 4, S. 393-401

WU, J. et al. (1997): Estimating infiltration recharge using a response function model. J. Hydrol., 198, S. 124-139

Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nach-haltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland (ELaN)

Jörg Steidl, Gunnar Lischeid, Uta Steinhardt, Martina Schäfer, Timothy Moss, Benjamin Nölting

Innerhalb Deutschlands stellt der Nordosten die trockenste Region dar. In den letzten Jahrzehnten wurden hier verbreitet absinkende Grundwasserspiegel beobachtet. Im Zuge des Klimawandels wird diese Entwicklung sich vermutlich weiter verschärfen. Gleichzeitig sind in dieser Region steile Gradienten der Urbanität und der entsprechenden Wasser- und Stoffströme zu beobachten von der größten Stadt Deutschlands, Berlin, bis zu einem der am dünnsten besiedelten Landkreise Deutschlands, der Uckermark, ca. 100 km weiter nordöstlich. Politik, Behörden und Wissenschaft stehen vor der Aufgabe, für diese Landschaften integrierte Konzepte zu entwickeln, die eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Wertschöpfung bei knappen Wasserressourcen erlauben.

Zu diesem Zweck wurde vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung innerhalb des Förderprogramms FONA (Forschung für Nachhaltige Entwicklungen) das Verbundvorhaben ELaN (Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland) bewilligt. Damit sollen einerseits Beiträge zu einer Nachnutzung von Klärwässern zur Bewässerung, zur Ausnutzung der darin enthaltenen Nährstoffe und zum mikrobiologischen Abbau von organischen Schadstoffen im Boden sowie zur Wertschöpfung durch Biomasseanbau auf wiedervernässten oder langjährig kontaminierten Standorten geliefert werden. Andererseits müssen solche Änderungen der Landnutzung und der Aufbau alternativer Wertschöpfungsketten mit alternativen Betreiber- und Finanzmodellen von entsprechenden sozioökonomischen Begleitmaßnahmen bis hin zu angepassten institutionellen Arrangements begleitet werden. Schließlich werden diese Aktivitäten in ein inter- und transdisziplinäres Forschungsdesign mit entsprechenden Methoden der Wissensintegration eingebettet, um die Umsetzung der Ergebnisse zu sichern und die Verwertung inner- und außerhalb der Region zu stärken.

Der bordvolle Abfluss natürlicher Flüsse im Ursachen- und Wirkungszusammenhang mit der bordvollen Gewässergeometrie - Gewässermorphologische und ingenieurpraktische Aspekte

Gerhard Klasz, Walter Reckendorfer, Dieter Gutknecht

Zusammenfassung:
Unter den Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie und der Revitalisierung hart regulierter Flüsse wird eine quantifizierende Gewässermorphologie zunehmend wichtiger und zum Gegenstand der ingenieurpraktischen und gewässerökologischen Arbeit. Zentrale Fragen, etwa nach der Breite und dem Gefälle natürlicher Flüsse, oder nach den geometrischen Parametern mesoskalarer Strukturen (Mäander, Kiesbänke), führen zum Durchfluss als primärer Steuergröße, und zwar in erster Linie zum bordvollen Durchfluss Q_{bf}. Solche Beziehungen bilden den Kern der ‚Downstream Hydraulic Geometry', die im Sinn eines Top-Down-Ansatzes angewandt werden kann. Empirische Untersuchungen zeigen, dass der bordvolle Durchfluss natürlicher Flüsse meist zwischen dem HQ_1 und HQ_2 liegt, und meist knapp beim bettbildenden Durchfluss Q_{ef}. Dies wird mit recherchierten Datensätzen (aus der Fachliteratur) überprüft. Grundlegende theoretische Zusammenhänge sind noch ungeklärt und Gegenstand der Forschung. Wenn etwa der bordvolle Durchfluss, wie es die Hydraulic-Geometry-Beziehungen aussagen, die bordvolle Geometrie und das Gefälle bestimmen, und umgekehrt aus hydraulischer Sicht (Fließgesetz und Kontinuitätsbedingung) die bordvolle Geometrie und das Gefälle den bordvollen Abfluss bedingen, dann liegt eine zirkuläre bzw. rekursive Wechselbeziehung vor, die mutmaßlich nur systemtheoretisch zu verstehen ist.

1. Einleitung, ‚Downstream Hydraulic Geometry'

Eine zentrale Frage der Hydromorphologie betrifft die Breiten, Tiefen und Gefällewerte natürlicher Flüsse. Wodurch werden diese Größen bestimmt? Kann man diese Parameter mit einfachen Mitteln bzw. analytisch abschätzen? Kann man auf dieser Basis morphologische Ähnlichkeiten zwischen Flüssen quantifizieren? Diese Fragen wurden bereits in einer grundlegenden Arbeit von LEOPOLD & MADDOCK (1953) untersucht, mit dem Ergebnis, dass die Breiten B, die mittleren Fließtiefen H und die mittleren Fließgeschwindigkeiten U von Flüssen, wenn man sie im doppellogarithmischen Maßstab gegen ihren mittleren Durchfluss aufträgt, annähernd gerade verlaufende Punkthaufen mit relativ geringer Streuung bilden; d.h. sie können als Potenzfunktionen des Durchflusses Q dargestellt werden, vgl. Gl. (1.a-c). Ähnlich kann man für andere Variable vorgehen, etwa für das Gerinnegefälle S (slope); der Gefälleexponent ζ ist negativ, größere Flüsse sind im Allgemeinen flacher als kleinere.

$$B = c_B \cdot Q^{\beta} \quad \wedge \quad H = c_H \cdot Q^{\eta} \quad \wedge \quad U = c_M \cdot Q^{\mu} \tag{1.a-c}$$

$$S = c_S \cdot Q^{\zeta} \tag{1.d}$$

Diese Zusammenhänge werden unter den Begriff der ‚Downstream Hydraulic Geometry' (im Folgenden: „DHG") zusammengefasst. „Downstream" deshalb, weil sie die Änderung der Variablen im Längsverlauf des Flusses bei einem gegebenen hydrologischen Zustand (z.B. dem mittleren Abfluss) beschreiben. In späteren Arbeiten (z.B. LEOPOLD & WOLMAN 1957;

ANDREWS 1984; PARKER et al. 2007) nahm man dafür den bordvollen Durchfluss Q_{bf} (bankfull discharge) und die zugehörigen (abhängigen) Größen B_{bf}, H_{bf}, U_{bf}.
Diese Methodik kann man auf einzelne Flüsse anwenden, oder auf Daten einzelner Regionen (im Sinn einer Regionalisierung), oder überregional bis hin zu weltweiten Flussdaten; Letzteres, wohl um den Preis größerer Streuungen, auf der Suche nach universellen Gesetzmäßigkeiten (Parker et al., 2007). Das wird in Abbildung 1 gezeigt, wo die Größen aus N=211 nordamerikanischen Flussabschnitten aufgetragen sind. Diese Daten (im Folgenden: {Q.1}) stammen aus 8 Studien (McCANDLESS & EVERETT 2002; McCANDLESS 2003a; McCANDLESS 2003b; CINOTTO 2003; SHERWOOD & HUITGER 2005; CHAPLIN 2005; MULVIHILL et al. 2009; WESTERGARD et al. 2005) und ausschließlich von unverzweigten Kies- und Sandflüssen mit mehr oder weniger ausgeprägten Vorländern und natürlicher bzw. naturnaher Morphologie. Weitere Kriterien für die Datenauswahl war die Verfügbarkeit aller Schlüsselparameter (Q_{bf}, D_{50}, B_{bf}, H_{bf}, S; Einzugsgebietsgröße A_D; Jährlichkeit des bordvollen Abflusses $T_n(Q_{bf})$).

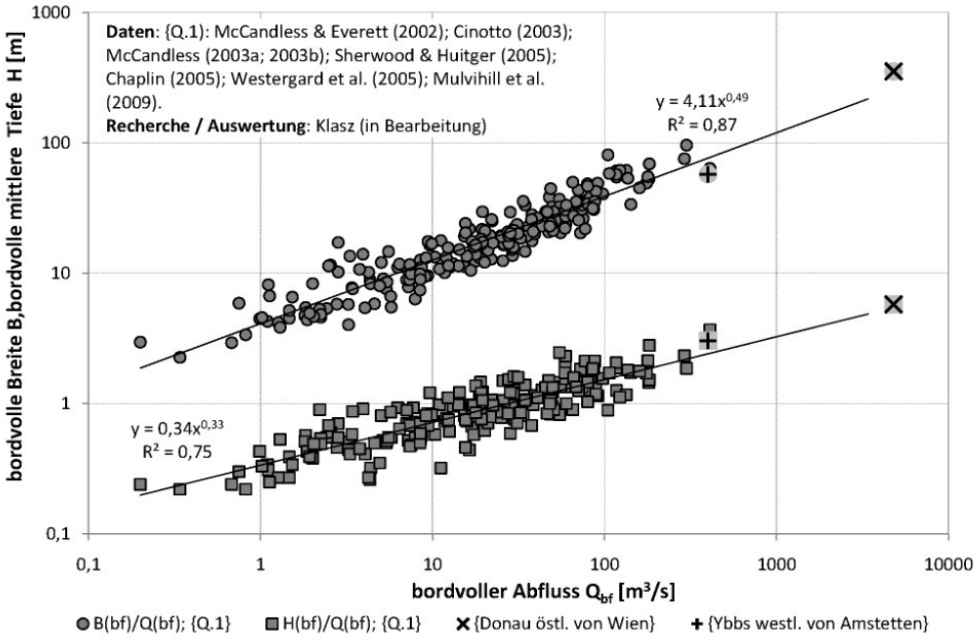


Abb. 1: DHG-Beziehungen, Datensatz {Q.1}, zusätzlich Donau (östlich von Wien) und Ybbs (westlich von Amstetten

Die meisten empirischen Auswertungen zeigen $\beta \approx 0{,}50$, also $B \propto \sqrt{Q}$ (LEOPOLD & MADDOCK 1953; CAO & KNIGHT 1996; KNIGHTON 1998). Der Tiefen-Exponent wird empirisch häufig mit $\eta \approx 1/3$ identifiziert, also $H \propto \sqrt[3]{Q}$ (CAO & KNIGHT 1996; KNIGHTON 1998). Diese Übereinstimmungen lassen vermuten, dass hier tiefere theoretische Zusammenhänge sichtbar werden. Auch in der Auswertung für Datensatz {Q.1} werden diese Exponenten mit geringen Abweichungen gefunden: β=0,49 (Bestimmtheitsmaß R^2=0,87) und η=0,33 (R^2=0,75), vgl. Abbildung 1. Dagegen werden die Koeffizienten (c_B, c_H usw.) als stärker von den jeweiligen Randbedingungen beeinflusste Größen aufgefasst; im Vergleich zwischen den Regio-

nen variieren sie stärker. Eine umfassende theoretische Begründung der DHG-Beziehungen ist aber noch immer nicht gelungen bzw. Thema der aktuellen Forschung, vgl. z.B. CAO & KNIGHT (1996), KNIGHTON (1998) und PARKER et al. (2007).

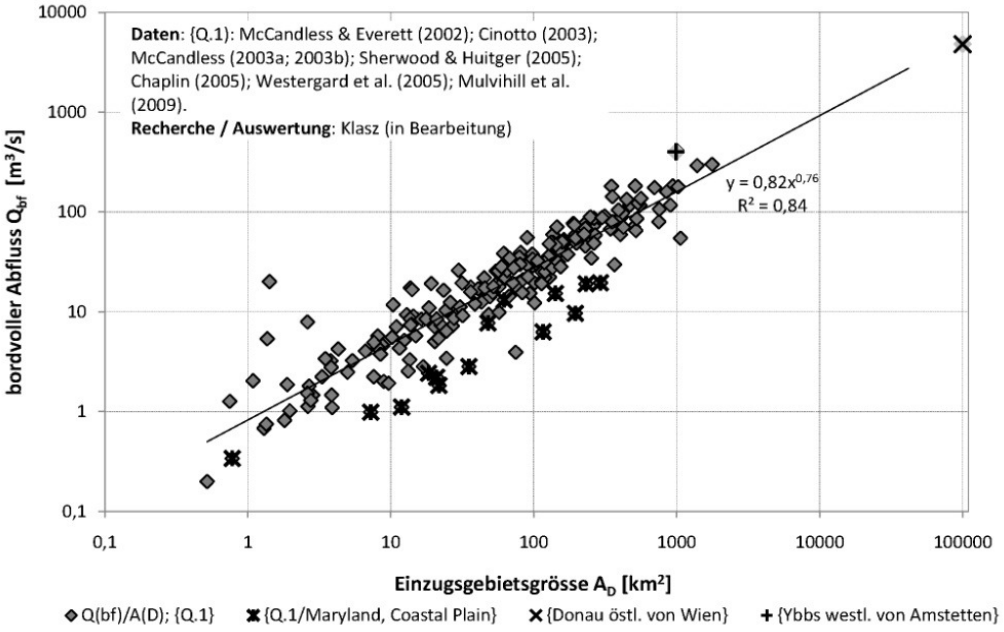


Abb. 2: Bordvolle Abflüsse gegen Einzugsgebietsgrößen, Datensatz {Q.1} zusätzlich Donau (östlich von Wien) und Ybbs (westlich von Amstetten)

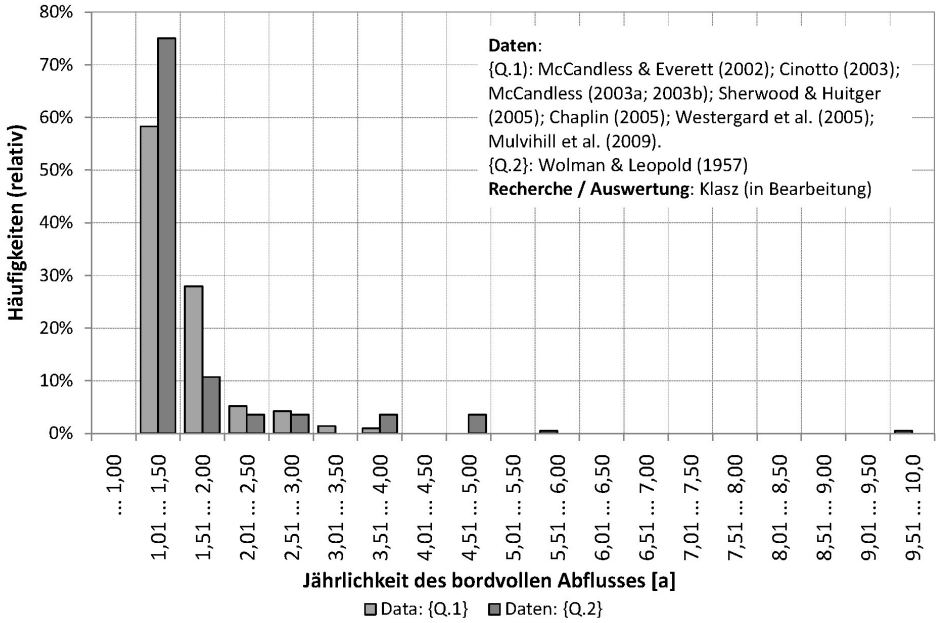


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Jährlichkeiten der bordvollen Abflüsse; Datensätze: {Q.1} und {Q.2}.

Im Übrigen zeigen verschiedene Arbeiten Zusammenhänge zwischen mesoskalaren Strukturen und dem bordvollen Abfluss, etwa für geometrische Parameter von Mäandern (im Be-

sonderen der mittleren Wellenlänge λ) oder die Abstände alternierender Kiesbänke Λ_a bzw. die durchschnittlichen Furtabstände (riffle-pool-sequence), und zwar in der Form:

$$L_{char} = c_L \cdot B^{\theta} = c_L' \cdot Q_{bf}^{\theta \cdot \beta} \quad (2)$$

mit θ ≈ 1, vgl. u.a. LEOPOLD & WOLMAN (1957) und KNIGHTON (1998). YALIN (1992) beschreibt und begründet mit turbulenztheoretischen Überlegungen eine charakteristische Länge für den mittleren Abstand alternierender Bänke in geradlinigen Flüssen $\Lambda_a \approx 6B$ und verbindet das ebenfalls mit $B \propto \sqrt{Q}$. In verzweigten Flüssen (braided rivers) scheinen charakteristische Abstände zwischen dem Zusammenfluss und der erneuten Verzweigung (confluence-bifurcation-length) ebenfalls mit der Gerinnebreite und somit mit dem (bordvollen) Abfluss verknüpft zu sein (HUNDEY & ASHMORE 2009).

2. Zur Definition des bordvollen Durchflusses und seine hydrologische Zuordnung

Der bordvolle Durchfluss Q_{bf} ist der maximale Durchfluss, den ein Gerinne gerade noch ohne Überflutung seiner Vorländer abführen kann (COPELAND et al. 2000). Dieser Zustand hat für die Morphologie besondere Bedeutung, weil er den Übergang zwischen den gerinneformenden und den vorlandformenden Prozessen markiert (this discharge is considered to have morphological significance because it represents the breakpoint between the processes of channel formation and floodplain formation, COPELAND et al. 2000). Der Begriff setzt also klar definierte Vorländer voraus, Flüsse ohne solche Vorländer werden hier nicht behandelt. In dieser Arbeit werden die Bezeichnungen „bordvoller Abfluss“ und „bordvoller Durchfluss“ nebeneinander verwendet, ersteres bezieht sich auf den hydrologischen Kontext (Abfluss aus Einzugsgebieten), der zweite Begriff auf den hydraulischen Aspekt (Durchfluss durch einen Querschnitt bzw. Flussabschnitt).

Methodische und praktische Schwierigkeiten bezüglich der Bestimmung des bordvollen Durchflusses werden u.a. in KNIGHTON (1998) und COPELAND et al. (2000) diskutiert; beispielsweise sollte sich die Strecke morphologisch im Gleichgewicht befinden, (stärkere) Eintiefungen oder Auflandungen können zu Fehleinschätzungen führen.

Verschiedene Beiträge (WOLMAN & LEOPOLD 1957; COPELAND et al. 2000; EMMETT & WOLMAN 2001; POWELL et al. 2006) zeigen, dass die bordvollen Abflüsse meist knapp über dem HQ_1 liegen, und selten über dem HQ_2. LEOPOLD (1994) zeigt für seine Daten (Flüsse aus vier Regionen in den Vereinigten Staaten): $Q_{bf} \approx HQ_{1,5}$. Diese Beobachtungen wurden für den Datensatz {Q.1/ 211 nordamerik. Flussabschnitte} überprüft und bestätigt, vgl. Abbildung 3. Zum Vergleich wird die Häufigkeitsverteilung der Jährlichkeiten der bordvollen Abflüsse aus WOLMAN & LEOPOLD (1957) gezeigt; von den 35 dort aufgelisteten Flussabschnitten wurden 7 nicht übernommen, weil bei ihnen kein klares Vorland vorlag, die 28 übrigen Abschnitte (Datensatz: {Q.2}) haben eine ähnliche Häufigkeitsverteilung wie jene für Datensatz {Q.1}.

Dazu kommt als hydrologischer Aspekt, dass Q_{bf} als Funktion der Einzugsgebietsgröße A_D und der Region aufgefasst werden kann, vgl. Abbildung 2, es werden dafür Potenzfunktionen gem. Gl. (3) angegeben (vgl. u.a. KNIGHTON 1998; McCANDLESS & EVERETT 2002; CHINOTTO 2003; CHAPLIN 2005; MULVIHILL et al. 2009):

$$Q_{bf} = c_Q \cdot A_D^{\delta} \quad (3)$$

Man kann die Streuung in diesen Beziehungen reduzieren, wenn man sie nur für jeweils einzelne geologisch/hydrologisch definierte Regionen auswertet. Beispielsweise wird der untere Bereich der Punktwolke in Abbildung 2 hauptsächlich durch Flüsse der Region Maryland/Coastal Plain (McCANDLESS 2003b) gebildet, wo es sich zumeist - und abweichend von den anderen Regionen - um Sandflüsse handelt. Innerhalb der einzelnen Regionen werden für die Q_{bf}/A_D-Beziehungen (log/log) meist R^2-Werte über 0,90 gefunden. Die Exponenten δ liegen für die einzelnen Regionen zumeist im Bereich zwischen 0,6 und 0,95 (vgl. u.a. McCANDLESS & EVERETT 2002; McCANDLESS 2003a; McCANDLESS 2003b; CHINOTTO 2003; CHAPLIN 2005; SHERWOOD & HUITGER 2005; MULVIHILL et al. 2009).

3. Zum bettbildenden Durchfluss (‚effective discharge')

Häufig wird der bettbildende Durchfluss Q_{ef} mit dem bordvollen Durchfluss in Beziehung gesetzt (KNIGHTON 1998; COPELAND et al. 2000; EMMETT & WOLMAN 2001). Mit dem Parameter Q_{ef} kommt der Geschiebetransport (allgemeiner: der Feststofftransport) ins Spiel: niedere bis mittlere Durchflüsse sind zwar häufig, haben aber geringe Transportraten; umgekehrt wird bei Hochwasser viel Geschiebe (bzw. Feststoff) transportiert, das aber (sehr) selten. Bildet man das Produkt aus Q-Häufigkeit und Transportrate (als Funktion des Durchflusses), dann findet man ein Maximum, dies ist der bettbildende Durchfluss (SCHOKLITSCH 1930; WOLMAN & MILLER 1960).

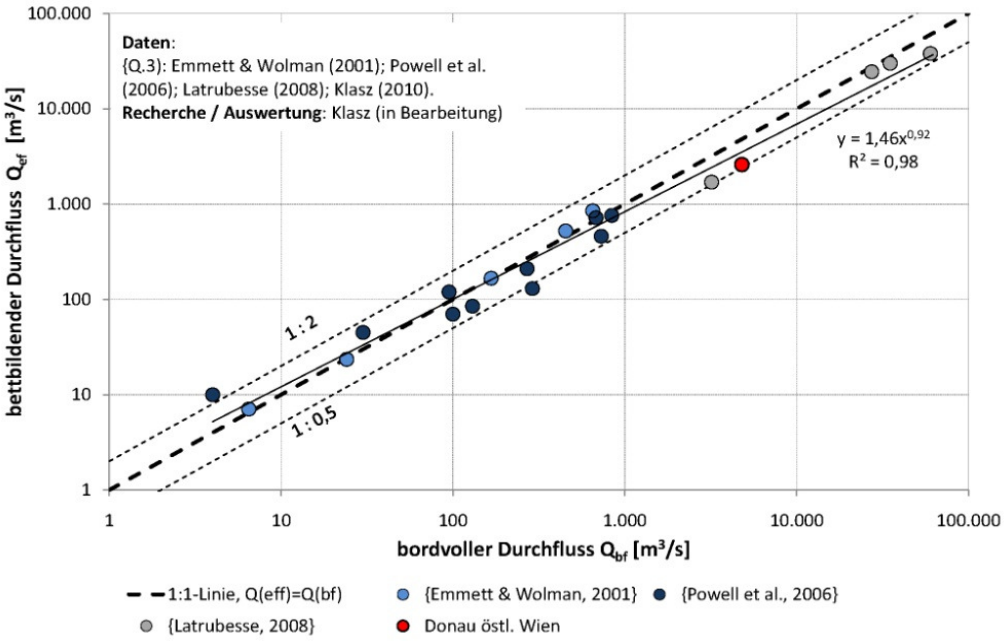


Abb. 4: Bettbildende Durchflüsse gegen bordvolle Durchflüsse, Datensatz {Q.3}; und: Donau östlich von Wien

Vielfach wird beschrieben, dass bordvolle und bettbildende Durchflüsse zumeist knapp beieinander liegen (WOLMAN & MILLER, 1960; EMMETT & WOLMAN, 2001) oder gleichgesetzt werden können. Untersuchungen mit Angabe sowohl der Q_{bf} als auch der Q_{ef} für natürliche Flüsse sind selten; in Abbildung 4 werden Q_{ef}/Q_{bf}-Werte für 5 Abschnitte (generell Kiesflüsse) aus EMMETT & WOLMAN (2001), für 10 Abschnitte (Flüsse in Ohio) aus POWELL et

al. (2006), für 4 große Flüsse (Mississippi stromab von Vicksburg; Brahmaputra bei Bahadurabad; Parana bei Corrientes; Araguaia bei Aruaná) aus LATRUBESSE (2008) und für die Donau östlich von Wien (eigene Auswertung) dargestellt (Datensatz: {Q.3}). Dabei zeigt sich tatsächlich: $Q_{bf} \approx Q_{ef}$, und damit stünde (oder steht) der bordvolle Durchfluss in einem zusätzlichen Begründungszusammenhang. Allerdings ist der Stichprobenumfang mit N=20 gering. Daneben gibt es auch methodische und praktische Schwierigkeiten; beispielsweise erhält man für Q_{ef} verschiedene Werte, je nachdem, ob man der Ermittlung eine Geschiebetransportfunktion oder eine Gesamtfeststofftransportfunktion (mit Schwebstofftransport) zugrunde legt (vgl. u.a. KNIGHTON 1998). Bei Kiesflüssen wird man zumeist vom Geschiebetransport ausgehen, bei Sandflüssen spricht vieles für die Gesamttransportfunktion. Zweitens ist relevant, ob die Transportfunktion durch Messungen (Geschiebe- bzw. Schwebstoff) bestimmt wird, oder durch Rechnung. Auf Basis sorgfältiger Messungen über einem möglichst weiten Q-Bereich bekommt Q_{ef} einen stark empirischen Gehalt, wird aber die Transportfunktion rein rechnerisch bestimmt, dann bleibt Q_{ef} hingegen theoriebehaftet.

4. Zur ingenieurpraktischen und gewässerökologischen Relevanz

Kennzeichen des ökologischen Flussbaues ist die Entfernung baulicher Zwänge, wo immer dies unter den jeweiligen Schutz- und Nutzungsansprüchen möglich ist, und die Wiederherstellung morphologischer Freiheitsgrade (river restoration projects). Damit wird die Prognose der gleichgewichtsnahen (bordvollen) Breiten, Fließtiefen und Gefällewerte zunehmend zur ingenieurpraktischen Herausforderung. Die DHG-Relationen liefern dafür wertvolle Vergleichswerte, und sie erlauben den Vergleich konkreter und ggf. durch menschliche Eingriffe stark veränderter Flussabschnitte mit natürlichen Flüssen und damit die Beantwortung der Frage, ob ein Flussabschnitt vergleichsweise breit oder schmal, seicht oder tief, flach oder steil geneigt ist.

Beispielsweise zeigt sich die Donau östlich von Wien ($Q_{bf} \approx 4800$ m^3/s; $B_{bf} \approx 353$ m; $H_{bf} \approx 5{,}76$ m; $D_{50} \approx 22{,}5$ mm; $S \approx 0{,}41$ m/km; Daten aus: KLASZ 2010) trotz aller regulierungsbedingten Änderungen ziemlich ähnlich zu den natürlichen Flüssen (vgl. Abbildung 1); bemerkenswert ist aber, dass ihr bettbildender Durchfluss (mit $Q_{ef} \approx 2600$ m^3/s) deutlich unter den Q_{bf} liegt (vgl. Abbildung 4), und auch unter dem $HQ_{1,5}$ (ca. 5600 m^3/s). Als zweites Beispiel sei die Ybbs knapp westlich von Amstetten (Hausmening) genannt; der Fluss ist dort (mit $Q_{bf} \approx 400$ m^3/s; $B_{bf} \approx 57{,}4$ m; $H_{bf} \approx 3{,}03$ m; $D_{50} \approx 28{,}5$ mm; $S \approx 1{,}44$ m/km; eigene Auswertung) in einem wasserbaulich nur wenig veränderten Teilabschnitt vergleichsweise schmal und tief; das könnte damit zusammenhängen, dass sich die Ybbs dort in eine teilweise bereits stärker konglomeratisch verfestigte Schotterterrasse eingegraben hat, wodurch die Uferfestigkeit (bank strength) höher ist als bei den meisten anderen Kiesflüssen.

Bei solchen Auswertungen sind Flussabschnitte aus der gleichen hydrologischen Region besonders relevant (Regionalisierung). Diese Methode erlaubt im Besonderen auch die Übertragung von dynamisch stabilen Musterstrecken (gleicher Fluss oder zumindest gleiche Region) auf Flussabschnitte mit anderen Durchflüssen.

Bordvolle Durchflüsse Q_{bf}, bettbildende Durchflüsse Q_{ef} und Durchflüsse Q_{ri} im Bereich ein- bis zweijährlicher HQ-Abflüsse liegen bei natürlichen und dynamisch stabilen Flüssen häufig eng beinander: $Q_{bf} \approx Q_{ef} \approx HQ_{1,5}$; dieser Q-Bereich ist morphologisch besonders relevant.

Vielfach werden diese Annäherungen unter dem Begriff eines ‚repräsentativen Durchflusses' Q_{cf} (auch: ‚channel-forming discharge') gleichgesetzt bzw. synonym verwendet (vgl. u.a. KNIGHTON 1998; COPELAND et al. 2001; SHIELDS et al. 2003; DOYLE et al. 2007). Ein (starkes) Auseinanderklaffen dieser Werte kann in vielen Fällen als Hinweis bzw. Indikator für menschliche Eingriffe gewertet werden, häufig wurden durch Regulierungen die bordvollen Durchflüsse (sehr) stark angehoben, während die Q_{ef}- und Q_{ri}-Werte offensichtlich deutlich weniger verändert wurden. Werden bordvolle bzw. bettbildende Durchflüsse wasserbaulich stark verändert, dann ist damit auch eine wesentliche hydromorphologische Änderung verbunden, selbst dann, wenn keine direkten baulichen Maßnahmen sichtbar sind.

5. Zur Frage der Kausalität und Diskussion

In der Logik der DHG-Relationen sind die (bordvollen) Durchflüsse unabhängige Größen und die flussgeometrischen Größen sind davon abhängig. Weiter führende Analysen (z.B. ANDREWS 1984; PARKER et al. 2007) zeigen die Wirkung zusätzlicher Steuergrößen (z.B. mittlerer Korndurchmesser des Bettmaterials, Dichte und Stärke des Uferbewuchses, Feststoffregime, …), aber der bordvolle Durchfluss bleibt die primäre Steuergröße.

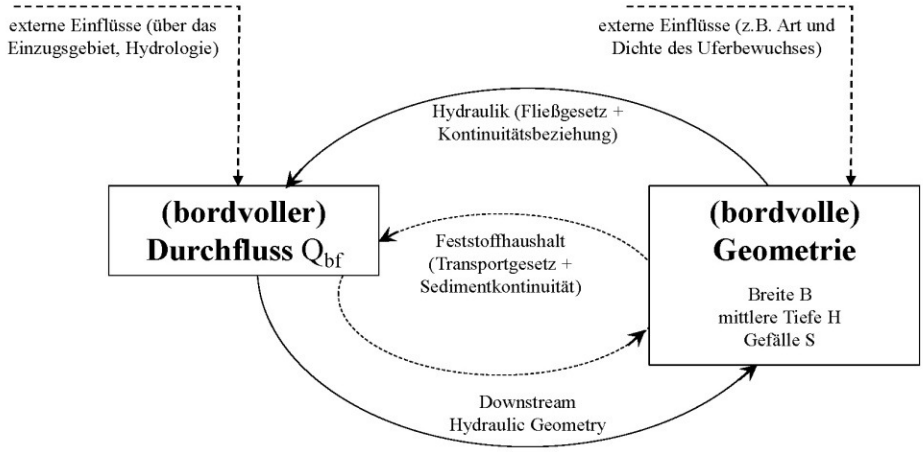


Abb. 5: Wechselwirkung zwischen bordvoller Geometrie und bordvollem Abfluss, Prinzipskizze

Dieses Konzept bekommt mit der häufigen numerischen Nähe zwischen bordvollem und bettbildendem Durchfluss ($Q_{bf} \approx Q_{ef}$) zusätzliche Plausibilität. Aus einer hydraulischen Sicht (über Fließgesetz und Kontinuitätsbedingung) kann man im Übrigen den Ursachen- und Wirkungszusammenhang gerade umgekehrt sehen: bei gegebenen flussgeometrischen Größen (bordvolle Breite, mittlere Tiefe, Gefälle) ergibt sich der bordvolle Durchfluss als davon abhängige Größe (vgl. u.a. VAN DEN BERG 1995). Damit liegt eine zirkuläre bzw. rekursive Wechselbeziehung vor, die wahrscheinlich nur systemtheoretisch zu verstehen ist, vgl. Abbildung 5. Es ist bemerkenswert, dass sich die bordvollen Durchflüsse Q_{bf} dabei meist „in der Nähe" der $HQ_{1,5}$-Werte einstellen ($Q_{bf} \approx HQ_{1,5}$); an der Schnittstelle zwischen hydrologi-

schen, morphologischen und hydraulischen Prozessen scheint dies eine gemeinsame Eigenschaft der meisten natürlichen Flüssen mit ausgeprägten Vorländern zu sein.

Danksagung: Die Daten zur Donau östlich von Wien konnten im Rahmen eines Forschungsprojektes, finanziert von der Nationalpark Donau-Auen GmbH, ermittelt und analysiert werden.

Literaturverzeichnis:

ANDREWS, E. D. (1984): Bed material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, S. 371-378.

CAO, S. & D. W. KNIGHT (1996): Regime theory of alluvial channels based upon the concepts of stream power and probability. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime & energy , Part 2, 118(3), S. 160-167.

CHAPLIN, J. J. (2005): Development of regional curves relating bankfull-channel geometry and discharge to drainage area for streams in Pennsylvania and selected areas of Maryland. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5147.

CINOTTO, P. J. (2003): Development of regional curves of bankfull-channel geometry and discharge for streams in the non-urban Piedmont Physiographic Province, Pennsylvania and Maryland. U.S. Geol. Survey Water-Resources Investigation Rep. 03-4014.

COPELAND, R. R., D. S. BIEDENHARN, J. C. FISCHENICH (2000): Channel-Forming discharge. U.S. Army Corps of Engineers, Technical Note ERDC/CHL CHETN-VIII-5.

DOYLE, M. W., D. SHIELDS, K. F. BOYD, P. B. SKIDMORE, D. DOMINICK (2007): Channel-forming discharge selection in river restoration design. Journal of Hydraulic Engineering , Vol. 133, S. 831 - 837.

EMMETT, W. W. & M. G. WOLMAN (2001): Effective discharge and gravel-bed rivers. Earth Surface Processes and Landforms; 26(13): S. 1369-1380.

HUNDEY, E. J. & P. E. ASHMORE (2009): Length scale of braided river morphology, Water Resour. Res., 45, W08409, doi:10.1029/2008WR007521.

KLASZ, G. (2010): Studie zur Flussmorphologie der frei fließenden Donau, Wien bis Marchmündung; im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH.

KLASZ, G. (in Bearbeitung): An analytical approach to river behaviour and adjustment processes. Dissertation, TU-Wien.

KNIGHTON, A. D. (1998): Fluvial Forms and Processes. A new Perspective. Edward Arnold, New York.

LATRUBESSE, E. M. (2008): Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. Geomorphology 101 (2008), S. 130-145.

LEOPOLD, L. B. & T. MADDOCK (1953): The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. U.S. Geological Survey Prof. Pap., 252, S. 1-57.

LEOPOLD, L. B. & G. WOLMAN (1957): River channel patterns: braided, meandering and straight. U.S. Geological Survey Prof. Pap. 282 -B, S. 39 - 85.

LEOPOLD, L. B. (1994): A view of the river. Harvard University Press.

McCANDLESS, T. L. & R. A. EVERETT (2002): Maryland stream survey - Bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Piedmont Hydrologic Region. In: U.S. Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office, CBFO-S02-01.

McCANDLESS, T. L. (2003a): Maryland stream survey - Bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Allegheny Plateau and the Valley and Ridge Hydrologic Regions. U.S. Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office, CBFO-S03-01.

McCANDLESS, T. L. (2003b): Maryland stream survey - Bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Coastal Plain Hydrologic Region. U.S. Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office, CBFO-S03-02.

MULVIHILL, C. I., B. P. BALDIGO, S. J. MILLER, D. DeKOSKIE, J. DuBOIS (2009): Bankfull Discharge and Channel Characteristics of Streams in New York State. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009-5144.

PARKER, G., P. R. WILCOCK, C. PAOLA, W. E. DIETRICH, J.; PITLICK (2007): Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. Journal of Geophysical Research, Vol. 112.

POWELL, G. E., D. MECKLENBURG, A. D. WARD (2006): Evaluation of Channel-Forming Discharges: A Study of Large Rivers in Ohio. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 49(1): 35–46.

SCHOKLITSCH, A. (1930): Der Wasserbau - Ein Handbuch für Studium und Praxis. Verlag von Julius Springer, Wien.

SHERWOOD, J. M. & C. A. HUITGER (2005): Bankfull characteristics of Ohio streams and their relation to peak streamflows. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5153.

SHIELDS, F. D. Jr., R. R. COPELAND, P. C. KLINGEMAN, M. W. DOYLE, A. Simon (2003): Design for stream restoration. Journal of Hydraul. Engineering, Vol. 129, S. 575-584.

VAN DEN BERG, J. (1995): Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers Geomorphology 12, 259–279.

WESTERGARD, B. E., C. I. MULVIHILL, A. G. ERNST, B. P. BALDIGO (2005): Regionalized equations for bankfull-discharge and channel characteristics of streams in New York State - Hydrologic region 5 in central New York. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5247.

WOLMAN, M. G. & L. B. LEOPOLD (1957): River flood plains: some observations on their formation. U. S. Geological Survey Prof. Paper 282-C: Washington, D.C., S. 86–109.

WOLMAN M. G. & J. P. MILLER (1960): Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journal of Geology 68: 54-74.

YALIN, M. S. (1992): River mechanics. Oxford: Pergamon.

Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein – ein hydraulischer Ansatz zur Vereinbarkeit von Hochwasserschutz und Strukturverbesserung

Gesa Kutschera, Hermjan Barneveld, Bernd Mehlig, Martin Brinkmann, Rita Lammersen

Zusammenfassung

Das Projekt „Hydraulische Studie zur Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein“ (HyStAT) ist ein Beispiel, die Ziele der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) und der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) ganzheitlich zu betrachten. Ziel des Vorhabens ist die hydraulisch sinnvolle Vorabstimmung von Maßnahmenkombinationen zur Beseitigung von Engpässen und Integration von WRRL-Maßnahmen („Projektmaßnahmen“); hierzu sind instationäre, zweidimensionale hydraulische Strömungsberechnungen durchgeführt worden.

Der gewählte 2D-Modelldatensatz (WAQUA) beinhaltet die bisher geplanten Retentions- und Deichrückverlegungsmaßnahmen (bis 2020) zur Senkung der Hochwasserscheitel am Niederrhein im Abschnitt zwischen Andernach bis Lobith. Basierend auf der „Erarbeitung der Maßnahmenplanung für die Bundeswasserstraßen in NRW“ erfolgte zunächst die Auswahl abflussrelevanter und ökologisch sinnvoller Maßnahmen, die anschließend in den Modelldatensatz implementiert worden sind. Die durchgeführten 2D-Simulationen erlauben die Darstellung und Analyse der Wirkung der Projektmaßnahmen auf Hochwasserabflüsse und –wasserstände, ggf. ihrer Wechselwirkungen sowie eine Definition von Optimierungskriterien. Die Ergebnisse der Kombination der Anforderungen aus Hochwasserschutz, WRRL und Schifffahrt zeigen das Potential zur Reduzierung der Hochwasserstände im Rhein und Verbesserung der Gewässerstruktur, ohne die Bemessungsabflüsse in Deutschland und den Niederlanden wesentlich zu beeinflussen.

Das Projekt wird von einer interdisziplinären, grenzüberschreitenden Arbeitsgruppe unter Beteiligung der niederländischen Akteure begleitet.

1. Einleitung

Die europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) und die Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) sind wesentliche Stützen einer integrierten Gewässerbewirtschaftung. Ihre aufeinander abgestimmte Umsetzung bedeutet eine große Chance für die Verbesserung der hydraulischen und ökologischen Verhältnisse an Gewässern. Trotz der teilweise unterschiedlichen Zielsetzungen der beiden Richtlinien gibt es auch Synergien. Die Herausforderung besteht darin, die einzelnen Ziele der unterschiedlichen Akteure zu definieren, dabei aber das Ganze im Blick zu behalten und die Arbeiten daran auszurichten.

In Nordrhein Westfalen ist das Projekt „Hydraulische Studie zur Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein“ (HyStAT) ein Beispiel, die beiden europäischen Richtlinien ganzheitlich zu betrachten. Ziel des Vorhabens ist die hydraulisch sinnvolle Vorabstimmung von Maßnahmenkombinationen zur Beseitigung hydraulischer Engpässe für die Schifffahrt und Hochwasserengpässe sowie WRRL-Maßnahmen. Die Vermeidung von Beeinträchtigungen der jeweiligen Verantwortungsbereiche gilt als Rahmenbedingung, so dass die Grundlage für eine gewinnbringende Planung geschaffen wird, in der die Belange des Hochwasserschut-

zes mit den Anliegen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Schifffahrt gleichermaßen Berücksichtigung finden („Win-Win-Win-Situation“).

2. Kriterien bei der Auswahl der Projektmaßnahmen

Um die Ziele der Studie zu erreichen sind zunächst die Maßnahmen zur Beseitigung hydraulischer Engpässe aus der Sicht des Hochwasserschutzes und der Schifffahrt sowie der WRRL-Maßnahmen in einem Maßnahmenpaket zusammengefasst worden. Zunächst stand die hydraulische Betrachtung hinsichtlich der Aussagen zu Auswirkungen und Wechselwirkungen von Projektmaßnahmen (Flutrinnen und Vorlandabträgen) und Gehölzstrukturen sowie die Evaluierung der Abbildung des hydraulischen Systems im numerischen Modell im Vordergrund, weitere relevante Interessen (z.B. Vogelschutzgebiete, Landwirtschaft, Natur, Schifffahrt, Kosten) sind daher zunächst nicht mit eingeflossen. Darüber hinaus wurden die sich durch das Gesamtmaßnahmenpaket ergebenden Veränderungen bestimmt, um die großräumigen Auswirkungen für Hochwasserschutz (Wasserstandsreduzierungen entlang des gesamten Niederrheins), Ökologie (durch zusammenhängende Maßnahmen) und Schifffahrt (v.a. Fließgeschwindigkeiten) zu analysieren.
Die detaillierte Betrachtung von Einzelmaßnahmen und die Integration der Belange aller beteiligten Akteure sollen in den weiteren Prozessen Berücksichtigung finden. Im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Gespräche der interdisziplinären grenzüberschreitenden Arbeitsgruppe sind auch ergänzende Aspekte wie Naturschutz, landwirtschaftliche Belange, ökonomische Restriktionen, integrale Schadenspotenzialanalyse, Schifffahrt, Gewässerunterhaltung, Umgang mit verunreinigtem Boden, aber auch die Auswirkungen für den Unterlieger, die Niederlande, angesprochen worden.
Darüber hinaus sind hinsichtlich der WRRL-Maßnahmen weiterhin folgende Aspekte berücksichtigt worden:

- Flutrinnen müssen den geforderten Mindestabstand zum Deich einhalten, für die Berechnung wurde daher ein Abstand von 50 m zu Grunde gelegt.
- Die Bergsenkungsgebiete am Niederrhein stellen eine besondere Problematik dar, die berücksichtigt werden muss. In diesem Vorhaben wurden daher im Bereich zwischen Emschermündung und Rheinberg keine Projektmaßnahmen verortet.

3. Projektmaßnahmen

3.1 Hochwasserschutz / Engpassanalyse

Örtlichkeiten im Fluss, an welchen im Hochwasserfall die Abflusskapazität lokal beschränkt ist, werden als Hochwasserengpässe bezeichnet. Durch die einschnürende Wirkung dieser „Flaschenhälse“ wird ein Aufstau nach oberhalb verursacht. Mit dem 2D-Modell WAQUA wurde zur Identifikation dieser Engpässe eine Flaschenhalsanalyse für zwei Abflusszustände (HQ5 und HQ200) durchgeführt, welche frühere Ergebnisse des Waterdienst, Rijkswaterstaat (RIZA 2003) einbezog. Ergänzend wurden die im Rahmen der Projektbegleitung seitens der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung aufgezeigten hydraulischen Engpässe der Schifffahrt integriert.

Die Engpässe sind auf Basis des Unterschieds zwischen dem lokalen und durchschnittlichen Gefälle (über 10 km) definiert worden. Der Grenzwert des Gefälleunterschiedes ist dabei auf Grund einer Sensitivitätsanalyse und der früheren Flaschenhalsanalysen auf 0,25 m/km gelegt worden.
In der Engpassanalyse wurden 30-35 Engpässe identifiziert, welche durch Maßnahmen beseitigt werden sollen. Ein Ausschnitt (Rhein-km 610 - 750) der Ergebnisse ist in Abbildung 1 dargestellt. Viele der identifizierten Engpässe werden durch die im Folgenden angesprochenen WRRL-Maßnahmen bereits entschärft, zur Entlastung der übrigen Engpässe sind einige WRRL-Maßnahmen verlängert oder neue Maßnahmen hinzugefügt worden.

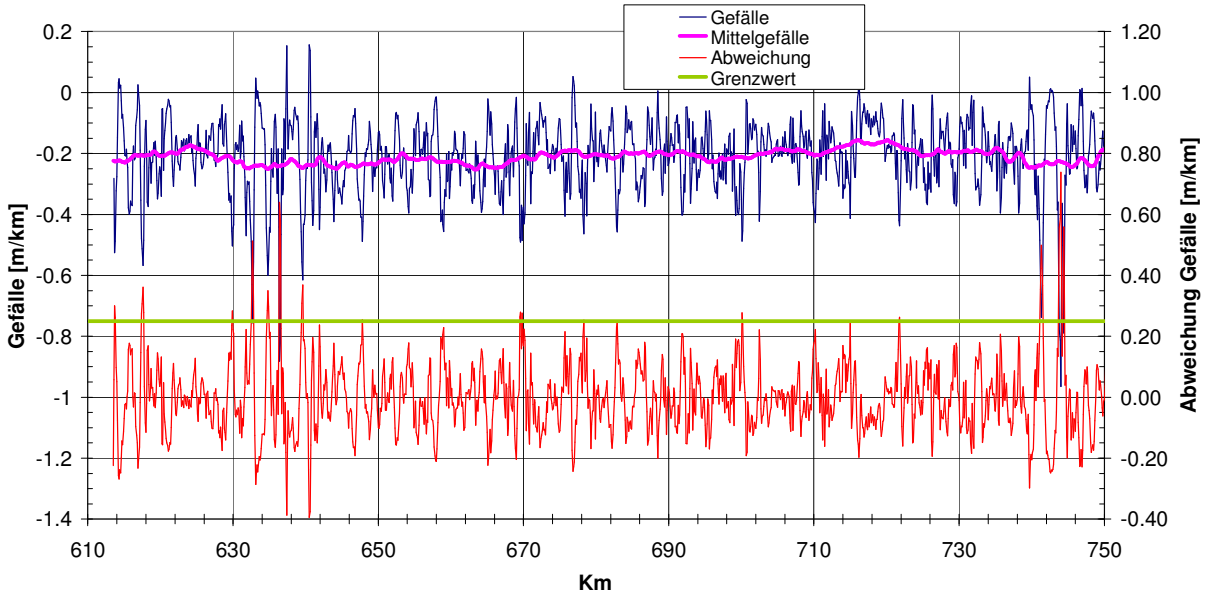


Abb. 1: Gefälleanalyse [m/km] für Abflussszenario HQ200 im Längsprofil (Ausschnitt Rhein-km 610 - 750)

3.2 WRRL-Maßnahmen

Im Rahmen der „Erarbeitung der Maßnahmenplanung für die Bundeswasserstraßen in NRW“ (LANUV 2009) sind zur Erreichung der Umweltziele der EG-WRRL Entwürfe zu Maßnahmenprogrammen erstellt worden, um die im Rahmen des Monitorings bzw. bei der Bestandsaufnahme identifizierten Defizite zu beheben. Maßnahmentypen sind Flutrinnen, Vorlandabsenkungen und Gehölzstrukturen.
Bei den Bundeswasserstraßen kommt der Aufrechterhaltung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs eine zentrale Bedeutung zu.
Auf Grund dieser Maßnahmenplanung ist für HyStAT ein Paket von WRRL-Maßnahmen in zwei Arbeitsschritten entworfen worden. Zunächst sind aneinander angrenzende und überlappende Maßnahmen selektiert worden, um einen ökologischen Zusammenhang und eine hydraulische Wirksamkeit zu erzielen. In einem zweiten Schritt sind die Höhen der Maßnahmen anhand des niedrigsten Niedrigwassers 2003 (NNW2003) und einem Ausbaumittelwasserstand+1 m (AMW90+1 m), der 1990 festgelegt wurde, definiert worden (Abbildung 2). Die Flutrinnen werden bei geringeren Abflussverhältnissen vom Unterwasser her eingestaut (Sohlhöhe auf NNW2003). Oberwasserseitig ist eine feste Schwelle auf Höhe des AMW90+1

m vorgesehen, um zu häufiges Mitströmen der Flutrinne und eine Beeinflussung der Schifffahrt zu vermeiden. Die Sohle des Vorlandabtrags liegt ebenfalls auf AMW90+1 m und verläuft in Querrichtung zur Gewässerachse horizontal. Durch die gewählten Höhen der Flutrinnen und Vorlandabträge sollen diese mindestens 60-80 Tage im Jahr mitströmen.

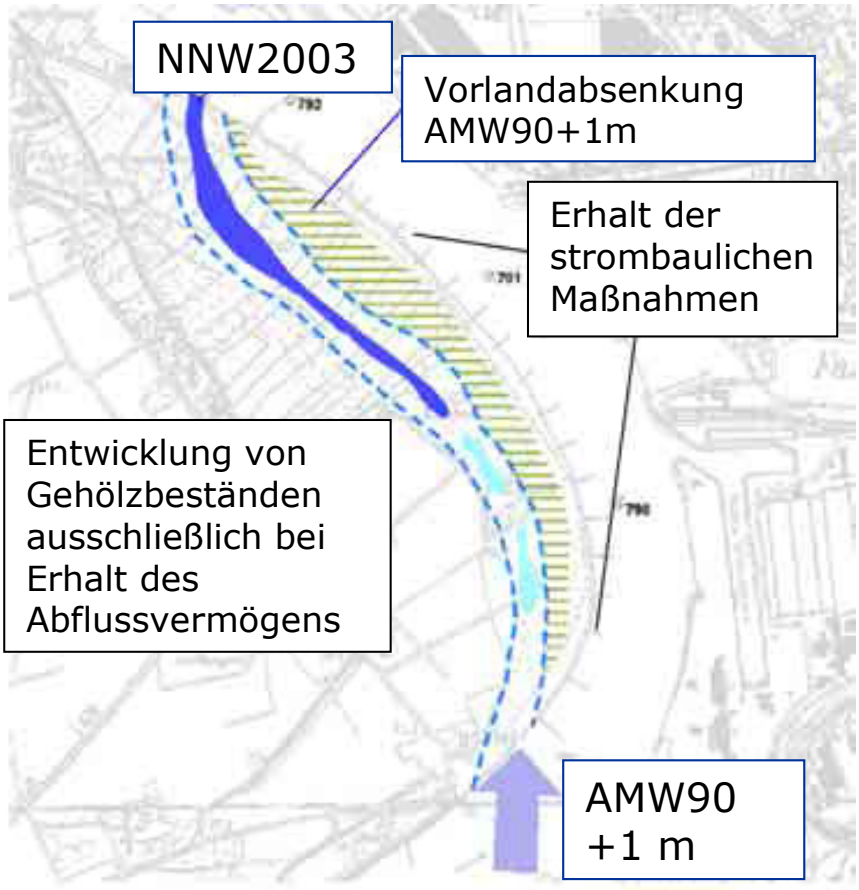


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Maßnahme mit Flutrinne und Vorlandabtrag

3.3 Gesamtmaßnahmenpaket

Aus der Gesamtanalyse der Maßnahmen aus dem Bereich des Hochwasserschutzes, der WRRL-Maßnahmen und der Engpässe aus Sicht der Schifffahrt ergibt sich insgesamt ein Paket bestehend aus 40 Maßnahmen.

In einem zweiten Schritt ist zur Optimierung des Maßnahmenpakets eine Analyse durchgeführt worden, an welchen Stellen Gehölzstrukturen sinnvoll (ökologisch) und möglich (kleine Fließgeschwindigkeiten) erscheinen. Zur Auswahl standen Baumreihen entlang der Rinnenstrukturen (einseitig und beidseitig) sowie Gehölzstrukturen in Vorlandflächen mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Berechnet wurde die „Maximalvariante“ mit beidseitigen Gehölzstreifen von 15 m Breite entlang der Flutrinnen sowie einer größtmöglichen Anzahl von zusammenhängenden Bewuchsflächen größer 1 ha. Zielsetzung ist die Abschätzung eines maximalen Aufstaueffektes.

4. Modellaufbau

4.1 Software und Ausgangsdatensatz für das hydraulische Modell

Zur Durchführung der Simulationen wurden für die Ausgangssituation und die Projektmaßnahmenzustände WAQUA-Modelle aufgebaut. In (HKV 2008) sind die Erstellung der geplanten Retentions- und Deichrückverlegungsmaßnahmen in NRW und den Niederlanden in der GIS-Datenbank BASELINE und die Berechnung der Auswirkungen dieser Maßnahmen beschrieben.

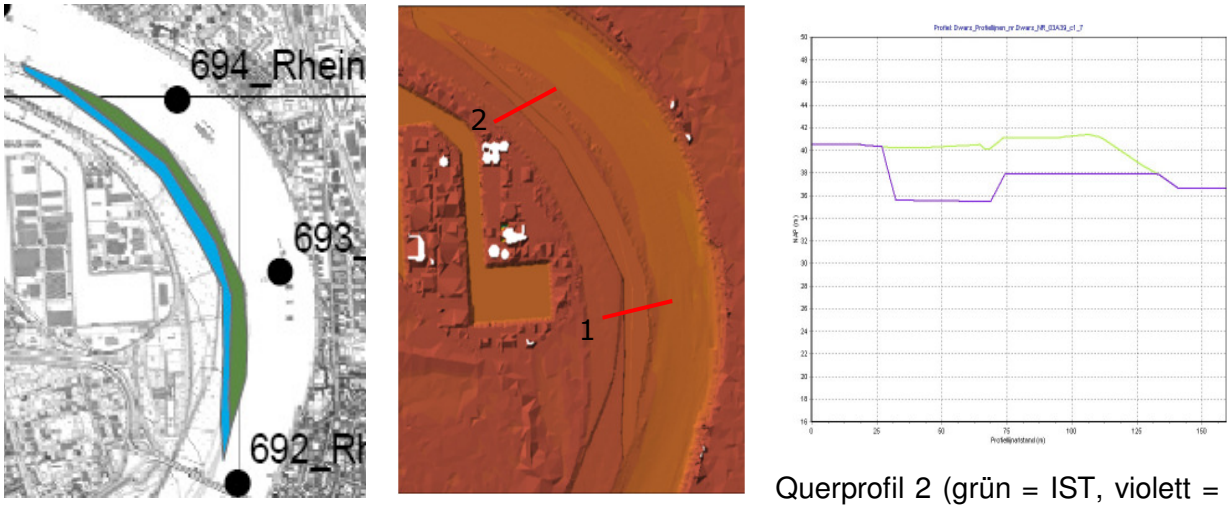
Als Basis wurde das Innen-Modell, welches die Situation zwischen den Banndeichen und bis zu 5 km dahinter darstellt, verwendet. Falls die Wasserstände infolge höherer Abflüsse die Höhe der Banndeiche überschreiten, bildet die Modellbegrenzung das Gebiet ab, so dass Wasser in das Hinterland fließen kann.

4.2 Referenzzustand

Als Ausgangssituation für HyStAT wird der Zustand im Jahr 2020 (nachfolgend Referenzzustand 2020 genannt), nach Deichsanierung und Implementierung schon geplanter Hochwasserschutzmaßnahmen, wie Deichrückverlegungen, gesteuerte und ungesteuerte Retentionsmaßnahmen und die Flutmulde Rees herangezogen. Detaillierte Beschreibungen der berücksichtigten Maßnahmen sind in (HKV 2011) und (HKV 2008) nachzulesen.

4.3 Implementierung in BASELINE

Die in Abschnitt 3 identifizierten Projektmaßnahmen werden individuell in BASELINE implementiert und anschließend in das WAQUA-Modell integriert (Abbildung 3). Dadurch werden die Entwürfe reproduzierbar festgelegt und eine Kombination mit anderen Maßnahmen ist problemlos durchführbar (Mix-Maßnahme in BASELINE).



Querprofil 2 (grün = IST, violett = Plan)

Abb. 3: Beispiel der Geometrieanpassung und Geometriekontrolle (Querprofile) für eine mögliche Projektmaßnahme

4.4 Hydraulische Randbedingungen und Rauheitsansätze

Die Berechnungen sind mit sechs verschiedenen Hochwasserwellen (HQ1, HQ5, HW1995, HQ200, HQ500 und HW824) mit Scheitelabflüssen am Pegel Andernach zwischen 5.260 und 15.120 m^3/s durchgeführt worden (obere Randbedingung). Das HW824 entspricht im grenznahen Bereich etwa dem HQ1250, welches als Bemessungsabfluss in den Niederlanden herangezogen wird. Für Nebengewässer, Zwischeneinzugsgebiete und Grundwasseraustausch sind laterale Zuflüsse zugefügt worden.

Die untere Randbedingung des Basis WAQUA-Modells ist am Pannerdensche Kop in den Niederlanden bei Kilometer 876.2. Die in den Niederlanden durchgeführten Maßnahmen (Raum für den Fluss) sind durch entsprechende WQ-Beziehungen berücksichtigt worden.

Die Rauheitsansätze sind im Wesentlichen aus dem bestehenden WAQUA-Modell übernommen worden. Für die neu implementierten Projektmaßnahmen wurde zur Gewährleistung der Abflussfähigkeit des Vorlandabtrages eine kurze Vegetation (Grünland mit einem Nikuradse k-Wert von 0,25 m) angenommen. In potenziellen Bereichen mit Gehölzstrukturen wurden als Bewuchs Weichholzsträucher mit einer maximalen Rauheit (k-Nikuradse-Wert von 10 m, bei 2 m Einstautiefe) zugrundegelegt (VELZEN VAN, E.H. et al. 2003).

5. Erkenntnisse

Für das Maßnahmenpaket sind mit dem WAQUA-Modell für verschiedene Hochwasserereignisse (HQ1, HQ5, HW1995, BHQ und eine Extremabflusswelle) die hydraulischen Auswirkungen (Wasserstände, Abflussverhältnisse und Fließgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand und den Zustand mit dem Maßnahmenpaket bestimmt worden. Die Analyse der Gesamtwirkung zeigt, wie sich Maßnahmen entlang der Niederrheinstrecke auswirken bzw. gegenseitig beeinflussen.

Ergänzend durchgeführte Berechnungen für eine Abflusswelle größer BHQ ergeben, dass sich nach Unterstrom in den angrenzenden Niederlanden (Pegel Lobith) der dortige Bemessungsabfluss nicht erhöht.

Grundsätzlich wirken Flutrinnen sowie Vorlandabträge wasserstandsmindernd und Gehölzstrukturen aufstauend, jeweils nach oberhalb. Eine hydraulisch sinnvolle Kombination erlaubt summarisch eine Reduzierung der Scheitelwasserstände. Insbesondere die Beseitigung der Hochwasserengpässe, sei es als Einzelmaßnahme oder im Zuge einer WRRL-Maßnahme, wirkt sich wasserstandsmindernd aus.

Da sich durch die Projektmaßnahmen auch eine unmittelbare Auswirkung auf lokale Wasserstands-Abfluss-Beziehungen ergeben kann, ist in Einzelfällen zu prüfen, ob abflussabhängige Bauwerke oder Steuerungen betroffen sein können. Somit sind auch Wechselwirkungen zwischen den geplanten Retentionsmaßnahmen und den Projektmaßnahmen gegeben.

Grundsätzlich wurden die Auswirkungen auf Scheitelabflüsse (Hochwasserschutz Unterlieger) und Fließgeschwindigkeiten (Schifffahrt) für alle Ereignisse ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass geeignete Maßnahmenkombinationen Potenzial für „Win-Win-Win-Situationen“ haben.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die hydraulische Modellierung ergab, dass mit dem Gesamtmaßnahmenpaket die Wasserstände über die gesamte betrachtete Strecke des Niederrheins reduziert werden könnten. Eine Optimierung hinsichtlich der Verortung und des Umfangs der Gebiete mit Gehölzstrukturen (z.B. räumlich differenzieren und lokal reduzieren) erlaubt weitere scheitelvermindernde Wirkung.

Es ist unwahrscheinlich, dass alle Projektmaßnahmen in einem Zuge und in kurzer Zeit zur Umsetzung gelangen. Da im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht von vorneherein zu viele Maßnahmen wegen unterschiedlicher Interessen verworfen werden sollten und sich aneinandergrenzende einzelne Maßnahmen beeinflussen können, ist hier mit dem Gesamtmaßnahmenpaket gerechnet worden.

In der Umsetzung werden neben maßnahmenscharfen Betrachtungen und der „Hochwasserneutralität“ noch weitere wichtige Aspekte diskutiert werden, die z.B. den Naturschutz, landwirtschaftliche Belange, ökonomische Restriktionen, Schifffahrt, Pflege, ggf. Umgang mit verunreinigtem Boden, etc. betreffen.

Ergänzend ist für eine Umsetzungsplanung auch der jeweilige Maßnahmenstand/-planungstand einer hydraulischen Betrachtung hinsichtlich jeweiliger Hochwasserauswirkungen zu unterziehen. Das vorliegende Instrumentarium bietet die Grundlagen dafür.

Literatur

HKV (2008): Grenzüberschreitende Abstimmung wasserstandssenkender Maßnahmen 2-D-Berechnungen mit WAQUA. HKV-Bericht PR1350 (im Auftrag der Rijkswaterstaat, Waterdienst) (unveröffentlicht).

HKV Hydrokontor (2011): Hydraulische Studie zur Abfluss- und Strukturverbesserung am Niederrhein – HyStAT; Abschlussbericht (im Auftrag des LANUV NRW) (unveröffentlicht).

LANUV (2009): Erarbeitung der Maßnahmenplanung für die Bundeswasserstraßen in NRW - Erarbeitung der Maßnahmenplanung für die Bundeswasserstraße Rhein in NRW

RIZA (2003): Studie afvoercapaciteit Niederrhein, Verkennende berekeningen met het BOS Inrichting Rivieren. RIZA - werkdocument 2003.027X, (Studie zur Abflussfähigkeit des Niederrheins, erste Berechnungen mit dem BOS (DSS) Einrichtung Flüsse. Rijkswaterstaat RIZA, Dokument 2003.027X).

VELZEN VAN, E.H. et al. (2003): Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden. Deel I Handboek versie 1-2003 (Strömungswiderstand Vegetation in Vorländern, Teil I Handbuch Version 1-2003)

WSA Duisburg-Rhein. (2003): Engpassanalyse aus hydraulischer und morphologischer Sicht, Präsentation Workshop Grenzüberschreitende Auswirkungen extremer Hochwasser am Niederrhein am 30.6.-1.7.2003 in Arnheim.

Flussgebietsmanagement vom Konzept zur Umsetzung am Beispiel des Hochwasser-Managements im Einzugsgebiet der Ache

Frederick M. Cate, Reinhard Schaufler

Zusammenfassung

Seit 1993 hat der Wasserverband Ache (Innviertel, Oberösterreich) konsequent ein strategisches, ganzheitliches Hochwasser-Management für das gesamte Einzugsgebiet der Ache verfolgt. Dieses umfasste das "Schutzwasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept mit Gewässerökologischem Leitbild", das "Generelle Projekt zur Verbesserung der Abflussverhältnisse, HW-Schutzmaßnahmen im Einzugsgebiet", die "Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)" aller HW-Schutzmaßnahmen im Einzugsgebiet sowie die Erstellung und den Beschluss eines Beitragsschlüssels nach folgendem Prinzip: Nutzen (63%), Verursacher (23%) und Solidarität (14%).

Der Wasserverband Ache, bestehend aus 18 Gemeinden des Einzugsgebietes, hat sich als tatkräftiges und effektives Instrument für die Umsetzung eines ganzheitlichen Hochwasserschutzes bewährt. Auf die Akzeptanz des Gesamtkonzepts und der Maßnahmen durch die Bevölkerung wird großer Wert gelegt.

Bis Ende 2010 sind mehrere lokale Schutzmaßnahmen und ein Rückhaltbecken (Grubmühlbach, 285.000 m³) errichtet worden. Weitere sieben Becken sind in Planung bzw. im Bewilligungsverfahren. Neben den Hochschutzmaßnahmen wurden auch Maßnahmen zur Erreichung des guten Zustands gemäß EU Wasserrahmenrichtlinie gesetzt bzw. geplant.

1. Einzugsgebiet der Ache

Die Ache ist ein rechter Zubringer des Inns. Das Einzugsgebiet der Ache umfasst ca. 320 km² und umfasst 22 Gemeinden. 18 Gemeinden haben sich 1982 zum Wasserverband Ache zusammengeschlossen mit dem Ziel, gemeinsam einen Hochwasserschutz zu schaffen und die Gewässer zu pflegen.

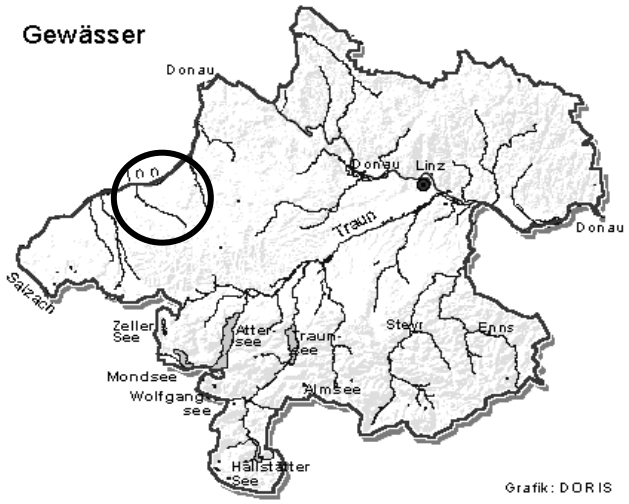


Abb. 1: Lage der Ache (CATE & SCHAUFLER 2006)

Die Ache und ihre Zubringer entspringen dem Kobernausserwald und fließen nach Norden durch das Schlierhügelland und die Terrassenlandschaft des Inns. Das Gebiet wurde öfters von großen Hochwässern betroffen, wobei die Ereignisse 1898/99 und 1954 bisher die größten waren. Nach dem Hochwasser 1899 und 1954 wurden lange Gewässerstrecken begradigt und reguliert (HIMMELBAUER 1964). Der Ausbaugrad ist unterschiedlich und beträgt HQ10 bis HQ100. Durch tief greifende Änderungen in der Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen (z.B. Mechanisierung, Zusammenlegungen, mehr Ackerfläche, mehr Maisanbauflächen) hat sich die Abflussbildung in der Fläche wesentlich verändert und verschärft. Dazu kamen eine stärkere Versiegelung der verbauten Gebiete sowie eine Ausweitung der Besiedlung. Durch diese allmähliche Entwicklung waren viele bestehenden Hochwasserschutzmaßnahmen nicht mehr in der Lage, den gewünschten Schutz zu sichern. Dazu kommt der Umstand, dass das Risikopotential beträchtlich gestiegen ist (CATE 1999, CATE & SCHAUFLER 2006).
Der Wasserverband Ache hat zusammen mit dem Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Gewässerbezirk Braunau, 1993 beschlossen, eine strategische, ganzheitliche Planung des Hochwasserschutzes im gesamten Einzugsgebiet der Ache vom Zivilingenieur DI F.M. Cate, Interival ZT GmbH, in drei Schritte durchzuführen zu lassen:

- Schutzwasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept Ache (1998)
- Generelles Projekt zur Verbesserung der Abflussverhältnisse (2002)
- Kosten-Nutzen Analyse und Ermittlung des Beitragsschlüssels (2004)

Die Finanzierung erfolgte durch den Bund und das Land Oberösterreich.

2. Schutzwasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept Ache

Das Schutzwasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept umfasst im Wesentlichen folgende Arbeitspakete:

- Niederschlag-Abfluss-Simulation
- Hochwasseranschlagslinien an allen Hauptgewässern
- Gefährdungsstellen und Nutzungskonflikte
- Gewässerökologisches Leitbild (Technisches Büro DI Gabriele Hofmann)

Die Niederschlag-Abfluss-Simulation wurde mit dem HPIC Modell V (Karl Malzer & Nagele) durchgeführt. Dieses Modell basiert auf physikalischen Grundlagen; die Haupteingangsparameter sind: Niederschlag, Vorfeuchte, Analyse historischer Hochwässer, Topographie (58 Teileinzugsgebiete), Zustand des Gewässernetzes, Bodenart, Bodennutzung sowie Bodenzustand (MALZER 1992, CATE 2001).
Die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Simulation wurden mit dem Hydrographischen Dienst Oberösterreich abgestimmt und Hydrologische Längenschnitte für HQ100, HQ30 und HQ10 für alle Hauptgewässer im Einzugsgebiet entwickelt. Ausgehend vom Hydrologischen Längenschnitt wurden die Hochwasseranschlagslinien HW100, HW30 und HW10 für alle sechs Hauptgewässer im Einzugsgebiet mit dem Programm HEC-RAS berechnet. Die Überflutungsflächen wurden in Luftbildern (in Farbe), Maßstab 1:5000 sowie in Profilen und Längenschnitten dargestellt. Die Abflussverhältnisse wurden analysiert sowie die Gefährdungsstellen und Nutzungskonflikte mit der Flächenwidmung aufgezeigt.

Das Büro „Projekt TB für Landschaftsplanung GmbH, DI Gabriele Hofmann“ hat parallel zum SWWGK Ach ein Gewässerökologisches Leitbild für die Gewässer im Einzugsgebiet entwickelt (HOFMANN 1998).

3. Generelles Projekt zur Verbesserung der Hochwasserabflussverhältnisse

Das Generelle Projekt „Verbesserung der Abflussverhältnisse, Hochwasserschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet“ stellt ein Planungsinstrument für die langfristige Umsetzung des Hochwasserschutzes dar, verbunden mit der Realisierung des gewässerökologischen Leitbildes. Dabei soll der Rückhalt im Einzugsgebiet durch Erhaltung bestehender und die Wiedererschließung verlorene, natürliche Rückhalteräume sowie durch die Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken verbessert werden. Zur Abdeckung des verbleibenden Risikos sind lokale Maßnahmen wie Einpolderungen, Geländeanpassungen, Objektschutz, lineare Schutzmaßnahmen vorgesehen. Zusätzlich werden jene Teileinzugsgebiete identifiziert, in denen vorrangig Maßnahmen zur Verringerung der Hochwasserentstehung zu setzen wären (Pufferstreifen, Bewirtschaftung entlang der Höhenschichtenlinien, Begrenzung der Feldlängen, Gehölzstreifen, kleine Rückhaltebecken, Feuchtbiotope, Einschränkung des Maisanbaus, etc.) (CATE & SCHAUFLER 2006).

Im ersten Schritt der Risikoanalyse wurden die Gefährdungsstellen im gesamten Einzugsgebiet ausgewiesen und hinsichtlich des Schadenspotentials beurteilt (Einteilung in „extrem hoch“, „sehr hoch“, „hoch“, „vorhanden“). Im zweiten Schritt wurde der Beitrag der einzelnen Teilgebiete zu den Hochwasserspitzen bei jeder Gefährdungsstelle ermittelt. Im dritten Schritt wurden diese Bewertungen kombiniert und die so genannte „Hydrologische Wirksamkeit“ bestimmt, die eine Beziehung zwischen dem Beitrag eines Gebietes zur Hochwasserspitze und das potenziellen Schadensausmaß wiedergibt.

In den „gefährlichsten“ Teilgebieten wurden insgesamt 22 mögliche Standorte für Rückhaltebecken mit 5.000 bis 350.000 m³ Nutzvolumen identifiziert. Es wurden dann für 3 Szenarien (25% der Standorte, 50% der Standorte und 100% der Standorte) die Gesamtwirkung im Einzugsgebiet der Ache untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Gesamtwirkung von 100% der Becken nur unwesentlich höher war als bei 50% der Becken. Bei 25% der Becken können schon erhebliche Verbesserungen erzielt werden. Der Wasserverband beschloss, 10 Rückhaltebecken in 2 Stufen (je 10 Jahre) mit je 5 Becken umzusetzen.

Nach der Festlegung der Rückhaltebeckenstandorte erfolgte eine hydraulische Analyse mit Berücksichtigung der Wirkung der Becken, um jene zusätzlichen Maßnahmen zu identifizieren, die zur Erzielung des Hochwasserschutzes bei HQ100 noch erforderlich wären, wie lineare und lokale Hochwasserschutzbauten und Gewässerrückbau zur Mobilisierung von natürlichen Rückhalteräumen. Danach wurde ein Maßnahmenplan für das ganzheitliche Hochwassermanagement in Einzugsgebiet der Ache für die nächste 20 Jahre erstellt. Dabei wurde berücksichtigt, dass nach Stufe 1 alle Siedlungsgebiete mindestens einen Hochwasserschutz bis HQ30 haben.

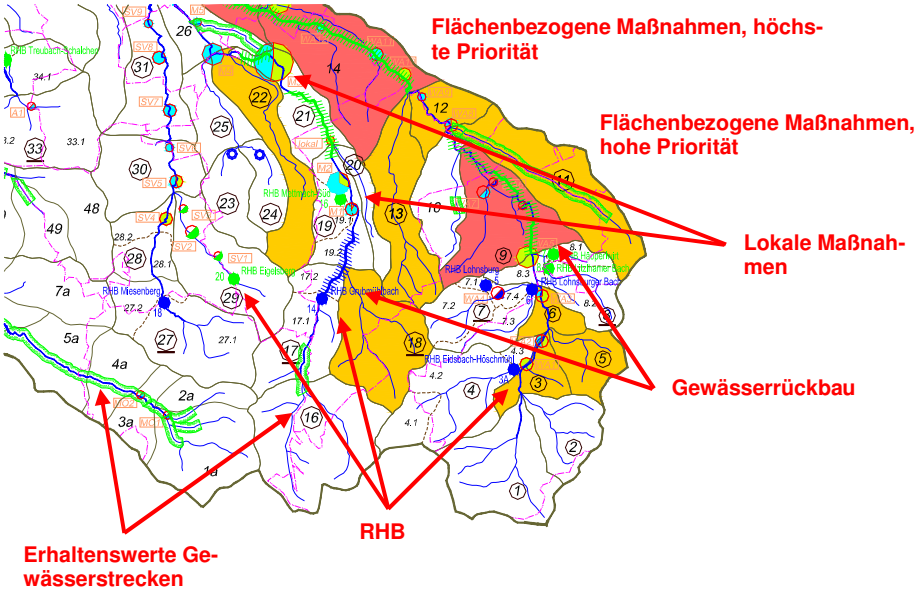


Abb. 2: Maßnahmenplan, Ausschnitt (CATE & SCHAUFLER 2006)

4. Kosten-Nutzen-Analyse und Beitragsschlüssel

Die Baukosten des Programms, gegliedert in Stufe 1 und Stufe 2, wurden geschätzt (Tabelle 1). Unter Berücksichtigung der Bauzeit und mit einer kalkulatorischen Lebensdauer von zusätzlich 50 Jahre wurden die Kostenbarwerte berechnet. Der Nutzen wurde aus der Berechnung der Schäden unter Verwendung von verschiedenen Schadenskategorien mit Schadensfaktoren abhängig von der Überflutungshöhe und der Hochwasserwahrscheinlichkeit ermittelt. Der Nutzen wurde für Stufe 1 und Stufe 2 ermittelt und der Barwert berechnet. Der Nutzen wurde auch für jede einzelne Gemeinde berechnet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Wirtschaftlichkeitskriterien (Tabelle 2).

Tab. 1: Kostenstruktur des Maßnahmenprogramms, Kosten in Mio. Euro (Stand 2004)

	Rückhaltebecken	Lokale Maßnahmen	Rückbau, flächenbezogene Maßnahmen	Summe
	Kosten in Mio. Euro (Stand 2004)			
Stufe 1	10,5	2,3	2,2	15,0
Stufe 2	8,4	1,6	3,0	13,0
Summe	18,9	3,9	5,2	28,0

Auf Grund der neusten Richtlinien für Kosten-Nutzen-Untersuchungen (KNU) für den Wasserbau ist für jede Einzelmaßnahme eine KNU durchzuführen. Bei Gesamtprogrammen für Einzugsgebiete ist jedoch zu beachten, dass der "volle" Nutzen einer Einzelmaßnahme erst bei der Errichtung von weiteren Maßnahmen im Einzugsgebiet erreicht wird. In so einem Fall ist eine "Einzeluntersuchung" wenig aussagekräftig und sogar methodisch falsch.

Tab. 2: Wirtschaftlichkeitskriterien

[Werte in Mio. Euro]	Stufe 1	Stufe 2	Gesamt
Nutzenbarwert	34,225	18,658	52,883
Kostenbarwert	28,810	13,740	42,550
Kapitalwert	5,415	4,918	10,333
K-N Verhältnis	1,19	1,36	1,24

Der Beitragsschüssel wurde nach ausführlicher Diskussion vom Verband beschlossen, wobei das Vorliegen von nachvollziehbaren Untersuchungen die Entscheidungsfindung wesentlich erleichtert hat. Im Beitragsschlüssel fließen für jede Gemeinde drei Faktoren ein:

1. Anteil am Nutzen in% des Gesamtnutzens (Nutzen-Prinzip)
2. Beitrag zur „Hydrologischen Wirksamkeit“ als% der Summe der „Hydrologischen Wirksamkeit“ aller Teileinzugsgebiete (Verursacher-Prinzip)
3. Flächenanteil in% vom Gesamteinzugsgebiet (Solidaritäts-Prinzip)

Diese Faktoren wurden gewichtet und dann der Beitragsanteil der einzelnen Gemeinden berechnet (Tabelle 3).

Tab. 3: Gewichte der Faktoren des Beitragsschlüssels

Nutzen Nutzen-Prinzip	Hydrologische Wirksamkeit Verursacher-Prinzip	Flächenanteil Solidaritäts-Prinzip
63%	23%	14%

5. Umsetzung bis 2010

Zum Zeitpunkt des Hochwassers 2002, an der Ache ein zirka 70-jährliches Ereignis, lag das Generelle Hochwasserschutzprojekt bereits vor. Mehrere betroffene Ortschaften verlangten nach raschem Hochwasserschutz. Die Planungen konnten so bereits auf das Gesamtkonzept abgestimmt werden.

Zwei kleine Ortschaften wurden durch niedrige, flache Dämme sowie durch Hochwassermulden geschützt. Als schwierig erwies sich die Überzeugung der Landwirte, dass die Dämme und Mulden auch zukünftig landwirtschaftlich genutzt werden können.

Die Planungen für das Rückhaltebecken Grubmühlbach begannen 2004. Nachdem das erste Konzept vorlag, bedurfte es 4 Jahre, bis die erforderliche Fläche von 11 ha und die Ablöse eines Gebäudes ausverhandelt waren. Mehrmals musste das Projekt umgearbeitet werden, um den Wünschen der Anrainer gerecht zu werden. Die Bauumsetzung des 320 m langen und bis zu 9 m hohen Erddammes sowie des Grundablasses aus Stahlbeton erfolgte verhältnismäßig rasch von Jänner 2009 bis Sommer 2010. Die Gesamtkosten für das Becken mit 285.000 m³ betrugen 3,6 Mio. Euro.

3 weitere Becken der ersten Ausbaustufe sind in Planung. Auch dort gestalten sich die Grundverhandlungen seit Jahren äußerst schwierig.

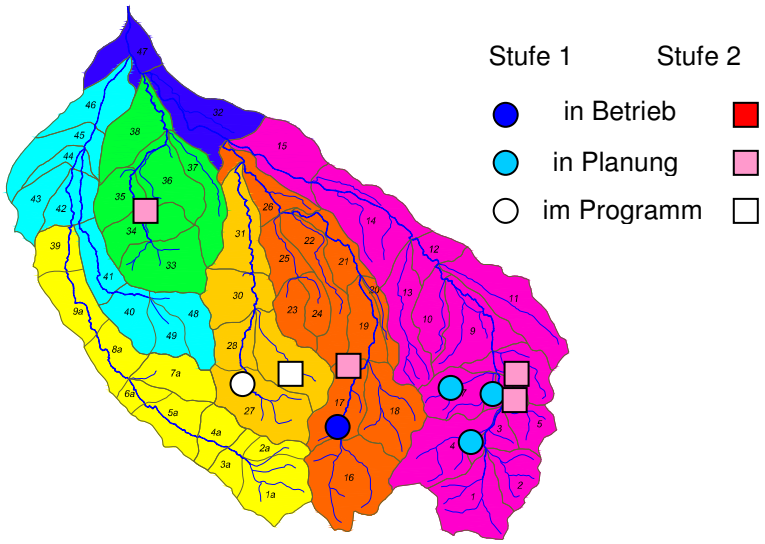


Abb. 3: Einzugsgebiet mit Rückhaltebeckenstandorte

Nachdem erkennbar war, dass die Realisierung der Rückhaltebecken infolge der Grundverfügbarkeit längere Zeit benötigt, wurden auch bereits die Planungen für 3 Becken der zweiten Ausbaustufe begonnen. Besonders in der Ortschaft Mettmach war es erforderlich die Projektierung von 2 kleineren Becken vorzuziehen, da dort ein Flurbereinigungsverfahren im Gange ist. Nach Abschluss eines solchen Verfahrens wären die Flächen für die Becken und die Hochwassermulden kaum mehr zu bekommen. Andererseits konnten im Zusammenlegungsgebiet 6 ha vom Wasserverband erworben werden, die die Agrarbehörde zu den erforderlichen Beckenstandorten und Mulden zuteilte. Nach Abschluss des Verfahrens kann nun das Wasserrechtsverfahren stattfinden.
Für die Ortschaften Wildenau, Kirchheim im Innkreis und Kraxenberg wurden lineare Hochwasserschutzprojekte mit niedrigen Dämmen und Hochwassermulden ausgearbeitet, wobei diese vorläufig nur auf ein 30-jährliches Ereignis dimensioniert wurden, im Zusammenwirken mit den Rückhaltebecken später aber einen Schutz vor 100-jährlichen Hochwässern bietet. Bei allen 3 Projekten benötigten die Grundverhandlungen 3–6 Jahre und ist die Grundinanspruchnahme nur im Zusammenwirken mit der Agrarbezirksbehörde durch entsprechende Grundabtäusche möglich.
Für 2 weitere Ortschaften sind Planungsaufträge für einen linearen Hochwasserschutz vergeben. Auch dort ist es schwierig die Akzeptanz für die erforderliche Grundaufbringung zu erreichen.
An Ökologischen Verbesserungen der Gewässer konnten in den vergangenen Jahren zahlreiche Querbauwerke der Regulierungen fischpassierbar umgestaltet werden. Sukzessive werden auch in den Regulierungen im Rahmen der Instandhaltung Strukturierungen für eine Verbesserung des ökologischen Lebensraumes entsprechend dem ökologischen Leitbild vorgenommen. Ein Beispiel ist die Neugestaltung des Mündungsbereichs in die Inn mit dem Umbau des Sunzinger Wehrs in eine Pendelrampe.
Von großem Vorteil erweist sich der Wasserverband Ache, da damit der Hochwasserschutz gemeindeübergreifend realisiert werden kann und das Bewusstsein im Verband vorhanden ist, dass Hochwasserschutz nur gemeinsam erfolgen kann.

Literatur

CATE, F.M. (1999): River Basin Management in Austria, Beginnings and Future Prospects, Case Studies: Lower and Upper Austria, 8th River Basin Conference, IAWQ, Budapest, 1998, Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No 10, pp. 185–193

CATE, F.M. (2001): River Basin Management in Austria, Country paper for Austria, Water Modelling as a tool in river basin management within the Framwork Directive, Seventh Scientific and Technical Review, EurAqua, Madrid

CATE, F.M. & R. SCHAUFLER (2006): Ganzheitliches Hochwasser-Management im Flussgebiet der Ache, Bundeswasserbauverwaltung Jahresbericht 2005 von Umwelt u. Wasserwirtschaft, Abt. VII 5 Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft von Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft

HIMMELBAUER H. et al (1964): Mühlheimer Ache, Dokumentation zum Abschluss der Wiederherstellungsarbeiten an der Regulierung 1945–1964, Wasserbauverwaltung Oberösterreich

HOFFMANN, G. (1998): Gewässerökologisches Leitbild Ach, Amt der OÖ. Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft

MALZER, K. (1992): Simulationen in der Wasserwirtschaft (gekürzte Fassung), Amt der OÖ. Landesregierung, Abt. Wasserbau

Weitere Literaturhinweise

AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Oberflächengewässerwirtschaft (2010): Aktuelle Schutzbauten (über 200.000 Euro), Interessentengewässer und Bundesflüsse, http://www.land-oberoesterreich.gv.at /cps/rde/xbcr/SID-0653F803-64FF3FAE/ooe/Bauvorhaben.pdf, abgerufen 24.02.2011

AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Oberflächengewässerwirtschaft (2010): Mehrjahresplan für Schutzwasserbauliche Neubaumaßnahmen über 70.000 Euro, http://www.land-oberoesterreich.gv.at /cps/rde/xbcr/SID-0653F803-64FF3FAE/ooe/Massnahmen.pdf, abgerufen 24.02.2011

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT; UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2006): Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung, RIWA-T gemäß § 3 Abs. 2 WBFG

CATE, F.M. (1998): Ach, Schutzwasserwirtschaftliches Grundsatzkonzept, BMLFUW, Sektion VII und Amt der OÖ. Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft

CATE, F.M. (2002): Ach, Verbesserung der Abflussverhältnisse, HW-Schutzmaßnahmen im Einzugsgebiet, Generelles Projekt, BMLFUW, Sektion VII und Amt der OÖ. Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft

CATE, F.M. (2002) Integrated Flood Management in the Ach River Basin, 9th International Watershed & River Basin Management Conference, Edinburgh, 2002

CATE, F.M. (2004): Ach, Kosten-Nutzen-Analyse zum Generellen Projekt, BMLFUW, Sektion VII und Amt der oö. Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft

EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

EU (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Text von Bedeutung für den EWR)

Integration aquatischer Ökosysteme in die Flussgebietsmodellierung - ein erweiterter ökohydrologischer Ansatz

Nicola Fohrer, Britta Schmalz, Jens Kiesel, Björn Guse

Nachhaltiges Flusseinzugsgebietsmanagement hat im Sinne der EG Wasserrahmenrichtlinie die Erreichung eines guten ökologischen Zustands der Fließgewässer zum Ziel. Dennoch werden aquatische Ökosysteme in der integrierten Modellierung meist nicht hinreichend abgebildet. Die Auswirkung von globalem Wandel auf Wasserhaushalts- und Wasserqualitätsgrößen kann mittlerweile in der Modellierung auf Einzugsgebietsskala dargestellt werden. Die Modellierung komplexer Interaktion von Einzugsgebiets- und Flusseigenschaften mit aquatischen Lebensräumen steht noch am Anfang der Entwicklung, wird aber dringend benötigt, um die Entwicklung des ökologischen Zustands von Fließgewässern unter globalen Wandel zu ermitteln.

Durch die Kopplung des ökohydrologischen Modells SWAT (ARNOLD et al. 1998, ARNOLD & FOHRER 2005) mit den hydraulischen Modellen HEC RAS (1D, USACE 2010) und ADH (2D, BERGER & TATE 2007) sollen zunächst hydrologischen Bedingungen, die Wasserqualität und die Interaktionen von Landnutzung, Klima und Bewirtschaftung in der Landschaft auf Fließeigenschaften und Belastungssituationen im Gerinne simuliert werden. Anhand der abiotischen Charakteristika, der morphologischen Eigenschaften und der Wasserqualität soll räumlich differenziert die Lebensraumeignung für Macroinvertebraten ermittelt werden.

Die Methodik dieser integrierten ökohydrologischen Modellierung wird derzeit für die Kielstau in Norddeutschland (KIESEL et al., 2010), für die Poyang Region in China (SCHMALZ et al. 2010) und für die Flüsse Quarteira (Portugal), Cele (Frankreich) und Treene (Deutschland im Rahmen eines IWARM Projekts (GUSE et al., 2011) entwickelt und angepasst.

Die Umgestaltung der Erft – ein Generationenprojekt im Rheinischen Braunkohlenrevier

Ulrich Kern, Hartmut Hoevel

Zusammenfassung
Die Erft ist ein 110 km langer Nebenfluss des Rheins, der im Südwesten Nordrhein-Westfalens liegt. Mit Beginn des Braunkohlentieftagebaus in der Niederrheinischen Bucht wurde der Unterlauf hochwasserfrei ausgebaut, insbesondere um das mit den Bergbauaktivitäten anfallende gehobene Grundwasser (Sümpfungswasser) aufzunehmen und abzuleiten.
Mit dem Ende der Braunkohlengewinnung im Rheinischen Revier werden sich zur Mitte dieses Jahrhunderts unweigerlich die wasserwirtschaftlichen Gegebenheiten in der Erftregion erheblich verändern. Dadurch, sowie durch neue gesellschaftliche Ansprüche und rechtliche Anforderungen, besteht das Handlungserfordernis, die Flusslandschaft neu zu gestalten. Mit dem Masterplan Erft und dem Perspektivkonzept 2045 liegt eine Grundlage für die weitere Diskussion, Planung und Umsetzung vor.

1. Motivation und Zielsetzung

Die Erft ist ein linker Nebenfluss des Rheins, der im Norden der Eifel entspringt und etwa 110 km in nördliche Richtung fließt, bevor er bei Neuss in den Rhein mündet. Über die Jahrhunderte hinweg unterlag der Fluss wechselnden gesellschaftlichen Nutzungsansprüchen und wurde durch diese mehrfach überprägt, zuletzt durch den Einfluss des Braunkohlenbergbaus. Die Erft wurde über 40 km Fließstrecke, in dem Abschnitt zwischen Bergheim und der Flussmündung, begradigt und technisch auf ein Vielfaches des mittleren natürlichen Abflusses ausgebaut, um das aus dem Tagebau abgepumpte Sümpfungswasser ableiten zu können.
Sowohl das Abflussregime der Erft als auch die Grundwasserverhältnisse werden sich in der Zukunft signifikant verändern, da diese Einleitungen mit dem Ende der Braunkohlengewinnung zur Mitte dieses Jahrhunderts wegfallen. Für die zukünftigen Abflussverhältnisse ist das bestehende, ausgebaute Flussbett viel zu groß. Ohne die Einleitung von Sümpfungswasser würde die Erft insbesondere in dem Zeitraum, in dem das Grundwasser noch nicht wieder angestiegen ist, zu einem schlammigen Rinnsal mit hygienischen Problemen verkommen, und viele wasserabhängige Biotope würden trocken fallen. Deswegen besteht die wasserwirtschaftliche Notwendigkeit, das Flussbett der Erft in einem Generationenprojekt wieder in ein naturnahes Gewässer zurückzubauen. Die Umgestaltung der Erft soll zeitgleich mit dem Ende der Braunkohlenförderung (ca. 2045) abgeschlossen sein.
Um den absehbaren Problemen für Anlieger, Nutzer, Kulturlandschaft und Umwelt entgegenzutreten und den Bewirtschaftungszielen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG 2000) nachzukommen, wurde die Zukunftsaufgabe im Jahr 2003 angegangen. Eine Konzeptphase (2003 bis 2008) war darauf ausgerichtet, Maßnahmen zu identifizieren, eine Konzeptplanung für den zukünftigen Gewässerkorridor zu erstellen und Finanzierungsfragen zu klären. Die sich daran anschließende Umsetzungsphase hat die Realisierung der vereinbarten Renaturierungs- und Begleitmaßnahmen zum Ziel (Abb. 1).

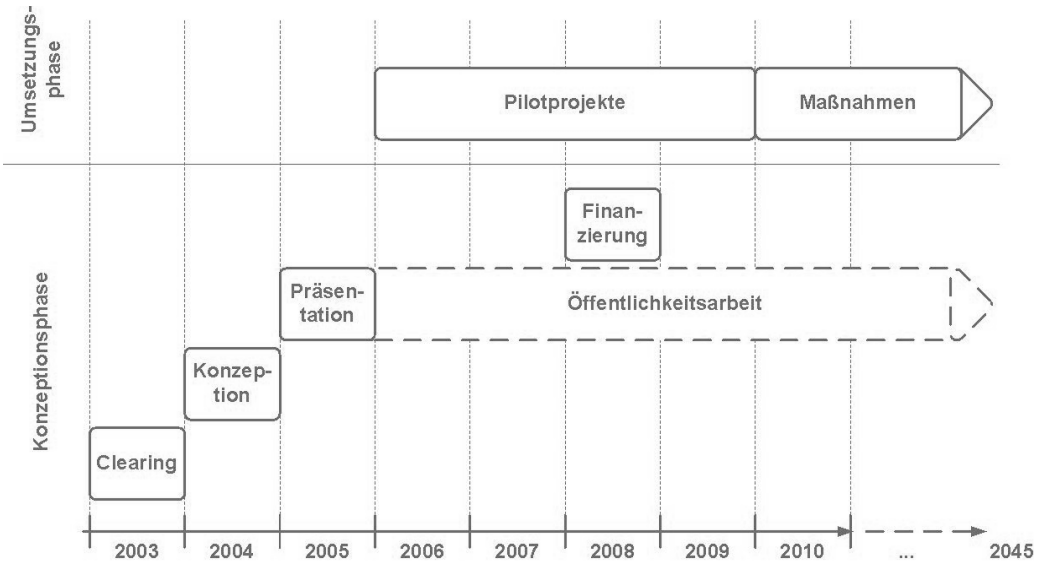


Abbildung 1: Arbeitsschritte der Konzeptionsphase (2003 bis 2008)

2. Masterplan Untere Erft und Erstes Perspektivkonzept 2045 (Konzeptphase)

2003 - Clearing

Das nordrhein-westfälische Umweltministerium richtete Ende 2003 eine Expertengruppe ein, um die Zukunftsfragen an der Erft anzugehen. Im Rahmen der Clearingphase wurden zwei Fragen identifiziert:

- Wie soll die Flusslandschaft im Jahr 2045, also nach dem voraussichtlichen Ende der Tagebauaktivitäten im Rheinischen Braunkohlenrevier und damit einhergehender Beendigung der Sümpfungswassereinleitung aussehen?
- Wie schnell und auf welche Weise soll die Umgestaltung der Erft von statten gehen? Welche Maßnahmen sind hierzu kosteneffizient?

2004 - Konzeption (Perspektivkonzept 2045/Masterplan)

Im Jahr 2004 wurden der Masterplan (Kap. 2.1) und das Perspektivkonzept 2045 (Kap. 2.2) bearbeitet. Eine Steuerungsgruppe, bestehend aus Vertretern des Umweltministeriums, des Erftverbandes, des Bergbauunternehmens, der betroffenen Bezirksregierungen, Landkreise und Städte sowie weiterer Fachstellen (Staatliche Umweltämter, Landwirtschaftskammer, Naturschutzverbände), wachte über den Verlauf der Arbeiten. Die fachliche Bearbeitung des Konzeptes übernahm eine Arbeitsgruppe. Diese wurde in Unterarbeitsgruppen für wasserwirtschaftliche, ökologische, sozioökonomische und planungsrechtliche Fragestellungen aufgeteilt sowie eine weitere, welche Handlungsszenarien entwickelte und vergleichend bewertete. Die Arbeitsergebnisse wurden am 27. Oktober 2004 der Steuerungsgruppe vorgestellt und von dieser verabschiedet.

2005 - Präsentation

Im Jahr 2005 wurde der Ergebnisbericht redaktionell und graphisch aufbereitet und als Gesamtwerk veröffentlicht (vgl. KERN 2006). Für die interessierte Bevölkerung wurden eine verständliche Kurzfassung und das Kartenwerk aus dem Perspektivkonzept auf CD-ROM und im Internet zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden mehrere hundert CD-ROM verteilt.

Zeitgleich erfolgten die Unterrichtung der politischen Gremien in den Kreisen und Kommunen sowie die Information von regionalen Nutzer- und Interessengruppen (z.B. Bürgerinitiativen, Angelsportgruppen, Heimatvereine, etc.).

2008 - Finanzierung
Als nächster wichtiger Meilenstein wurde im September 2008 die Rahmenvereinbarung zur Finanzierung des Projektes als trilateraler Vertrag zwischen Land, Bergbautreibendem und Erftverband unterzeichnet. Darin sind Regelungen zur Kostenträgerschaft und die Verantwortlichkeiten der Vertragspartner festgelegt.

2.1 Masterplan Untere Erft
In den Masterplan wurden die Gewässerumgestaltung und die Maßnahmen zur weitergehenden Niederschlagswasserbehandlung, zur Begrenzung der Sümpfungswassereinleitung (Variante „Konstante Wärmefracht“) und zur Sümpfungswasserbelüftung aufgenommen. Die Gesamtkosten belaufen sich auf ca. 95 Mio. Euro. Die Jahreskosten zur Umsetzung des Masterplans betragen somit durchschnittlich 2,4 Mio. €.

Maßnahmen	Ökologische Wirksamkeit	Gesamtkosten 2005 – 2045 [Mio. Euro]	Kosten-effizienz
Gewässerumgestaltung	++	70	+
Varianten zur Begrenzung der Sümpfungswassereinleitung (Einleitmenge)			
a) Fischgewässerverordnung (0,8 m³/s)	-	85	-
b) Temperaturjahresgang (2-3 m³/s)	-/o	25	-/o
c) Konstante Einleitmenge (8,5 m³/s)	o	3	o
d) Konstante Wärmefracht (7,6-8,5 m³/s)	o/+	4	+/o
Sümpfungswasserbelüftung	o/+	1	+
Eiseneliminierung	o	55	-
Abwasserreinigung (technische Machbarkeitsgrenze)	o/+	60	-
Niederschlagswasserbehandlung	+	20	o/+
Schwermetalleliminierung	o	40	-

Legende: Wirksamkeit sehr hoch (++), hoch (+), indifferent (o), schlecht (-)

Abbildung 2: Wirksamkeit und Kosten möglicher Einzelmaßnahmen im Untersuchungsraum (favorisierte Maßnahmen sind gekennzeichnet)

2.2 Perspektivkonzept 2045
Das entwickelte Perspektivkonzept stellt eine Vision dar, wie der 40 km lange Unterlauf der Erft bis zur Beendigung der Braunkohlengewinnung (Zeithorizont 2045) umgestaltet werden soll. Hierzu wurde der Untersuchungsraum in 23 Planungsabschnitte unterteilt, die aufgrund ihrer naturräumlichen Gegebenheiten homogene Einheiten bilden. Das Perspektivkonzept 2045 liefert Aussagen zu folgenden Themenfeldern: Gewässerverlauf, Querbauwerke, Abflussverhältnisse, Abflussverteilung, Gewässerentwicklungsraum, Auenentwicklungsraum und Hochwasserschutz. In Abhängigkeit von den örtlichen Restriktionen wurden drei unterschiedliche Planungskonzepte verfolgt:
(1) Revitalisierung der Primäraue: Aufgrund der gegebenen Sohleintiefung der Erft kann mit Hilfe einer gezielten Anhebung der Gewässersohle bzw. Verringerung der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Mittelwasserbettes die bestehende Entkopplung von Fließgewässer

und Aue aufgehoben werden. Die Verfüllung des Erftbettes stellt einen baulich aufwändigen Lösungsweg dar, der durch die natürliche Verlandung unterstützt wird. Ggf. können wasserbauliche Maßnahmen, z.B. das Einbringen von Sohlschwellen, diesen Prozess forcieren. Dieser Lösungsweg ist allerdings nur dort möglich, wo ein Anstieg des Wasserspiegels zulässig ist. Zudem sind in der Regel Hochwasserschutzmaßnahmen erforderlich, um Schäden an Gebäuden und Infrastruktur im Gewässerumfeld zu vermeiden.

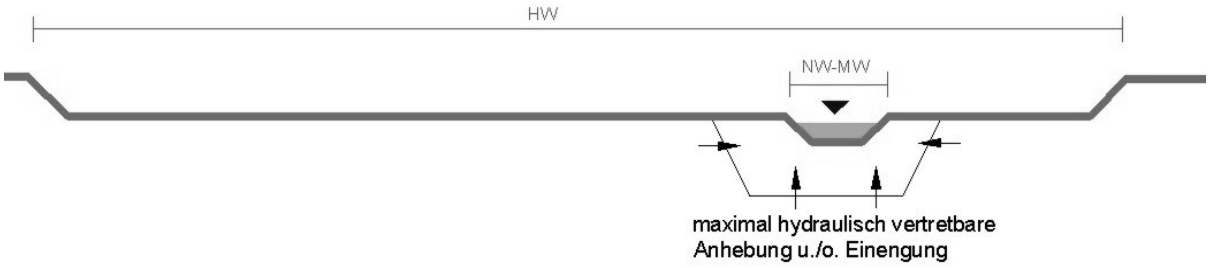


Abbildung 3: Prinzipskizze der Primäraue

(2) Entwicklung einer Sekundäraue durch Bodenabtrag: Durch die Absenkung des Auenniveaus können naturähnliche Überflutungsverhältnisse wiederhergestellt werden. Diese Lösung bietet sich dort an, wo der Mittelwasserspiegel nicht oder nur geringfügig angehoben werden darf. Sie ist verbunden mit Beeinträchtigungen bestehender Altstrukturen, Eingriffen in gewachsene Böden, einer Verminderung der Überflutungsverhältnisse außerhalb der Sekundäraue und ggf. einer Absenkung des mittleren Grundwasserspiegels in der Altaue. Probleme ergeben sich im Falle kontaminierter Böden durch Beachtung der Vorgaben des Bundesbodenschutzgesetzes oder bei gesicherten Erkenntnissen von Bodenschutzdenkmälern.

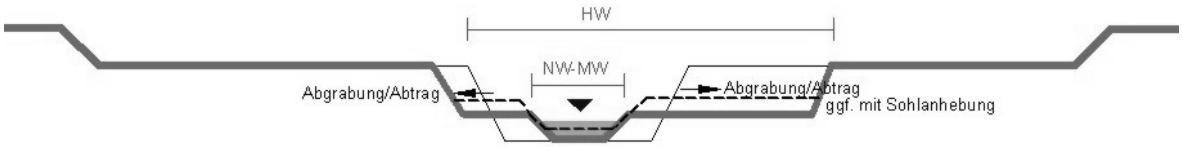


Abbildung 4: Prinzipskizze der Sekundäraue

(3) Eigendynamische Entwicklung einer Sekundäraue: Eine Entfesselung der heutigen, stark eingetieften Erft führt mittel- bis langfristig zur Ausbildung einer tieferliegenden Sekundäraue. Die freie Entwicklung einer Sekundäraue ist in erster Linie abhängig von einer ausreichenden Flächenverfügbarkeit im Gewässerumfeld. Neben einer Entfernung der Böschungsfußsicherung kann durch Einbringen von Totholz der Prozess begünstigt werden. Der Lösungsweg ist im Vergleich zu (2) kostengünstig und bringt nur geringe Eingriffe in Natur und Landschaft mit sich. Er stellt jedoch einen langwierigen Weg einer Gewässer- und Auenrevitalisierung dar.

2.3 Bewertung der Konzeptphase

Im Zusammenwirken zwischen Wasserverband, Land und Bergbautreibenden wurde unter enger Einbindung weiterer regionaler Stellen in 2004 ein Masterplan und eine planerische Vision für den Unterlauf der Erft erarbeitet und zwischen allen Akteuren einvernehmlich abgestimmt. Dies schaffte die Voraussetzung dafür, dass die Einleitgenehmigung für den Tagebau Hambach fristgerecht unter Auflagen (Wärmefrachtbegrenzung) verlängert werden

konnte. Gleichzeitig wurde mit dem Konzept die Wasserversorgung der Braunkohlenkraftwerke langfristig sicher gestellt. Die gewonnene Planungssicherheit stellt vor dem Hintergrund des Kraftwerkserneuerungsprogramms einen wesentlichen Beitrag für die nachhaltige wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Region dar.

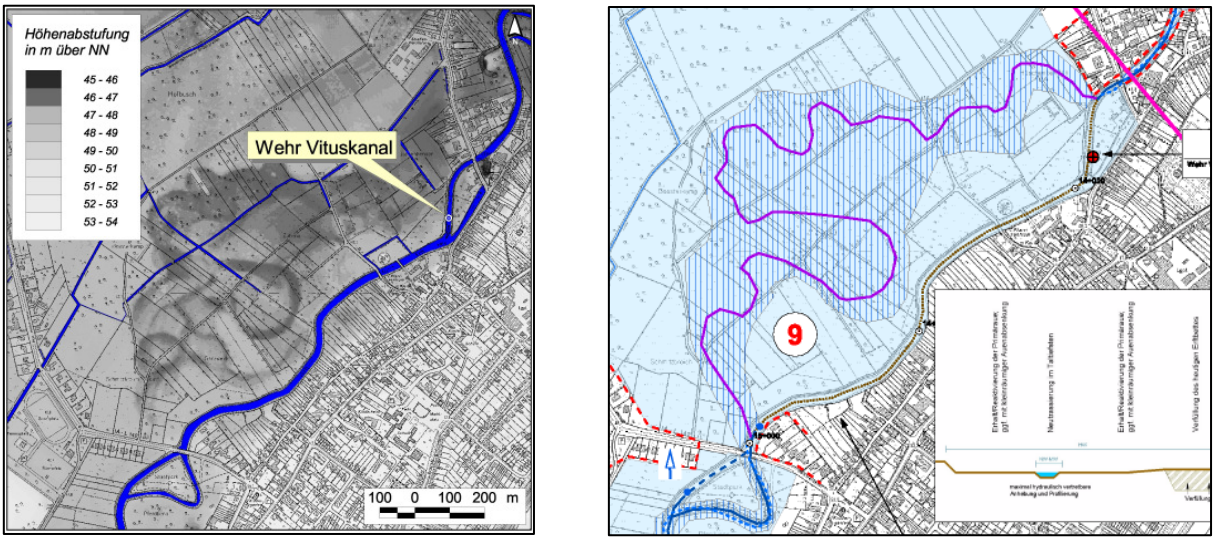


Abbildung 5: Beispielabschnitt aus dem Perspektivkonzept. Heutiger Zustand (links) und Planung gemäß Perspektivkonzept 2045 (rechts).

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht hat die frühzeitige Vorlage einer Konzeptplanung neben der Klarstellung der wasserwirtschaftlichen Ziele und dem in der Region erzielten Konsens über die gewässer- und raumplanerische Vision zwei weitere relevante Erfolge hervorgebracht. Erstens konnte die für die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen erforderliche Flächenkulisse ermittelt und auf verschiedenen Ebenen der Raumordnung (Regionalplan, Flächennutzungspläne) vor der Inanspruchnahme durch andere Nutzungen (Siedlungsentwicklung) gesichert werden. Zweitens wurde zu einem frühen Zeitpunkt mit der im Jahre 2008 unterzeichneten Rahmenvereinbarung die Finanzierung dieses Generationenprojektes geklärt, wobei u.a. der Bergbautreibende frühzeitig zur verursachergerechten Mitverantwortung verpflichtet werden konnte. Darüber hinaus wurde die Erftumgestaltung als bedeutsames wasserwirtschaftliches Vorhaben im WRRL-Bewirtschaftungsplan / Maßnahmenprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV 2010) festgeschrieben.

3. Umsetzungsphase

Die Maßnahmenumsetzung umfasst gemäß Abb. 2 die Gewässerumgestaltung (Kap. 3.1) sowie bergbauliche und abwassertechnische Begleitmaßnahmen (Kap. 3.2).

3.1 Maßnahmen zur Gewässerumgestaltung

Der Erftverband als Maßnahmenträger der Gewässerumgestaltung verfolgt eine Doppelstrategie, bei der zeitgleich übergeordnete Fragestellungen angegangen werden und simultan erste Einzelprojekte geplant und umgesetzt werden.

Übergeordnete Fragestellungen
Einige Schlüsselthemen sind für die Maßnahmenumsetzung im gesamten Plangebiet von hervorgehobener Bedeutung und bedürfen einer vertieften Behandlung. Hierzu zählen folgende Aspekte:

- Bodenschutz: Voraussetzungen für die Umlagerung kontaminierter Auenböden
- Grundwassersensible Nutzungen: Ermittlung zukünftiger Grundwasserflurstände
- Nutzungen: Umgang mit (un)genutzten Wasserrechten
- Regelungen mit Anliegern/Interessengruppen: Kooperationsvereinbarungen
- Flächenmanagement: Frühzeitige Flächensicherung (Flächenpool)
- Klärung von Zuwendungsfragen
- Synergien mit Planungen Dritter

Weiterhin wurde aufgrund verschiedener fachlicher Kriterien ein Durchführungsplan erstellt, der zeitliche Prioritäten für die zukünftige Maßnahmenumsetzung in den 23 Planungsabschnitten benennt. Die herangezogenen Kriterien lauten:

- Wo und wann werden kritische flurnahe Grundwasserstände erreicht?
- An welchen Querbauwerken sollte die ökologische Durchgängigkeit für potamodrome und diadrome Arten (Aal) zeitnah verbessert werden?
- An welchen Standorten ist eine Wasserkraftnutzung zukünftig lukrativ?
- In welchen Planungsabschnitten ist aufgrund günstiger Voraussetzungen (Flächenverfügbarkeit, Synergien, etc.) eine Maßnahme zeitnah umsetzbar?

Der ausgearbeitete Durchführungsfahrplan weist aus, dass die Umsetzung an den ober- und unterstromigen Rändern des Plangebietes beginnen und schrittweise „nach innen“ voranschreiten sollte.

Maßnahmenumsetzung
In einer ersten Stufe konnte an einigen Abschnitten eine Gewässerentwicklung durch Beseitigung der Böschungsbefestigung initiiert werden. Ebenso wurde an einem Querbauwerk ein Umgehungsgerinne hergestellt. Weitere Maßnahmen, die eine Gewässerverlegung oder Laufverlängerung mit Herstellung einer Sekundäraue zum Ziel haben, befinden sich aktuell in der Planung bzw. Genehmigung.

3.2 Bergbauliche und abwassertechnische Begleitmaßnahmen

Die Verpflichtung, die Sümpfungswassereinleitung zu begrenzen, wird durch mehrere Maßnahmen sicher gestellt. Erstens wird in stärkerem Maße als bisher Sümpfungswasser direkt den Braunkohlenkraftwerken zugeleitet. Zweitens wird geprüft, ob weitere thermische Nutzungen des Grundwassers, z.B. beim Spargelanbau, möglich sind. Drittens wird das überschüssige, ungenutzte Sümpfungswasser in der Zukunft anteilig zum Rhein übergeleitet. Das hierfür erforderliche Überleitungssystem wird zurzeit saniert. Zusätzlich werden Maßnahmen zur Belüftung des sauerstoffarmen Sümpfungswassers vor Einleitung in die Erft ergriffen. Die Sauerstoffanreicherung erfolgt durch Einmischung von Luft mittels Schachtüberfall oder Ringkolbenventilen, wobei die Gaslösung unter Überdruck in Tauchschachtkanälen zusätzlich begünstigt werden kann. Zur Minderung stofflicher Belastungen aus der Siedlungsent-

wässerung wird schrittweise die Retention von Misch- und Niederschlagswasser verbessert. Hierbei steht insbesondere der Bau von Retentionsbodenfiltern im Vordergrund.

Abbildung 6: Entfesselung der Erft bei Frimmerdorf (links), Retentionsbodenfilter Bedburg-Kaster (rechts)

4. Fazit

Das Ende des Braunkohlenbergbaus bringt für den Unterlauf der Erft massive wasserwirtschaftliche Veränderungen mit sich. Die Umgestaltung der Erft ist auch jenseits der rechtlichen Erfordernisse (WRRL) erforderlich und ein Generationenprojekt, für das die vielfältigen Anlieger, Nutzer und Interessengruppen in der Region mitgenommen werden müssen. Die Belange des Allgemeinwohls müssen bei den anstehenden Maßnahmen in der Region neu austariert werden, wobei die Individualinteressen gegeneinander abzuwägen sind (KERN 2011). Mit dem Masterplan Erft, dem Perspektivkonzept 2045 und der Rahmenvereinbarung zur Finanzierung konnten wichtige Meilensteine erreicht werden. Die bevorstehende Realisierung des Gesamtvorhabens erfordert zukünftig erhebliche Anstrengungen, zumal unterschiedliche Projektrisiken die termingerechte Umsetzung des Gesamtvorhabens gefährden.

Literatur

EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000, L327.

KERN, U. (2006): Masterplan zur Umgestaltung der Erft im sümpfungswasserbeeinflussten Unterlauf. In: Naturschutz und Freizeitgesellschaft, Bd. Z: Grenzüberschreitendes Gewässermanagement. Hrsg. Th. Reinecke, F. Lehmkuhl & H. Blümel. Academia Verlag, Sankt Augustin, S. 58-83.

KERN, U. (2011): Umgestaltung der Erft in der Kulturlandschaft – quo vadis. In: Historische Wasserbauten im Kontext der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Hrsg: Mühlenverband Rhein-Erft-Rur e.V., Bergheim, S. 47-54.

MUNLV (2010): Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas 2010 – 2015. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. (im Internet abrufbar unter www.flussgebiete.nrw.de)

Die Bedeutung des Wasseraustausches für die Nährstoffretention in einem Fließgewässer-Niedermoor-Komplex

Kirsten Rücker, Joachim Schrautzer

Zusammenfassung

In Fließgewässern wird der Nährstoffrückhalt durch unterschiedliche hydrologische und biogeochemische Prozesse gesteuert. Dazu gehört auch der Wasser- und Stoffaustausch mit angrenzenden Niedermooren.

In der Duvenseebachniederung in Schleswig-Holstein wurde die Nährstoffretention eines Fließgewässer-Niedermoor-Komplexes auf der Zeitskala des hydrologischen Austausches zwischen beiden Systemen untersucht. Tägliche Massenbilanzen von NO_3-N und SRP wurden für drei Vegetationsperioden (2004-2006) berechnet. Als Grundlage wurden Daten verwendet, die an automatischen Messstationen gewonnen wurden.

Das Muster des hydrologischen Austausches diente der Klassifikation typischer Hochwasser- und Basisabfluss-Phasen, deren Abfolge sich in allen Untersuchungsjahren wiederholte. Trotz Wiedervernässungsmaßnahmen in der Niederung kam es 2004 noch zum überwiegenden Nährstoffaustrag, 2005 und 2006 stieg die Retention jedoch deutlich an. Als besonders effektiv erwiesen sich dabei die Phasen sommerlicher Überflutungen (überwiegend Retention in der Niederung) und sommerlicher Niedrigabflüsse (überwiegend gewässerinterne Retention). Eine Steigerung der Retention wurde außerdem im Jahr 2006 durch die unterlassene Makrophytenmahd im Gewässer beobachtet.

1. Einleitung

Fluss- und Bachtäler weisen im naturnahen Zustand ein hohes Potential zum Rückhalt von Nährstoffen auf (SCHRAUTZER et al. 2007). Entwässerung und intensive landwirtschaftliche Nutzung der oft moorreichen Niederungen sowie Flussbegradigungen und – vertiefungen, wie sie in ganz Mitteleuropa vorwiegend während der letzten 60 Jahre durchgeführt wurden, führten jedoch zu einer Umwandlung der Funktion fast aller dieser Ökosystemkomplexe von Nährstoffsenken in Nährstoffquellen (KIECKBUSCH et al. 2006). Die ausgetragenen Nährstoffe belasten potenziell Seen und Meere. Um den Nährstoffrückhalt in Flusstälern zu verbessern, wird in erster Linie die Aktivierung der Speicher- und Transformationsfunktion der Moore sowie die Reduzierung der Mineralisierung ihrer Torfe durch Vernässungsmaßnahmen diskutiert. Wenig ist bislang bekannt über fließgewässerinterne Retentionsprozesse im Zusammenhang mit Austauschprozessen mit angrenzenden Moorflächen. Das liegt u.a. daran, dass die Erfassung des Zeitpunkts, der Dauer und der tatsächlichen Raten von Retentions- und Austragsprozessen noch immer ein Problem üblicher Messprogramme mit wöchentlicher oder geringerer Auflösung darstellt.

In der Duvenseebachniederung in Schleswig-Holstein wurde die Nährstoffretention eines Fließgewässer-Niedermoor-Komplexes auf der Zeitskala des hydrologischen Austausches zwischen beiden Teilsystemen untersucht. Grundlage sind tägliche Massenbilanzen von NO_3-N und SRP, die mit Hilfe automatischer Messstationen erstellt wurden. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich über drei Vegetationsperioden (2004-2006).

2. Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in einem 2 km langen Abschnitt des Duvenseebaches, Schleswig-Holstein, durchgeführt. Das vorgelagerte Einzugsgebiet ist 28 km^2 groß und wird landwirtschaftlich größtenteils intensiv genutzt. Der untersuchte Abschnitt ist begradigt und etwa 2 m in ein Verlandungsniedermoor eingetieft (52 ha). Die Niederung wird durch Regenwasser und Überflutung gespeist. Interflow von den Hängen des seitlichen Einzugsgebietes tritt nur in sehr niederschlagsreichen Jahren auf, aber nicht in dem hier vorgestellten Zeitabschnitt. Durch Wiedervernässungsmaßnahmen wurde die Binnenentwässerung der Niederung im Jahr 2003 aufgehoben. Seitdem erfolgt der Austausch zwischen der Niederung und dem Bach über Grundwasseraustausch, Uferfiltration und Überflutung.

Der Duvenseebach ist ein Fließgewässer zweiter Ordnung mit einem mittleren Abfluss von 0,3 $m^3 s^{-1}$. Die Bachsohle liegt auf dem Niveau der weitgehend wasserundurchlässigen Mudden der Niederung und besteht aus sandig-schluffigem Material sowie aus organischem Substrat.

3. Methoden

An zwei automatischen Messstationen, einer am Gebietseingang („Input“) und einer am Gebietsausgang („Output“), wurden Wasserstände (Drucksensor, GE Sensing), pH-Werte und Sauerstoffkonzentrationen in stündlichen Intervallen direkt im Bach gemessen. Fließgeschwindigkeitsprofile wurden zunächst monatlich, ab 2005 zweiwöchentlich, mit einem elektromagnetischen Fließgeschwindigkeitsmessgerät (Flow-Sens, Seba Hydrometrie) an beiden Stationen erstellt. Die aufgezeichneten Wasserstände jeder Station wurden mithilfe der Wasserstands-Abfluss-Beziehung in Abflüsse umgerechnet.

Mit einer zeitgesteuerten Pumpe wurden alle zwei Stunden 10 ml des Bachwassers entnommen und zu einer täglichen Mischprobe vereinigt. Vor jeder Probennahme wurde das System für zwei Minuten gespült, um Rückstände zu entfernen. Die Proben wurden bei 4 °C in einem integrierten Kühlsystem aufbewahrt und wöchentlich abgeholt. Nach der Ankunft im Labor wurden alle Proben filtriert (0,45 µm) und bis zur Messung in Polyethylen-Flaschen eingefroren. Nitrat-N- und ortho-Phosphat (SRP)-Konzentrationen wurden entsprechend deutscher Standardverfahren bestimmt.

Den Bilanzgleichungen für tägliche Retention liegen die hydrogeologischen Rahmenbedingungen des Gebietes zugrunde: (1) Durch weitgehende Isolation der Niederung vom seitlichen Einzugsgebiet findet nur lateraler Austausch zwischen Bach und Niederung statt, (2) Bach und Niederung sind vertikal durch Mudden abgedichtet und (3) Einträge durch atmosphärische Deposition wurden aufgrund der kleinen Fläche und der hohen zeitlichen Auflösung der Bilanzen vernachlässigt.

Die Nährstofffrachten an der In- und Outputstation wurden durch Multiplikation der täglichen Konzentration (Mischprobe) mit dem täglichen Abfluss berechnet. Die Retention wurde als Änderung in der Massenbilanz auf der Fließstrecke zwischen Input und Output als Anteil der Input-Frachten definiert.

Der hydrologische Austausch zwischen Fließgewässer und Niederung wurde als Differenz der Abflüsse (ΔQ) bachauf- und –abwärts geschätzt. Über diese stark vereinfachte Wasserbilanz wurden die Ergebnisse der Nährstoffbilanzen in drei unterschiedlichen Austauschty-

pen zusammengefasst: (1) Basisabflussbedingungen (Influenz), (2) Niedrigabflussbedingungen (kaum oder kein Austausch) und (3) Hochwasser/ Überflutung (Effluenz und Influenz in Folge). Als Abgrenzungskriterien wurde das Erreichen einer ausgeglichenen Bilanz für die Unterscheidung von Basisabfluss- und Niedrigabflussbedingungen sowie für Hochwasser der Ausgleich der Wasserbilanz bis zu den Bedingungen vor dem Ereignis gewählt.
Unterschiede in den Konzentrationen zwischen den beiden Stationen wurden wegen fehlender Normalverteilung mit dem Mann-Whitney U-Test auf ihre Signifikanz überprüft.

4. Ergebnisse

4.1 Hydrologie

Der hydrologische Austausch zwischen Bach und Niederung (Abbildung 1) diente als Grundlage für die Unterscheidung von drei Typen hydrologischer Konnektivität.

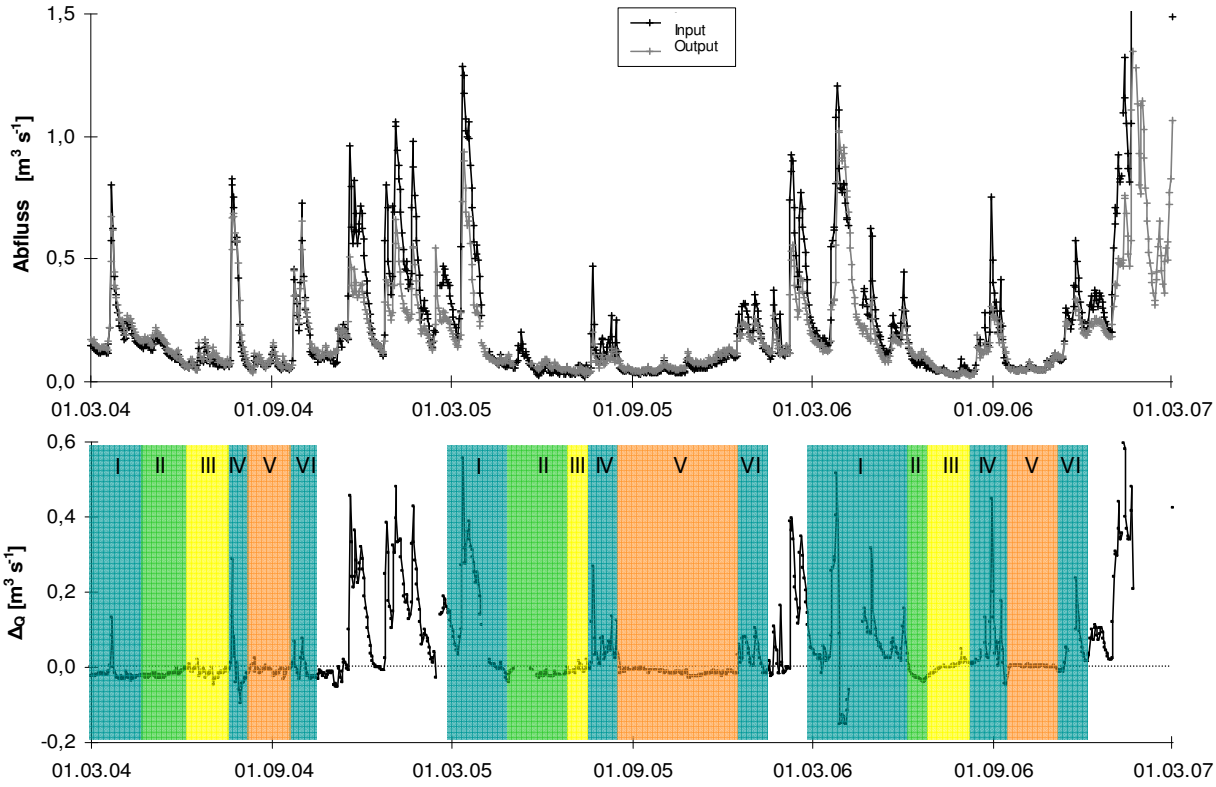


Abb. 1: Oben: Abflüsse an den Messstationen. Unten: Hydrologischer Austausch zwischen Bach und Niederung, geschätzt aus Abflussdifferenzen (positive Werte zeigen Effluenz vom Bach in die Niederung an, negative Influenz); I-VI stehen für die hydrologischen Phasen: (I) Frühjahrshochwasser, (II) Frühjahrsbasisabfluss, (III) frühsommerlicher Niedrigabfluss, (IV) Sommerhochwasser, (V) spätsommerlicher Niedrigabfluss und (VI) Herbsthochwasser.

Eine Abfolge von unterschiedlichen Austauschphasen wurde abgeleitet, die sich in allen Untersuchungsjahren wiederholte: (I) Frühjahrshochwasser, (II) Frühjahrsbasisabfluss mit einem kontinuierlichen Zustrom aus der Niederung in den Bach, (III) frühsommerlicher Niedrigabfluss, (IV) Sommerhochwasser, (V) spätsommerlicher Niedrigabfluss und schließlich

(VI) ein Herbsthochwasser. Lediglich der Zeitpunkt des Auftretens der Phasen und deren Dauer variierten in den einzelnen Jahren.

4.2 Nährstoffkonzentrationen und Retention

Die Nährstoffe zeigten den üblichen saisonalen Verlauf. Die SRP-Konzentrationen waren im Frühjahr gering und stiegen im Sommer an. Im Gegensatz dazu waren die Nitratkonzentrationen im Frühjahr und Herbst jeweils hoch und sanken während des Sommers ab (Abbildung 2).

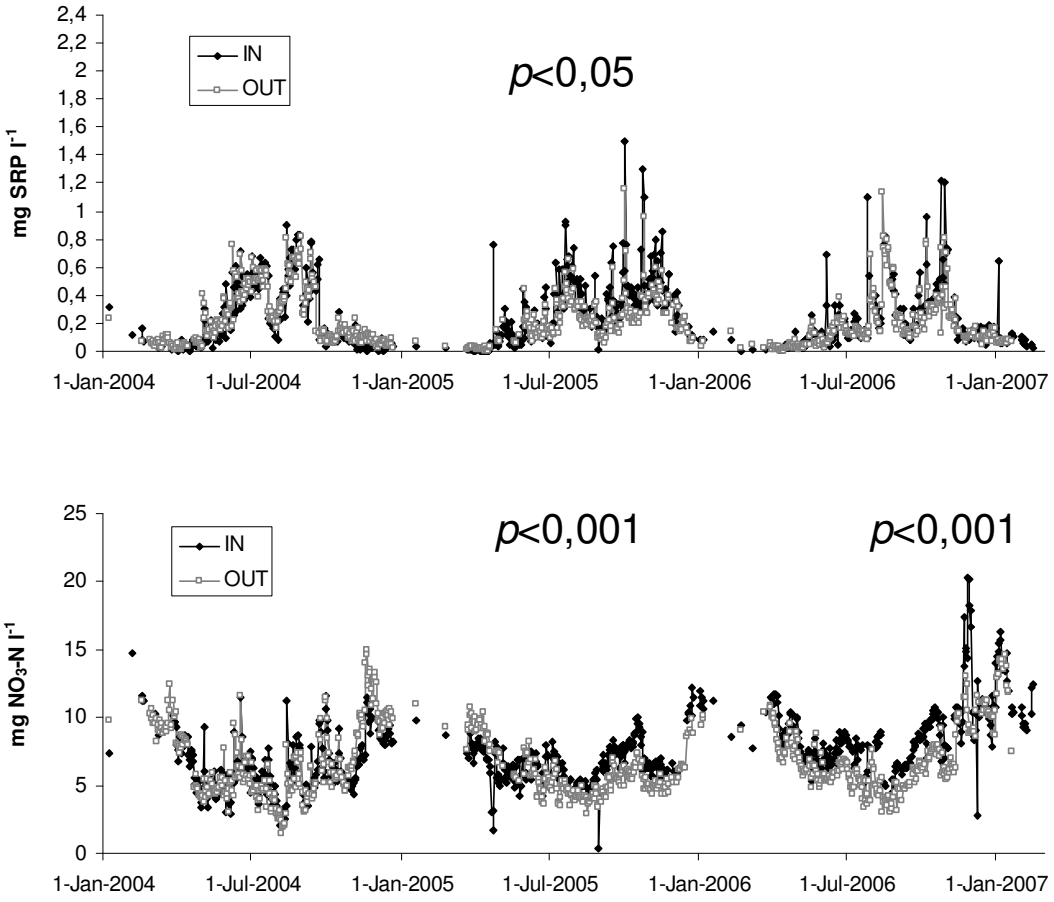


Abb. 2: Konzentrationen von SRP und NO_3-N im Bachwasser, signifikante Unterschiede (Mann-Whitney U-Test) zwischen den Konzentrationen der Input-Station (IN) und der Output-Station (OUT) sind angezeigt

Im Jahr 2005 nahmen die SRP-Konzentrationen im Bachverlauf zwischen der Input- und der Output-Station signifikant ab ($p<0,05$; Mann-Whitney U-Test). Das gleiche ergab sich für die Nitratkonzentrationen der Jahre 2005 und 2006 ($p<0,001$) (Abbildung 2).
Die tägliche Retention von Nitrat und insbesondere von Phosphat zeigt große Schwankungen (Abbildung 3), die im Jahr 2004 am deutlichsten sind. Die Bilanzen der hydrologischen Phasen unterscheiden sich beträchtlich (Tabelle 1).

Tab.1: Nährstoffbilanzen der hydrologischen Austauschphasen. Negative Werte zeigen Austräge und positive Werte Retention an.

		Eintrag		Differenz		Retention	
		Phosphat	Nitrat	Phosphat	Nitrat	Phosphat	Nitrat
		kg/d				%	
2004	I	0,6	125,1	-0,2	-20,0	-33	-16
	II	1,6	48,8	-0,7	-5,6	-44	-11
	III	3,6	43,9	-0,6	-4,4	-17	-10
	IV	7,2	136,4	-0,2	22,8	-3	17
	V	3,9	42,6	-0,04	1,0	-1	2
	VI	2,1	148,7	-0,02	-0,02	-1	0
	Insgesamt	2,9	85,0	-0,3	-4,4	-10	-5
2005	I	0,7	89,8	-0,1	21,3	-16	24
	II	0,7	23,2	-0,4	-10,3	-52	-44
	III	1,1	21,7	0,2	1,6	16	8
	IV	7,4	69,4	4,3	32,1	58	46
	V	2,1	31,4	0,2	0,5	11	2
	VI	2,5	252,8	1,0	84,7	40	34
	Insgesamt	2,1	58,7	0,7	10,3	32	17
2006	I	1,7	240,6	0,7	54,5	43	23
	II	1,0	44,2	-0,4	-3,0	-40	-7
	III	1,5	29,4	0,6	12,3	38	42
	IV	6,6	126,7	2,7	64,7	40	51
	V	2,5	46,1	0,6	13,1	24	28
	VI	3,2	301,2	0,9	107,9	28	36
	Insgesamt	2,5	157,2	0,7	44,3	30	28

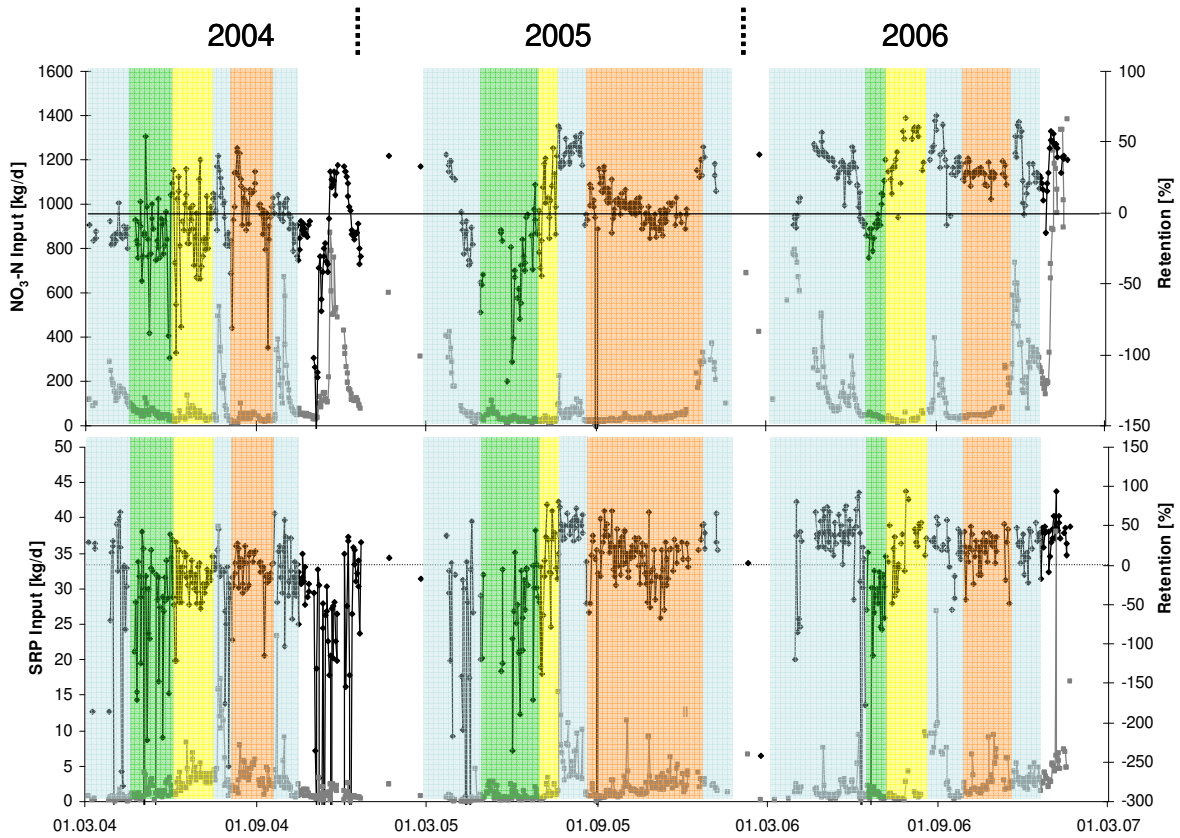


Abb. 3: Eintragsfrachten (Input) (graue Kurve, linke Ordinate) und Nährstoffbilanzen als relative Retention der Eintragsfracht in Prozent (schwarze Kurve, rechte Ordinate); positive Werte der Retention über der Nulllinie kennzeichnen Retention und negative Werte Austräge aus dem Bach-Niederungs-Komplex; I-VI stehen für die hydrologischen Phasen (siehe Abbildung 1).

In allen Untersuchungsjahren kennzeichnen hohe Nitratverluste den Basisabfluss im Frühjahr. Dagegen wirkt das System im Sommer sowohl unter Niedrigabflussbedingungen als auch während des Sommerhochwassers als Nitrat-Senke.
Das System war 2004 noch größtenteils eine Phosphat-Quelle. Im Frühjahr und während des frühsommerlichen Niedrigabflusses traten die höchsten Austräge auf. Während des Sommerhochwassers und des spätsommerlichen Niedrigabflusses waren die Phosphat-Verluste jedoch gering. Im Jahr 2005 stieg die Retention deutlich an. Problematisch blieb 2005 und 2006 jedoch auch die Phase des Frühjahrsbasisabflusses.

5. Diskussion

Insgesamt kam es während der Untersuchungsjahre zu einer Steigerung der Retention von Nitrat und Phosphat. Die negative Nitratbilanz im Frühjahr 2004 lässt darauf schließen, dass im vorherigen trockenen Jahr 2003 durch herbstliche Mineralisationsvorgänge hohe Nitratüberschüsse aufgebaut wurden, die erst im darauf folgenden Frühjahr durch Auswaschung ausgetragen wurden (vgl. RÜCKER & SCHRAUTZER 2010). Die Bilanz der Frühjahrshochwasser-Phasen 2005 und 2006 ist positiv.
Eine einfache Erklärung dafür ist, dass der in diesen Jahren lang anhaltende bordvolle Abfluss den Zustrom von der Niederung in den Bach lange eingedämmt hat. Dagegen führte der kontinuierliche Zustrom von Sickerwasser aus dem Niedermoor während des Frühjahrsbasisabflusses in allen Jahren zu Nitrataustägen aus der Niederung. Vorrangig ist diese Phase jedoch durch vergleichsweise hohe Phosphatausträge und stark negative Phosphatbilanzen gekennzeichnet. Vermutlich wurden in den Torfen des Feuchtgrünlandes durch Mineralisation freigesetzte labile P-Fraktionen mobilisiert und ausgewaschen (vgl. CARLYLE & HILL 2001). Niedrige Temperaturen und hohe Sauerstoffgehalte im Frühjahr dürften die Denitrifikation als entlastenden Prozess im Stickstoffhaushalt gehemmt haben.
Mit den Niedrigwasserphasen des Sommers stieg die relative Bedeutung der Prozesse im Fließgewässer an der Nährstoffretention im Gesamtsystem an, da nur noch wenig bis gar kein Wasseraustausch zwischen Feuchtgrünland und Duvenseebach stattfand. Niedrige Wasserstände erhöhen das Verhältnis von Sedimentoberfläche und Wasservolumen (ALEXANDER et al. 2000), was eine intensive Transformation im Sediment erlaubt (HILL et al. 1998). Viele Studien zeigen, dass Denitrifikation ein effektiver Prozess der Nitrat-Retention im Fließgewässer sein kann (PETERSON et al., 2001). Hohe Gewässertemperaturen bewirkten im Duvenseebach vermutlich verstärkt den Abbau organischer Substanz. Mit hohen DOC-Konzentrationen (zusätzliche Messungen: 10 mg l^{-1} im Mittel) sowie niedrigen Sauerstoffgehalten herrschten Bedingungen, die die Denitrifikation begünstigen (vgl. HILL et al. 1998). Auch die Bedingungen für eine Phosphatretention verbesserten sich, da niedrige Fließgeschwindigkeiten die Adsorption im Sediment und die biotische Aufnahme fördern (KRONVANG et al. 1999). Andererseits könnte P-Rücklösung aus dem Bachsediment die Gesamtbilanz der sommerlichen Niedrigabflussphasen beeinflusst haben. Im Jahr 2006 wurden durch das Unterlassen der sonst üblichen Gewässermahd im Spätsommer noch günstigere Bedingungen für die Retention geschaffen.
Für ein renaturiertes Altarm-Feuchtgebiet berichten FINK & MITSCH (2007) von einer Retention von N und P während Überflutungen im Frühjahr und von Austrägen während solcher

Ereignisse im Sommer. Im Gegensatz zu unseren Erwartungen waren die P-Austräge während der Sommerhochwasser-Ereignisse in der Duvenseebachniederung trotz niedriger Sauerstoffgehalte im Überflutungswasser gering. Die Ursachen hierfür könnten in einem bereits ausgeschöpften Pool labiler P-Fraktionen nach den hohen Verlusten im Frühjahr und in der geringen Dauer des Austausches liegen. Dennoch war die Verweilzeit des Wassers jeweils insgesamt lang genug, um für eine intensive Denitrifikation in der Niederung und damit eine positive Nitratbilanz zu sorgen.

Die zeitlich hoch aufgelösten Untersuchungen zum Wasser- und Nährstoffhaushalt der Duvenseebachniederung tragen zum besseren Verständnis der Funktion kleiner Fließgewässer und ihrer angrenzenden Niederungen im Landschaftshaushalt bei. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nährstoffretention in diesen Ökosystemen während des Jahresverlaufes stark schwanken kann und dass die hydrologische Konnektivität zwischen den Teilsystemen für die Retention von hoher Bedeutung ist. Sie zeigen aber auch, dass kleine Fließgewässer in der Summe ein hohes Potential für den Nährstoffrückhalt in der Landschaft aufweisen.

Literatur

ALEXANDER, B.A. et al. (2000): Effect of stream channel size on the de-livery of nitrogen to the Gulf of Mexico. Nature 403, pp. 758-761

CARLYLE, G.C. & A. R. HILL (2001): Groundwater phosphate dynamics in a river riparian zone: effect of hydrological flowpaths, lithology and redox chemistry. J. Hydrol. 247, pp. 151-168

FINK, D.F. & W. MITSCH (2007): Hydrology and nutrient biogeochemistry in a created river diversion oxbow wetland. Ecol. Eng. 30, pp. 93-102

HILL, A. R. et al. (1998): Hyporheic zone hydrology and nitrogen dynamics in relation to the streambed topography of a N-rich stream. Biogeochemistry 42, pp. 285-310

KIECKBUSCH, J.J. et al. (2006): Spatial heterogeneity of water pathways in degenerated riverine peatlands. Basic and Applied Ecology 7, pp. 388-397

KRONVANG, B. et al. (1999): Retention of nutrients in river basins. Aquat. Ecol. 33, pp. 29-40

PETERSON, B.J. et al. (2001): Control of nitrogen export from watersheds by head-water streams. Science 292, pp. 86-90

SCHRAUTZER, J. et al. (2007): Succession and restoration of drained fens: Perspectives from Northwestern Europe. –In: Linking Restoration and Ecological Succession Hrsg. L. R. Walker et al., Springer, New York, pp. 90-120

Abwasserwiederverwendung: Eine Option im Flussgebietsmanagement?

Ingo Heinz

Zusammenfassung

Die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser kann zur Behebung von Engpässen in der Wasserversorgung sowie zum Schutz von Gewässern und Ökosystemen beitragen. Die Abwasserwiederverwendung in der Landwirtschaft verringert nicht nur Ertragsaufälle in Trockenzeiten, sondern ermöglicht auch Ertragszuwächse. Zahlreiche Beispiele finden sich nicht nur in den Entwicklungsländern, sondern insbesondere auch in südlichen Ländern Europas, wie in Spanien. Treffen die Prognosen der Klimaforscher zu, so muss mit verlängerten Trockenperioden gerechnet werden, so dass die Abwasserwiederverwendung an Bedeutung gewinnen wird.

Die meisten Untersuchungen auf dem Gebiet der Abwasserwiederverwendung konzentrieren sich auf technische und hygienische Aspekte. Fragen zur Wirtschaftlichkeit werden nur selten behandelt. Um die Zweckmäßigkeit der Abwasserwiederverwendung in Flusseinzugsgebieten beurteilen zu können, müssen die Kosten den Nutzen gegenübergestellt werden. Es entstehen Zusatzaufwendungen in der Aufbereitung, Speicherung und Zuführung des Abwassers. Zu den Nutzen zählen die verbesserten Ertragsbedingungen in der Landwirtschaft, die reduzierten Abwassereinträge in Flüsse, die Sanierung von übernutzten Grundwasservorräten und die Rekultivierung von Biotopen. Werden durch die Abwasserwiederverwendung Wasserressourcen in der Landwirtschaft freigesetzt, so können diese zur Verbesserung der kommunalen Wasserversorgung eingesetzt werden. Bei der Bewertung müssen auch die Risiken (z.B. Grundwasserkontamination) berücksichtigt werden.

In einer vor kurzem veröffentlichten Untersuchung der UN Food and Agriculture Organisation (FAO) wurde eine Methode zur Bewertung der Kosten und Nutzen der Abwasserwiederverwendung entwickelt. Die praktische Umsetzung dieser Methode erfolgte anhand von Fallbeispielen in Spanien und Mexico.

1. Einleitung

Die spezifischen Ausprägungen von Wasserproblemen unterscheiden sich je nach den regionalen und örtlichen Gegebenheiten. Auch der Klimawandel wirkt sich auf die örtlichen Wassereinzugsgebiete in verschiedener Weise aus. Insbesondere im Mittelmeerraum finden sich zahlreiche Gebiete, in denen Wasser eine äußerst knappe Ressource darstellt. Die Absenkung des Grundwasserspiegels, das Versiegen von Flussläufen, die Versalzung des landseitigen Grundwassers und die übermäßige Schadstoffbelastung der Gewässer sind dort an der Tagesordnung. In vielen wasserarmen Ländern ist die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser unverzichtbar. Im Vordergrund steht hierbei die landwirtschaftliche Bewässerung. Man geht davon aus, dass für etwa 10% der Weltbevölkerung die Versorgung mit landwirtschaftlichen Produkten auf der Bewässerung mit Abwasser beruht (WHO-FAO-UNEP 2006). Für Hanoi in Vietnam wird dieser Anteil sogar auf bis zu 80% beziffert. Anderen Schätzungen zufolge werden in den europäischen Ländern des Mittelmeerraums 44% des kommunalen Abwassers in der Landwirtschaft genutzt (JEMINEZ & ASANO 2008). Für Spanien liegt die-

ser Anteil bei 22%. Auch in den USA ist die Abwasserwiederverwendung zu Bewässerungszwecken weitverbreitet, insbesondere in Kalifornien. In Israel werden bis zu 75% des kommunalen Abwassers in der Landwirtschaft wiederverwendet (JIMENEZ & ASANO 2008). Ein besonders prominentes Beispiel ist Mexiko-Stadt, deren Abwässer in der Größenordnung von jährlich 750 Mm^3 unaufbereitet über offene Kanäle und zahlreiche Absetzbecken zu den landwirtschaftlichen Anbaugebiete im Tula Valley geleitet werden (FAO 2010).
Die technischen und hygienischen Voraussetzungen der Abwasserwiederverwendung sind Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen (ASANO et al. 2006). Auch in Deutschland werden sie zuweilen thematisiert (EGGERS 2008). Eine der wenigen ökonomischen Untersuchungen ist die von der UN Food and Agriculture Organization herausgegebene Studie „The wealth of waste. The economics of wastewater use in agriculture“ (FAO 2010), auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2. Methodischer Ansatz

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Abwasserwiederverwendung bietet sich die Kosten-Nutzen-Analyse an. Zu ermitteln sind die Kosten zusätzlicher Aufbereitungsverfahren (z.B. Umkehrosmose) sowie der Anlagen zur Speicherung und Weiterleitung des aufbereiteten Abwassers zu den landwirtschaftlichen Anbaugebieten. Sofern bei den Landwirten zusätzliche Kosten in der Bewässerungstechnik entstehen, sind sie mit zu erfassen. Zu berücksichtigen sind auch die Aufwendungen für den Transport und die Speicherung des von der Landwirtschaft freigesetzten Frischwassers, das zu anderen Zwecken, wie etwa für die der kommunale Trinkwasserversorgung, genutzt werden kann. Zu den Nutzen bei den Landwirten zählen die Kosteneinsparungen in der Wasserförderung (z.B. Grundwasser) sowie im Düngemitteleinsatz, der wegen des Nährstoffgehalts des Abwassers geringer sein kann. Ertragseinbußen aufgrund ausbleibender Regenniederschläge werden vermieden, da die Zuleitung von Abwasser eine verlässliche Wasserversorgung darstellt. Unter Umständen können sogar die Anbauflächen vergrößert und die Erträge erhöht werden. Der Nutzen für die kommunale Wasserversorgung besteht darin, dass trotz steigendem Wasserbedarf (z.B. Bevölkerungswachstum) oder geringerer Niederschlagsmengen (z.B. Klimawandel) womöglich auf Projekte in der Wassererschließung verzichtet werden kann. Unter Umständen kann schadstoffbelastetes Rohwasser durch qualitativ hochwertiges Wasser ersetzt werden. Geringere Übernutzung von Wasserressourcen, und reduzierte Abwassereinleitungen in Flüsse und Küstengewässer sind weitere Vorteile. In vielen Entwicklungsländern ist die Abwassernutzung zu Bewässerungszecken zur Sicherstellung der Ernährung der Bevölkerung unverzichtbar. Andererseits ist mit Gesundheitsrisiken und Umweltschäden zu rechnen, wenn die Anforderungen in der Abwasseraufbereitung oder die Auflagen in der Bewässerung nicht oder unzureichend eingehalten werden (WHO-FAO-UNEP 2006).
Im Idealfall überwiegen die Gesamtnutzen die Gesamtkosten der Abwasserwiederverwendung, so dass sich alle besserstellen (Abbildung 1). Es ist möglich, den ökonomische Nutzen einer verbesserten Trinkwasserversorgung unter Verwendung des Wasserpreises zu bewerten. Dieser spiegelt nicht nur die Aufwendungen wider, die zur Sicherstellung der Wasserversorgung langfristig notwendig sind, sondern auch die Wertschätzung aus der Sicht der Wasserverbraucher.

Bei nur geringfügigen Einkommensverbesserungen der Landwirte liegt es nahe, sie mit Ausgleichszahlungen dazu motivieren, aufbereitetes Abwasser einzusetzen und sich am „Wassertausch“ zu beteiligen. Ein „Wassertausch“ kommt aber nur dann zustande, wenn Landwirte über ausreichende Mengen an einwandfreiem Frischwasser (z.B. aus Grundwasservorkommen oder Talsperren) verfügen, während gleichzeitig die Kommunen unter Wassermangel leiden. Weltweit ist die Landwirtschaft bekanntlich der größte Wassernutzer. In Spanien liegt der Anteil der landwirtschaftlichen Bewässerung am Gesamtwasserbedarf bei 65% (FAO 2011).

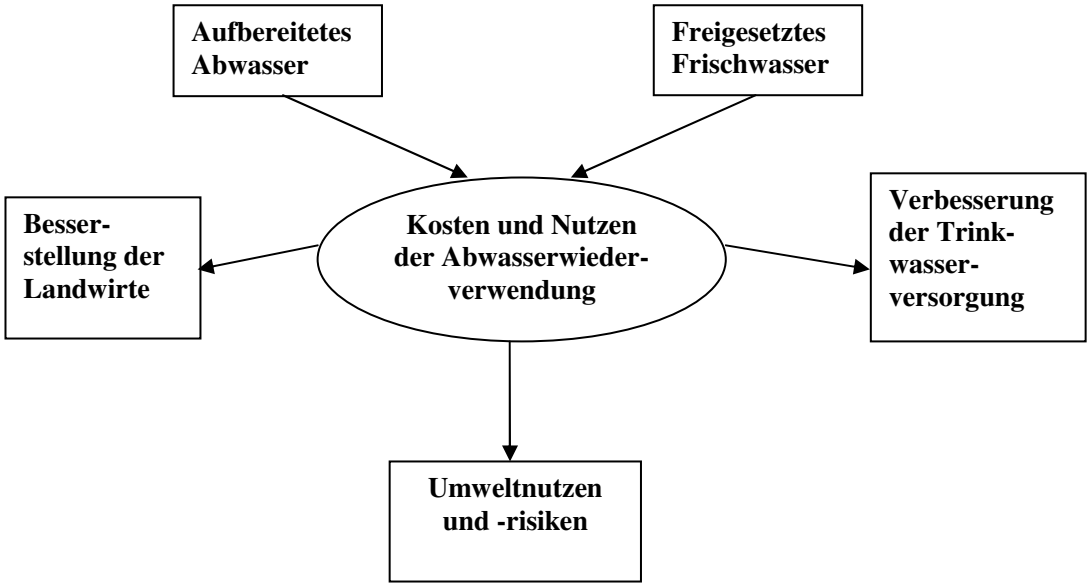


Abb. 1: Ökonomische Bewertung der Abwasserwiederverwendung

3. Ergebnisse

Im Llobregat Delta im Nordosten Spaniens findet sich ein eindrucksvolles Beispiel eines integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) in Verbindung mit der Abwasserwiederverwendung. Der ca. 170 km lange Llobregat entspringt in den östlichen Pyrenäen und mündet bei Barcelona in das Mittelmeer. Der in den zurückliegenden Jahren erheblich schadstoffbelastete Fluss dient zur Wasserversorgung sowohl der Landwirtschaft als auch des Großraums Barcelona. Er ist Vorfluter mehrerer Abwasseraufbereitungsanlagen. Hinzu kommen bergbaubedingte Salzeinträge. Weitere Belastungsfaktoren sind sporadisch auftretende Hochwasserereignisse sowie lang anhaltende Trockenzeiten. In dem an Industrie- und Gewerbegebieten und am Flughafen Barcelonas gelegenem Delta, befinden sich ökologisch wertvolle Feuchtgebiete. Die örtlichen Grundwasservorkommen dienen ebenfalls zur Wasserversorgung Barcelonas (1,6 Millionen Einwohner) und der umgebenden Orte. Für die Bewässerung der beidseits des Flusses gelegenen landwirtschaftlichen Anbaugebiete wird zwischen Mai und September sowohl Grund- als auch Flusswasser entnommen. Angebaut wird Wein, Oliven, Gemüse und im geringeren Umfang Getreide.

Die übermäßige Grundwasserförderung vergangener Jahre hat zur zunehmenden Versalzung durch Meerwasserintrusion geführt. Unmittelbar vor der Trinkwassergewinnungsanlage

Sant Joan Despí der Stadt Barcelona werden große Mengen aus dem Llobregat entnommen und über den Canal de la Dreta zu den landwirtschaftlichen Anbaugebieten geleitet (Abbildung 2). Obgleich bis zu 50% des Wasserbedarfs der Metropole Barcelona von dem 60 km im Norden gelegenen Fluss Ter gedeckt werden kann, kommt es bei längerem Ausbleiben von Regenniederschlägen nicht selten zu gravierendem Engpässen in der kommunalen Wasserversorgung. Vor allem der Tourismus und die anhaltende Bautätigkeit bewirkte einen Anstieg des Wasserbedarfs. Die Wiederverwendung von aufbereitetem kommunalem Abwasser in der Landwirtschaft wird daher von der Katalonischen Wasserbehörde Agència Catalania de l'Aiqua (ACA) als vordringlich angesehen und vorangetrieben. Gleichwohl beschloss sie zusätzlich den Bau einer Meerwasserentsalzungsanlage, die soeben mit einer Kapazität von 60 Millionen m³ pro Jahr errichtet wurde.

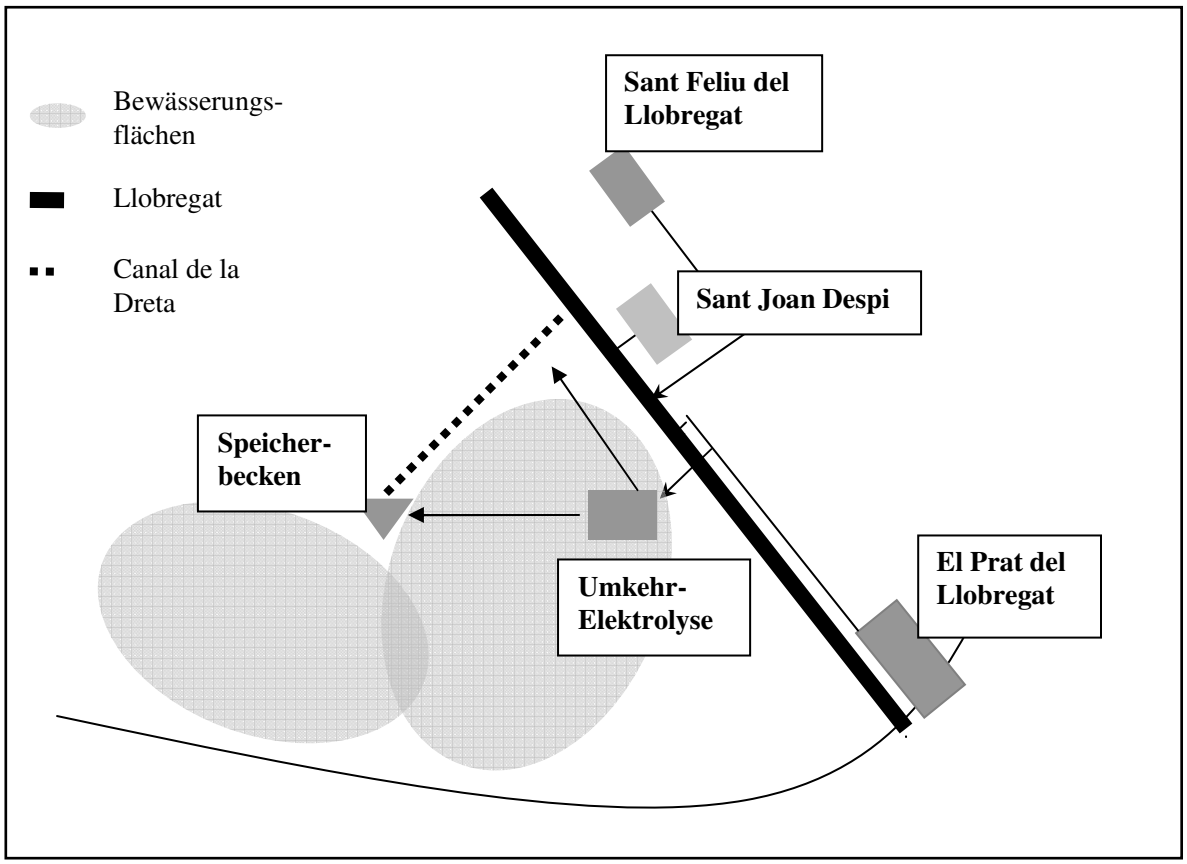


Abb. 2: Wiederverwendung des in der Anlage El Prat de Llobregat aufbereitetem Abwassers zur Bewässerung landwirtschaftlicher Anbauflächen

Von Bedeutung sind die kommunalen Abwasseraufbereitungsanlagen Sant Feliu de Llobregat (26 Millionen m³ pro Jahr) und El Prat Llobregat (120 Millionen m³ pro Jahr) auf der linken Seite des Llobregats (Abbildung 2). In beiden Fällen können die gereinigten Abwässer zur Bewässerung landwirtschaftlicher Anbauflächen von derzeit 801 ha bzw. 275 ha eingesetzt werden. Die zuletzt genannte unmittelbar an der Küste gelegenen Aufbereitungsanlage zählt zu den größten in Europa. Neben der bereits genannten Zielsetzung der Abwasserwiederverwertung, werden die gereinigten Abwasser auch zur Flusswasseranreicherung, Erhaltung von Feuchtgebieten und zur Reduzierung der Meerwasserintrusion genutzt. Die Aufbe-

reitungsanlage ist dementsprechend mit unterschiedlichen Reinigungsstufen ausgestattet (wie z.B. Umkehrosmose und Umkehr-Elektrolyse) (MUJERIEGO et al. 2008). Die Verwendung des gereinigten Abwassers zu Bewässerungszwecken stößt bei den Landwirten noch auf Skepsis, zumal sie auf Grundwasservorkommen und Flusswasser zurückgreifen können. Eine große Rolle spielte auch der hohe Salzgehalt, der jedoch durch eine zusätzliche Aufbereitungsstufe (Umkehr-Elektrolyse) reduziert werden konnte. In Trockenzeiten können die Landwirte aber von der Wasserbehörde zur Verwendung des Abwassers gezwungen werden.

Um die Landwirte zu überzeugen, gilt es nachzuweisen, dass sie sich besserstellen, wenn sie das gereinigte Abwasser nicht nur gelegentlich nutzen. Bei einer reduzierten Entnahme von Grund- und Flusswasser für die Bewässerung stünde zusätzliches Wasser für die kommunale Trinkwasserversorgung zur Verfügung. Hinzu kämen eine Reihe ökologischer Vorteile, wie die Erhaltung der Feuchtgebiete und die Rekultivierung aquatischer Ökosysteme aufgrund der verbesserten Wasserführung des Llobregat.

Zur Beurteilung, ob ein „Wassertausch“ ökonomisch gerechtfertigt ist, bietet sich die Kosten-Nutzen-Analyse an. Zu den Kosten zählen neben den zusätzlichen Abwasseraufbereitungsverfahren die Anlagen für die Wasserspeicherung und - verteilung. Die Anlagekosten allein für die Verringerung des Salzgehalts durch Umkehr-Elektrolyse beträgt 15,9 Millionen Euro. Die Betriebs- und Unterhaltungskosten werden auf 0.23 €/m³ beziffert. Der Investitionsaufwand für das gesamte Projekt unter Berücksichtigung der landwirtschaftliche Bewässerung, der Flusswasseranreicherung, der Erhaltung der Feuchtgebiete und Reduzierung der Meerwasserintrusion beläuft sich auf 102 Millionen Euro, wovon 85% aus EU-Fördermitteln und 15% von der Wasserbehörde ACA finanziert werden (MUJERIEGO et al. 2008).

Auf der Grundlage der Annuitätenmethode lassen sich die jährlichen Kosten des „Wassertausches“ berechnen (LAWA 2005). Im vorliegenden Beispiel der Abwasseraufbereitungsanlage El Prat Llobregat betragen sie 5,2 Millionen Euro pro Jahr. Dem stehen insgesamt 14,7 Millionen Euro pro Jahr an ökonomischen Nutzen infolge der verbesserten Trinkwasserversorgung Barcelonas gegenüber. Für die Berechnung wurde eine freigesetzte Frischwassermenge von 13 Millionen m³ pro Jahr sowie ein durchschnittlicher Wasserpreis von 1,11 €/m³ (2008) angenommen. Dieser Wasserpreis ist nicht kostendeckend, wie es die Europäische Wasserrahmenrichtlinie in Artikel 9 verlangt. Die Anlagenkosten in der Wasserversorgung werden nur teilweise über den Wasserpreis finanziert (ACA 2007). Die ACA hat bereits angekündigt, bis 2015 den Wasserpreis um 56% anzuheben. Derzeit sei eine Kostendeckung von nur 68% gegeben (ACA 2010). Somit wäre der ökonomische Nutzen des zusätzlichen verfügbaren Trinkwassers entsprechend höher anzusetzen. Unter Zugrundelegung des Wasserpreises von 1,11 €/m³ errechnet sich bereits ein Nettonutzen von mindestens 9.5 Millionen Euro pro Jahr. Hinzu kommen die Einkommensverbesserungen der Landwirte in Höhe von insgesamt 351000 € pro Jahr (oder 437 €/ha) aufgrund der erwähnten Kosteneinsparungen. Danach wäre ein „Wassertausch“ zwischen der Landwirtschaft und der Stadt Barcelona im jeden Fall wirtschaftlich von Vorteil. In Anbetracht des hohen Nutzenzuwachses für die Wasserversorgung Barcelonas bietet es sich an, die Landwirte durch Ausgleichszahlungen dazu zu bewegen, das gereinigte Abwasser einzusetzen und auf die Grund- bzw. Flusswasserförderung weitgehend zu verzichten.

Die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers der Aufbereitungsanlage Sant Feliu de Llobregat wäre ebenfalls von Vorteil. Den jährlichen Kosten für eine weitere Aufbereitungsstufe und ein zusätzliches Wasserverteilungsnetz von 1,6 Millionen Euro stünde ein ökonomischer Nutzen von insgesamt mindestens 8,58 Millionen Euro gegenüber. Darin sind 461000 € pro Jahr Einkommensverbesserungen für die Landwirte enthalten.
In Mexiko findet sich ein Beispiel, wo das zu Bewässerungszwecken genutzte Wasser aus einer Talsperre mit aufbereitetem Abwasser ersetzt wird. Die 800 km nördlich von Mexiko-Stadt gelegene Stadt Durango (527 000 Einwohner) ist seit Jahren mit wachsendem Wasserbedarf konfrontiert und deckt diesen aus nahezu erschöpften Grundwasservorkommen. Im Jahre 1999 wurde mit den Landwirten eine Vereinbarung getroffen, in einem Teil der Bewässerungsfläche des Guadalupe Victoria Irrigation Module jährlich 10 Millionen m³ aufbereitetes Abwasser einzusetzen. Das freigesetzte Wasser der Talsperre Guadalupe Victoria (Kapazität 90 Millionen m³) steht somit der kommunalen Trinkwasserversorgung zur Verfügung. Die Landwirte stellen sich besser, weil sie ihre Erträge steigern und Kosten im Düngemitteleinsatz einsparen können (58 €/ha bei einer Fläche von 2775 ha). Die Stadt Durango erhält qualitativ hochwertiges Wasser aus der Talsperre. Die Kosten des „Wassertausches“ sind im Wesentlichen die Aufwendungen für die Wasserverteilung (570 000 € pro Jahr). Das Abwasser muss nicht zusätzlich aufbereitet werden, da es die Qualitätsanforderungen bereits erfüllt. Für die Stadt ergeben sich Kosteneinsparungen in der Förderung des Grundwassers, das bislang aus tiefen Schichten entnommen werden musste.
Die Kosten-Nutzen-Bilanz im vorliegenden Fall könnte sich entscheidend verbessern, wenn mehr Talsperrenwasser freigesetzt werden würde. So wäre es möglich, eine Talsperrenwassermenge im Umfang von jährlich 63 Millionen m³, die derzeit der gesamten Bewässerungsfläche des Guadalupe Victoria Irrigation Module (9400 ha) zur Verfügung steht, durch kommunales Abwasser zu ersetzen. Der Nutzen für die Stadt bestünde in der zusätzlichen Trinkwassermenge, die mit dem Wasserpreis zu bewerten wäre. Neben einer zusätzlichen Trinkwasseraufbereitungsanlage (bereits in Planung) wäre eine Erweiterung der Anlagen für die Wasserzuleitung und –speicherung erforderlich. Entsprechend einer Hochrechnung kann ein ökonomischer Nettonutzen in der Größenordnung von 22 Millionen € pro Jahr angenommen werden.
Ein weiteres Beispiel, wo bislang für die landwirtschaftliche Bewässerung genutztes Talsperrenwasser durch kommunales Abwasser ersetzt wird, findet sich im Einzugsgebiet des Flusses Zadorra im Baskenland, Spanien. Die Abwasserwiederverwendung und der „Wassertausch“ sind Bestandteil eines gemeinsamen Wasserressourcenmanagements der Städte Vitoria-Gasteiz und Bilbao, die häufig unter Wassermangel leiden (MUJERIEGO & LÓPEZ 2008).

4. Zusammenfassung

Die Abwasserwiederverwendung in der landwirtschaftlichen Bewässerung spielt besonders in Regionen mit Wassermangel eine große Rolle. Sie trägt dazu bei, dass natürliche Wasserressourcen weniger übernutzt, aquatische Ökosystemen geschützt und Steigerungen des Wasserbedarfs gedeckt werden. Auch der wirtschaftliche Nutzen ist zu berücksichtigen. Wie die untersuchten Fallbeispiele belegen, kann die Abwasserwiederverwendung die am „Was-

sertausch“ Beteiligten besserstellen („win-win-situation“): Die Landwirte erzielen Einkommensversbesserungen aufgrund von Kosteneinsparungen und höheren Erträgen. Die kommunale Wasserversorgung wird verbessert, weil sie über zusätzliche Wasserressourcen verfügt. Es liegt nahe, den zusätzlichen Trinkwassernutzen mit dem Wasserpreis zu bewerten. Denn dieser spiegelt nicht nur die Aufwendungen wider, die zur Sicherstellung der Wasserversorgung notwendig sind, sondern drückt auch den Wert des Wassers für die Verbraucher aus. Besonders in Ländern, die unter Wassermangel leiden, decken die Wasserpreise oft nicht die Kosten der Wasserversorgung, wie es die Europäische Wasserrahmenrichtline in Artikel 9 verlangt. Unter Zugrundelegung kostendeckender Wasserpreise wären die wirtschaftlichen Vorteile weitaus höher als in den Fallbeispielen berechnet wurde. Unter bestimmten Bedingungen sollten Landwirte Ausgleichszahlungen erhalten, wenn sie aufbereitetes Abwasser nutzen und Frischwasser freisetzen.

Die Abwasserwiederverwendung wird vielerorts als wichtige Komponente eines integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) betrachtet, wie die Beispiele in den Flussgebieten Llobregat und Zadorra in Spanien zeigen. Bei der Abwasserwiederverwendung gilt es, zugleich mehrere Ziele zu verfolgen: Sicherstellung der Wasserversorgung der Landwirtschaft, Industrie und Bevölkerung, Gewässerreinhaltung, Grundwasseranreicherung, Niedrigwasseraufhöhung von Flüssen, Reduzierung von Meerwasserintrusion und Biotopenschutz. Letztlich geht es darum, die vorhandenen Ressourcen an Grund-, Fluss-, Talsperren- und Abwasser auf die konkurrierenden Nutzungsanforderungen möglichst optimal zu verteilen.

Literatur

ACA (2007): Implementation of the Water Framework Directive in Catalonia. Pressures and Impacts Analysis, Agència Catalania de l’Aigua, Barcelona

ACA (2010): Press release of 4 May. Agència Catalania de l’Aigua, Barcelona

ASANO, T. (2006): Water Reuse. New York

EGGERS, T.: Verregnung von geklärtem Abwasser auf 3000 ha landwirtschaftlich genutzten Flächen. – In: GWF Wasser-Abwasser, 149, Nr.13, S. 25-31

FAO (2010): The wealth of waste. The economics of wastewater use in agriculture. Rome

FAO (2011): Country fact sheet. Aquastat, Rome

JIMENEZ, B. & T. ASANO (2008): Water Reuse. An international survey of current practice, issues and needs. IWA Publishing, London

MUJERIEGO, R. et al. (2008): The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain. – In: Water Science & Technology-WST, IWA Publishing, No. 4, pp. 587-574

MUJERIEGO, R. & J. LÓPEZ (2008): Water reuse and integrated water resources management in Vitoria-Gasteiz, Spain. – In: Water Practice & Technology, IWA Publishing, Vol. 3, No. 2

LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin

WHO-FAO-UNEP (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water. Volume II: Wastewater use in agriculture. Geneva. Switzerland

Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren: Konflikt zwischen Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung

Lothar Paul, Tilo Ihle, Klaus-Joachim Prien

Zusammenfassung

Eine weitgehend störungsfreie und kosteneffiziente Wasseraufbereitung während der Sommerstagnation (SST) ist in der Regel nur zu gewährleisten, wenn Rohwasser aus dem Hypolimnion von Trinkwassertalsperren (TS) bereitgestellt werden kann. Mit Hilfe eines einfachen mathematischen Ansatzes wird am Beispiel sächsischer TS mit Hochwasserschutzfunktion gezeigt, dass es aufgrund zu kurzer theoretischer Verweilzeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit zur frühzeitigen Erschöpfung des Hypolimnions kommt und dadurch die Nutzung qualitativ minderwertigen epilimnischen Rohwassers erforderlich wird. Es wird ein Verfahren zur Bestimmung des wassergütewirtschaftlichen Mindeststauinhalts und -hypolimnionvolumens vorgestellt, die erforderlich sind, um vorgegebene Minimalanforderungen der Rohwassergüte mit hoher statistischer Sicherheit bis zum Ende der SST zu erfüllen. Die Anwendung des Verfahrens auf sächsische TS zeigt, dass Hochwasserschutz und Einhaltung von Wassergütemindestanforderungen nur gleichzeitig zu gewährleisten sind, wenn im Falle starker Zuflüsse der Entlastungsbetrieb anstatt über die Grundablässe zumindest teilweise über leistungsfähige epilimnische Abgabeeinrichtungen erfolgt. Die Untersuchungen zeigen, dass die herkömmliche Auffassung, ein hohes Dargebot biete eine hohe Sicherheit der Trinkwasserbereitstellung, in TS mit Hochwasserschutzfunktion differenziert betrachtet werden muss. Es sind meist nicht die trockenen, sondern häufig die nassen Sommer, die die Trinkwasserversorgung potenziell beeinträchtigen.

1. Einleitung

Die Stauanlagennorm DIN 19700 in der aktuellen Fassung vom Juli 2004 regelt die Grundsätze des wasserwirtschaftlichen Betriebes von TS in Deutschland. Die Teile 10 und 11 geben insbesondere Leitlinien für eine integrale TS-Bewirtschaftung vor, welche auf eine ganzheitliche Betrachtung teilweise konkurrierender wassermengenwirtschaftlicher Ziele (Hochwasserschutz, Rohwasserbereitstellung, Unterwasserabgabe) und der Gütesicherung ausgerichtet sind. Zeitnah mit der Novellierung der DIN 19700 hat sich der Arbeitskreis "Talsperrenbewirtschaftung" der Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT) eingehend mit den Inhalten der integralen TS-Bewirtschaftung befasst. Es wurden Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur Erstellung optimierter Bewirtschaftungskonzepte erarbeitet und als fachliches Regelwerk veröffentlicht (ATT 2009).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem Teilaspekt, dem Konflikt zwischen Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung aus TS. Dieser äußert sich u.a. darin, dass bei Wahrnehmung der Hochwasserschutzfunktion ein Entlastungsbetrieb in der Regel über die Grundablässe erfolgt. Auf der Grundlage eines einfachen mathematischen Ansatzes wird am Beispiel sächsischer TS gezeigt, dass dies während der SST mit hoher Wahrscheinlichkeit in TS mit theoretischen Verweilzeiten von weniger als einem Jahr zu einer schnellen und frühzeitigen Erschöpfung des Hypolimnions führt und damit zur Nutzung qualitativ minderwerti-

gem epilimnischen Rohwassers zwingt. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, im Rahmen der Erstellung des Wasserwirtschaftsplans einer TS mit Hilfe eines in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens die wassergütewirtschaftlichen Mindeststauinhalte und -hypolimnionvolumina zu bestimmen, die erforderlich sind, um vorgegebene Minimalanforderungen der Rohwassergüte mit hoher statistischer Sicherheit bis zum Ende der SST zu erfüllen.

2. Eingangsdaten und grundlegende Annahmen

Die Eingangsdaten für die Berechnungen werden abgeleitet aus Dauerkurven möglichst vieljähriger Reihen der Temperaturen T_{ZU} der Zuflüsse, der vertikalen Temperaturverteilung T_z in der TS, von Vertikalprofilen relevanter Wassergütevariablen (z. B. O2-Konzentration, Trübung, gelöstes Mn, …) und täglichen Werten des Zuflusses Q_{ZU}. Alternativ bzw. ergänzend können Resultate eines geeigneten NA-Modells sowie eines hinreichend validierten hydrophysikalisch-ökologischen Modells Verwendung finden. Des Weiteren sind morphometrische Daten (Stauinhaltstabelle), TS-Bauwerksdaten (Höhen und Kapazitäten der Betriebs- und Grundauslässe) und TS-Bewirtschaftungsdaten (Betriebsstauinhalt V_{BS}, tägliche Rohwasserabgabe Q_{RW}, Mindestabgabe an den unterliegenden Fluss Q_{WBmin}, schadlose Unterwasserabgabe Q_{WBmax}) erforderlich.

Es wird von zwei hinreichend gesicherten Annahmen ausgegangen (UHLMANN et al. 2011):

- Die Abgrenzung zwischen Meta- und Hypolimnion in stabil geschichteten Seen und TS der gemäßigten Breiten wird während der SST durch die Tiefe z_{10} der 10°C-Isotherme beschrieben. Im Folgenden wird die Schicht zwischen dem Stauziel $z_s = 0$ und der Tiefe z_{10} der Einfachheit halber als Epilimnion bezeichnet.
- Die Entwicklung des Hypolimnionvolumens wird in TS maßgeblich durch Wasserabgaben aus dem Hypolimnion bestimmt, da sich die Zuflüsse während der SST meta- oder epilimnisch einschichten und der Einfluss des diffusiven bzw. turbulenten Wärmeaustauschs auf die Tiefenverlagerung der Sprungschicht vernachlässigbar ist.

Ferner wird vorerst davon ausgegangen, dass hinreichend große Unterwasserabgaben während des Entlastungsbetriebs der TS im Hochwasserfall nur über die Grundablässe erfolgen können, die in der Summe jedoch Q_{WBmax} nicht überschreiten dürfen.

Die im Wasserwirtschaftsplan einer TS festgelegten wassermengenwirtschaftlichen Betriebsregeln müssen eine hohe Sicherheit der Rohwasserversorgung von in der Regel ≥ 95%, in Sachsen von ≥ 99% gewährleisten. Um Einschränkungen der Rohwasserversorgung als Folge unzureichender Rohwasserbeschaffenheit weitgehend auszuschließen, wird im Folgenden von einer erforderlichen Sicherheit p = 90% der Einhaltung wassergütewirtschaftlicher Mindestanforderungen ausgegangen.

3. Herleitung wassergüteabhängiger Randbedingungen

Die Entwicklung der Temperaturschichtung während der SST bestimmt die Größe des Hypolimnions und die Verfügbarkeit hypolimnischen Rohwassers. In dieser Hinsicht ungünstige Konstellationen ergeben sich bei zeitigem Schichtungsbeginn und/oder hoher Durchmischungstiefe zu Beginn der SST. Ebenso ist die Rohwassertemperatur ein wesentlicher Wasserbeschaffenheitsparameter. Auf der Grundlage vieljähriger Wasseruntersuchungen

oder eines hydrophysikalischen Modells werden die folgenden Eingangsgrößen für die Berechnung der wassergütewirtschaftlichen Mindestvolumina ermittelt:

- Beginn der SST: Der Beginn der SST t_a ist der Tag des Jahres, ab dem T_{ZU} = 10°C am Sommeranfang mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% dauerhaft überschritten wird und sich die Zuflüsse demzufolge meta- oder epilimnisch einschichten. Für Sachsen ergibt sich ein charakteristischer Wert von t_a = 135 (15. Mai; Abbildung 1 links).
- Bestimmung von z_{10} zum Zeitpunkt t_a: Die Herausbildung der thermischen Schichtung zu Beginn der SST ist physikalisch determiniert und von der TS-Bewirtschaftung weitgehend unabhängig. z_{10} zum Zeitpunkt t_a bestimmt das Ausgangsvolumen des Hypolimnions und entspricht dem 90er Perzentil der z_{10}-Dauerkurve. Für Sachsen ist von z_{10} = 8 m auszugehen (Abbildung 1 rechts). Für stark windabgeschirmte TS ist z_{10} niedriger, für windexponierte Gewässer höher anzusetzen.

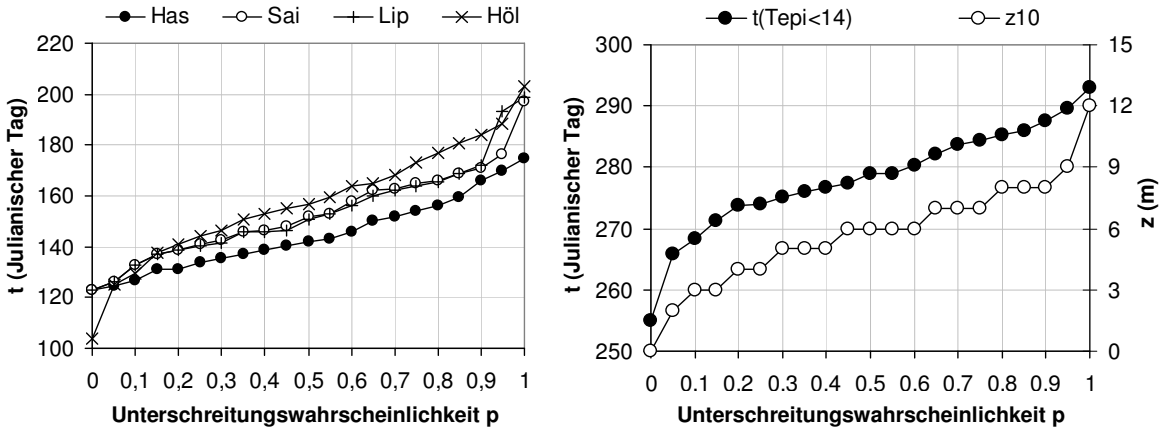


Abb. 1: Links: Dauerkurven des Tages t innerhalb des Jahres, ab dem die Temperatur der Zuflüsse größer 10°C wird (Has – Haselbach, Sai – Saidenbach, Lip - Lippersdorfer Bach, Höl – Hölzelbergbach). Rechts: Dauerkurven des Tages t innerhalb des Jahres, ab dem die Epilimniontemperatur T_{epi} niedriger als 14°C ist, und der Tiefe z_{10} zum Zeitpunkt t_a. Die Ergebnisse basieren auf mindestens 14tägigen Messungen an der TS Saidenbach (Sachsen) im Zeitraum von 1975 bis 2010.

- Ende der SST: Das Ende der SST t_e ist der Zeitpunkt im Herbst, bis zu dem hypolimnische Rohwasserentnahme aus der TS erforderlich ist, weil die Beschaffenheit des epilimnischen Wassers noch keine störungsfreie und kostengünstige Trinkwasseraufbereitung gestattet. Im Sinne einer pragmatischen Vorgehensweise wird als maßgeblicher Indikator die Rohwassertemperatur betrachtet. Es wird t_e als der Tag im Jahr definiert, ab dem die Epilimniontemperatur der TS 14°C mit einer Wahrscheinlichkeit von p = 90% unterschreitet. Dies stützt sich darauf, dass die Gefahr der Wiederverkeimung im Verteilungssystem stark zunimmt, wenn die Trinkwassertemperatur 15°C überschreitet (VOLK & LeCHEVALLIER 2000). Ferner fordert die DIN 2000 eine Temperatur des Trinkwassers im Bereich zwischen 5°C und 15°C. Für Sachsen ergibt sich ein charakteristischer Wert von t_e = 288 (15. Oktober; Abbildung 1 rechts). Erforderlichenfalls sind weitere relevante Wassergütevariablen zu berücksichtigen.

- Nicht nutzbares Hypolimnionvolumen zum Zeitpunkt t_e: Im Wesentlichen vom Gewässergrund ausgehende Prozesse können im Verlaufe der SST die Wasserbeschaffenheit im Tiefenwasser erheblich beeinträchtigen und somit die Trinkwasseraufbereitung erschweren. Das Volumen V_{He} unterhalb der verfügbaren Rohwasserentnahmeeinrichtung, die sich zum Zeitpunkt t_e direkt oberhalb dieser qualitativ beeinträchtigten Schicht befindet, ist somit in der Regel für die Rohwasserversorgung nicht nutzbar.

4. Ist das verfügbare Hypolimnion ausreichend groß?

In im Vollstau betriebenen TS können die die Regelabgaben (Q_{RW}, Q_{WBmin}) übersteigenden Zuflüsse über die Hochwasserentlastung abfließen. In einer TS mit Hochwasserschutzfunktion ist dies nur im Ausnahmefall zulässig. Hier muss dem Überschreiten des Stauziels durch entsprechende Abgaben in der Regel über die Grundablässe entgegengewirkt werden. In erster Näherung gilt, dass in diesen TS die Summe Q_{ZUS} des während der SST zufließenden Wassers aus dem Hypolimnion abgegeben werden muss. Dies ist sogar insofern eine optimistische Annahme, als das es auch in nassen Sommern Phasen geben wird, in denen die Regelabgaben höher als Q_{ZU} sind.

Nach JUNGE (1966) kann das zum Zeitpunkt t_a entstandene und durch z_{10} abgegrenzte Hypolimnionvolumen V_{z10} mit hinreichender Genauigkeit in Abhängigkeit vom Betriebstauvolumen V_{BS} und der maximalen Tiefe z_{max} unterhalb z_s beschrieben werden. Setzt man $V_{BS} = \bar{t}_{BS}\overline{Q}_{ZUY}$ mit der auf das Stauziel bezogenen mittleren theoretischen Verweilzeit $\bar{t}_{BS}$ und dem mittleren Jahreszufluss $\overline{Q}_{ZUY}$ und führt $Q_{ZUS} = x\overline{Q}_{ZUY}$ ein, so folgt

$$V_{z10} = V_{BS}\left(1 - \frac{z_{10}}{z_{max}}\right)^k = \frac{\bar{t}_{BS}Q_{ZUS}}{x}\left(1 - \frac{z_{10}}{z_{max}}\right)^k . \quad (1)$$

Wenn die Bereitstellung hypolimnischen Rohwassers bis zum Ende der SST t_e gewährleistet werden soll, muss $V_{z10} > Q_{ZUS}$ und somit die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\bar{t}_{BS} > x\left(1 - \frac{z_{10}}{z_{max}}\right)^{-k} . \quad (2)$$

Die meisten Mittelgebirgs-TS haben eine nahezu ideale konische Beckenform, für die k = 3 gilt. Einige weichen in Richtung eines elliptischen Paraboloiden mit k = 2 ab, der in Hinblick auf den Einfluss der Beckenmorphometrie auf die Wassergüte (z.B. größeres Verhältnis zwischen Hypo- und Epilimnionvolumen) im Vergleich zum Konus weniger kritisch ist (UHLMANN et al. 2011). Der Faktor x (a) ist eine regionaltypische Konstante. Für sächsische TS ergibt sich ein Mittelwert x = 0,52 ± 0,04 a, wenn von t_a = 135, t_e = 288 und p = 90% ausgegangen wird (Abbildung 2 links). Mit z_{10} = 8 m zeigt sich, dass die Mehrzahl der sächsischen TS mit Hochwasserschutzfunktion die Bedingung (2) nicht erfüllen, selbst wenn man eine parabolische Beckenform zugrunde legt (Abbildung 2, rechts). Das sich zu Beginn der SST bildende Hypolimnion ist zu klein, um eine hypolimnische Rohwasserabgabe über die gesamte Dauer der SST in nassen Sommern zu gewährleisten. Es wird deutlich, dass als Grundlage des wasserwirtschaftlichen Normalbetriebes die aus der Sicht der Wassergüte erforderlichen Mindeststauinhalte einer TS bekannt sein müssen, damit bei deren Unterschreitung rechtzeitig entsprechende operative Maßnahmen eingeleitet werden können.

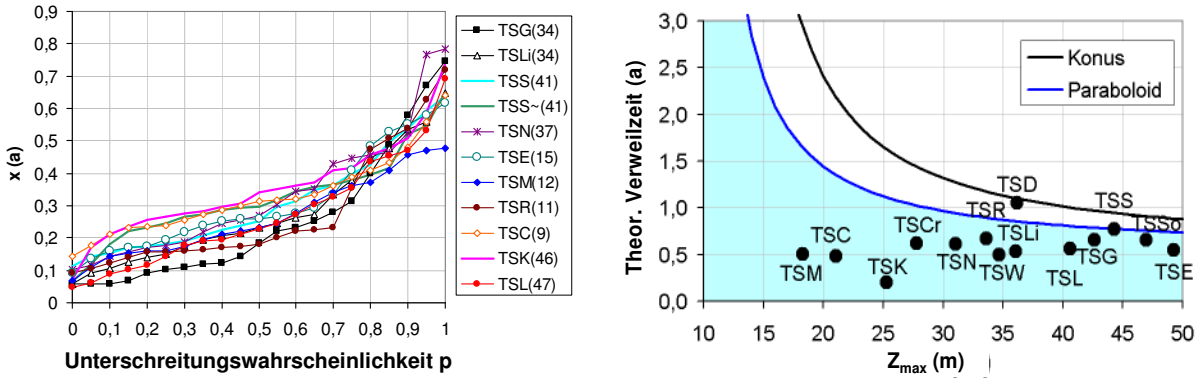


Abb. 2: Links: Faktor $x = Q_{ZUS}/\overline{Q}_{ZUY}$ für sächsische TS (TSG – Gottleuba, TSLi – Lichtenberg, TSS – Saidenbach (Abfluss aus natürlichem Einzugsgebiet), TSS~ – Saidenbach mit Überleitungen, TSN – Neunzehnhain II, TSE – Eibenstock, TSM – Muldenberg, TSR – Rauschenbach, TSC – Carlsfeld, TSK – Klingenberg, TSL – Lehnmühle; Zahlen in Klammern – Anzahl der verfügbaren Q_{ZU}-Jahresgänge). Rechts: Zusammenhang zwischen mittlerer theoretischer Verweilzeit und maximaler Tiefe z_{max} sächsischer TS im Vergleich mit der nach Gl. 2 berechneten kritischen theoretischen Verweilzeit (zusätzlich zu den genannten TS TSD – Dröda, TSCr – Cranzahl, TSW – Werda, TSSo – Sosa).

5. Bestimmung der wassergütewirtschaftlichen Mindeststauinhalte einer TS

Die Bestimmung der wassergütewirtschaftlichen Mindeststauinhalte einer TS muss getrennt für die SST und die Phasen der Vollzirkulationen erfolgen. Letzteres soll hier nicht thematisiert werden. Es wird vorläufig weiter davon ausgegangen, dass Wasserabgaben nur über hypolimnische Abgabeeinrichtungen (Rohwasserentnahmen, Grundablässe) möglich sind.

Der Mindeststauinhalt V_a der TS zum Zeitpunkt t_a ist die Summe aus dem zur Befriedigung der Regelabgaben während der SST erforderlichen Mindestvolumen V_{Ha} des Hypolimnions und dem sich aufgrund unbeeinflussbarer meteorologischer und physikalischer Prozesse bildenden Epilimnions V_{Ea} der Tiefe z_{10}. Unter Berücksichtigung des oben definierten, zum Zeitpunkt t_e nicht nutzbaren Teils des Hypolimnions V_{He}, einer zur Deckung des Mindestbedarfs erforderlichen täglichen Rohwassermenge Q_{RW} und der Mindestabgabe Q_{WBmin} ans Unterwasser folgt

$$V_a = V_{Ea} + V_{Ha} = V_{Ea} + V_{He} + \sum_{t_a}^{t_e} \left(Q_{RW} + Q_{WB\,min}\right). \qquad (3)$$

V_a ergibt sich, indem z_{10} zur Staukote h_{Ha} addiert wird, die dem Volumen V_{Ha} zugeordnet ist.

In trockenen Sommern, in denen die Summe der Regelabgaben Q_{ZUS} übersteigt, wird der Stauspiegel der TS absinken. Um zu gewährleisten, dass die TS zum Zeitpunkt t_a im folgenden Jahr mit hinreichender Sicherheit den Mindeststauinhalt V_a wieder erreicht, darf das Mindestvolumen V_e am Ende der SST mit

$$V_e = V_a - \left(Q_{ZUW} - \sum_{t_e}^{365+t_a} \left(Q_{RW} + Q_{WB\,min}\right) \right) = V_a - Q_{ZUWeff} \qquad (4)$$

nicht unterschritten werden. Q_{ZUWeff} ist dabei die Summe der Zuflüsse im Winterhalbjahr abzüglich der Regelabgaben, die mit hinreichender Sicherheit überschritten wird.

Die Gültigkeit des berechneten Mindeststauinhalts V_a kann nur bestätigt werden, wenn die Bedingung

$$V_{BS} \geq V_a + \left(Q_{ZUS} - \sum_{t_a}^{t_e} (Q_{RW} + Q_{WB\,min}) \right) = V_a + Q_{ZUSeff} \qquad (5)$$

mit der vom TS-Betreiber vorgegebenen Wahrscheinlichkeit erfüllt ist. Andernfalls sind zur Wahrung des Betriebsstaus der TS während der SST zusätzliche Entlastungen erforderlich, die zu einer Erschöpfung des Hypolimnions vor dem Zeitpunkt t_e führen würden. Ursachen dafür können eine Übernutzung der TS (zu hohe Regelabgaben während der SST, d.h. zu großes V_{Ha}) und/oder ein zu großer gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum (zu kleines V_{BS}) sein. In den meisten TS sind es jedoch die zu hohen Zuflüsse in nassen Sommern. In diesen Fällen ist die Bereitstellung hypolimnischen Rohwassers während der gesamten SST nur dadurch mit hinreichender Sicherheit zu gewährleisten, indem technische Voraussetzungen für einen Entlastungsbetrieb der TS über epilimnische Abgabeeinrichtungen ausreichender Kapazität geschaffen werden.

6. Ein Beispiel: Talsperre Lichtenberg (Sachsen)

Die TS Lichtenberg (TSLi; Volumen bei Vollstau 14,45 hm³, Volumen des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraums 3,01 hm³, z_{max} bei Betriebsstau 36 m, mittlere theoretische Verweilzeit 0,54 a) dient der Trinkwasserversorgung und dem Hochwasserschutz des Freiberger Raums. Tageswerte des Zuflusses zur TSLi standen seit 1962 zur Verfügung. Bei den Berechnungen wird von Q_{RW} = 0,265 m³/s (entspricht Bereitstellungsstufe III) und Q_{WBmin} = 0,07 m³/s ausgegangen. Die TSLi verfügt über fünf in unterschiedlicher Tiefe angeordnete Betriebsauslässe mit einer maximalen Kapazität von jeweils ca. 0,6 m³/s.

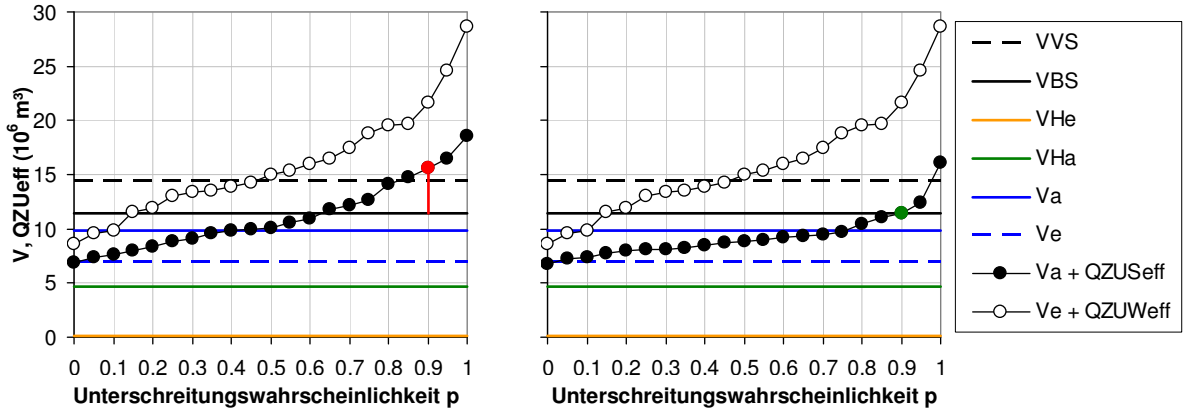


Abb. 3: Ergebnisse der Mindeststauinhaltsberechnungen für die TSLi bei hypolimnischem Entlastungsbetrieb (links) und unter der Annahme epilimnischer Entlastungen von ≤ 1,6 m³/s (rechts; Details s. Text).

Die Auswertung der Wassergütedaten ergab t_a = 135, t_e = 288 sowie z_{10} = 8 m und zeigte, dass der unterste Betriebsauslass EH1 aufgrund von Beeinträchtigungen der Wassergüte (O2-Schwund, erhöhte Mn-Konzentrationen) nicht bis zum Ende der SST für Rohwasserabgaben nutzbar ist. Das Volumen unterhalb EH2 entspricht somit dem Mindesthypolimnionvolumen V_{He} = 0,158 hm³ zum Zeitpunkt t_e. Nach Gl. (3) ergibt sich V_{Ha} = 4,616 hm³ und

V_a = 9,78 hm³. Entscheidend jedoch ist, dass die Bedingung nach Gl. (5) nur in etwa sechs von zehn Jahren erfüllt wird, wenn man Entlastungsbetrieb über die Grundablässe annimmt (Abbildung 3 links). Erst unter der Annahme, dass epilimnische Unterwasserabgaben von bis zu 1,6 m³/s möglich sind, kann hypolimnische Rohwasserbereitstellung bis zum Ende der SST mit einer Sicherheit von 90% gewährleistet werden (Abbildung 3 rechts). Stauinhaltsberechnungen bestätigen dies und zeigen, dass Hochwässer in der ersten Sommerhälfte aus wassergütewirtschaftlicher Sicht generell besonders kritisch sind.

7. Schlussfolgerungen

Die Bestimmung der Sicherheit einer in Quantität und Qualität ausreichenden Rohwasserbereitstellung aus TS erfordert die integrale Betrachtung von wassermengen- und -gütewirtschaftlichen Gesichtspunkten. Eine weitgehend störungsfreie und kostengünstige Trinkwasseraufbereitung während der SST ist nur bei Nutzung hypolimnischen Rohwassers gewährleistet. Damit steht im Sommer nur ein Teil des Betriebsraums der TS zur Verfügung.

Das vorgestellte Verfahren zur Bestimmung von Mindeststauinhalten erlaubt es, in TS mit Hochwasserschutzfunktion das Risiko einer vorzeitigen Erschöpfung des Hypolimnions in niederschlagsreichen Sommern als Folge des Entlastungsbetriebs über die Grundablässe zu beziffern. Ferner ermöglicht es die Ermittlung der Menge epilimnischer Unterwasserabgaben, die erforderlich ist, um mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit hypolimnische Rohwasserbereitstellung bis zum Ende der SST zu sichern.

Die ermittelten Mindestvolumina bilden die Grundlage für den mittelfristigen und operativen TS-Betrieb während der SST. Unterschreitet der Stauinhalt zu irgendeinem Zeitpunkt $t_a \leq t \leq t_e$ die Verbindungslinie zwischen V_a und V_e oder das Hypolimnionvolumen die Linie zwischen V_{Ha} und V_{He}, besteht Handlungsbedarf. Der TS-Betreiber wird in die Lage versetzt, wassermengenwirtschaftliche Betriebsregeln zu optimieren. Die Ergebnisse des Verfahrens ermöglichen es, mittels Kosten-Nutzen-Analysen zu ermitteln, ob die Nachrüstung der TS mit epilimnischen Abgabeeinrichtungen längerfristig wirtschaftlicher ist als die Verbesserung der Wasserwerkstechnologie und/oder die Übernahme von Mehraufwendungen bei der Trinkwasseraufbereitung in nassen Sommern.

Literatur

ATT (2009): Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren gemäß DIN 19700. ATT-Schriftenreihe, Band 7, Oldenbourg Industrieverlag München, ISBN 978-3-8356-3188-5

JUNGE, C.O. (1966): Depth distributions for quadric surfaces and other configurations. - In: Hydrobiological Studies. Hrsg. J. Hrbaček. Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1966, S. 257-265

UHLMANN, D. et al. (2011): Lakes and Reservoirs. In: Treatise on Water Science. Hrsg. P.A. Wilderer. Elsevier, Amsterdam. ISBN 978-0-444-53193-3 (in press)

VOLK, C.J. & M.W. LeCHEVALLIER (2000): Assessing biodegradable organic matter. Journal AWWA 92(5): S. 64-76

Umsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie im Seseke-Gebiet

Niels Jagsch, Jürgen Diener, Georg Johann, Michael Leismann, Burkhard Teichgräber

Zusammenfassung

Im Zuge eines Kooperationsprojektes zwischen dem Land Nordrhein-Westfalen und dem Lippeverband erfolgt aktuell die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie 2007/60/EG (HWRM-RL). Als Modellgebiet zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten wurde das 320 km² große Einzugsgebiet der Seseke gewählt, welches aufgrund städtischer Prägung sowie aufgrund der Auswirkungen des untertätigen Steinkohleabbaus signifikant hochwassergefährdet ist.

Zunächst werden die methodischen Grundlagen zur Ermittlung der betrachteten Hochwasserereignisse erläutert. Anschließend erfolgt eine Darstellung zum Modellaufbau und zu den ersten Simulationsergebnissen des hier zur Anwendung kommenden hydraulischen Modells MikeFlood. Ausuferungen werden instationär-ungleichförmig simuliert und in Verbindung mit Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Die entsprechend gewonnenen Darstellungen zeigen, dass auf dieser Grundlage Maßnahmen zur Vermeidung, zum Schutz und zur Vorsorge umgesetzt werden können.

1. Veranlassung und Zielsetzung

Im November 2007 ist die europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie 2007/60/EG (HWRM-RL 2007) in Kraft getreten. Ziel dieser Richtlinie ist eine Verdeutlichung der Hochwasserrisiken und eine Verbesserung der Hochwasservorsorge und des Risikomanagements. Das Land Nordrhein-Westfalen hat die sich hieraus ergebenden Vorgaben umzusetzen. Zuständige Behörden sind die Bezirksregierungen.

Gleichzeitig hat der Lippeverband in seinem Verbandsgebiet Aufgaben zu erfüllen, die die Tätigkeitsfelder des Umsetzungsprozesses der HWRM-RL berühren. Der Lippeverband ist seit 1926 regionaler Träger der Wasserwirtschaft für ein 3.280 km² großes Gebiet, in dem 1.4 Mio. Menschen leben.

Durch die Überlappung dieser Aufgaben des Landes Nordrhein-Westfalen und des Lippeverbandes lassen sich Synergien finden und nutzen. Deshalb wurde ein Kooperationsvertrag zwischen Bezirksregierung Arnsberg und Lippeverband unter Beteiligung des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft und Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen geschlossen. Dabei werden Redundanzen bei der Gewinnung von Grundlagendaten und Aufwendungen für Modellsimulationen vermieden und es wird für einen konsistenten Datenbestand Sorge getragen.

Als erstes Gebiet zur gemeinsamen Umsetzung der HWRM-RL wurde das 320 km² große Einzugsgebiet der Seseke mit seiner stark städtisch und durch die Auswirkungen des untertätigen Steinkohleabbaus geprägten Gebietsstruktur ausgewählt. Mit diesem Modellprojekt soll die von den Bundesländern Nordrhein Westfalen und Rheinland Pfalz entwickelte „Arbeitshilfe Sieg“ in einem stark anthropogen überformten Einzugsgebiet mit signifikantem Hochwasserrisiko erprobt und weiterentwickelt werden. Diese Vorgehensweise soll dann auf

die ähnlich strukturierten Einzugsgebiete wie z.B. den Ballungsraum zwischen Dortmund und Duisburg mit rd. 3.2 Mio. Einwohnern übertragen werden.

2. Einzugsgebiet Seseke

Das Einzugsgebiet der Seseke ist vor allem im Unter- und Mittellauf von Bergsenkungen durch den Steinkohleabbau beeinträchtigt. Es entstanden weitgespannte Geländesenken, die mit einer Veränderung der ursprünglich flachen Morphologie verbunden sind. Diese Bergsenkungsgebiete sind nicht mit natürlichen Auenbereichen vergleichbar. Sie können bei Hochwasser auch gegen die Fließrichtung voll laufen und ausuferndes Wasser weit vom Gewässer wegführen. Bei einem Ausufern des Gewässers können Gebiete überflutet werden, die noch vor den Bergbautätigkeiten außerhalb potentieller Überflutungsgebiete lagen. Oftmals ist für diese Bergsenkungsmulden eine Entwässerung durch Vorflutpumpwerke bzw. Grundwasser regulierende Brunnen notwendig, die vom Lippeverband betrieben werden. In Abbildung 1 ist der Unterlauf der Seseke mit der vorherrschenden Geländestruktur abgebildet. Die Bergsenkungsmulden sind gut an den blauen Farben und runden Strukturen zu erkennen. Die Bergsenkungen sorgen in Verbindung mit der Bebauungsdichte für ein signifikantes Hochwasserrisiko. Zum einen, weil durch die Bergsenkungen über mehrere Meter tiefe Überflutungsgebiete entstehen können. Zum andern verläuft die Ausbreitung von Überschwemmungsflächen im urbanen Raum sehr dynamisch, da viele Fließhindernisse zu inhomogen ablaufenden Fließprozessen führen und hohe Fließgeschwindigkeiten im Überschwemmungsgebiet entstehen können.

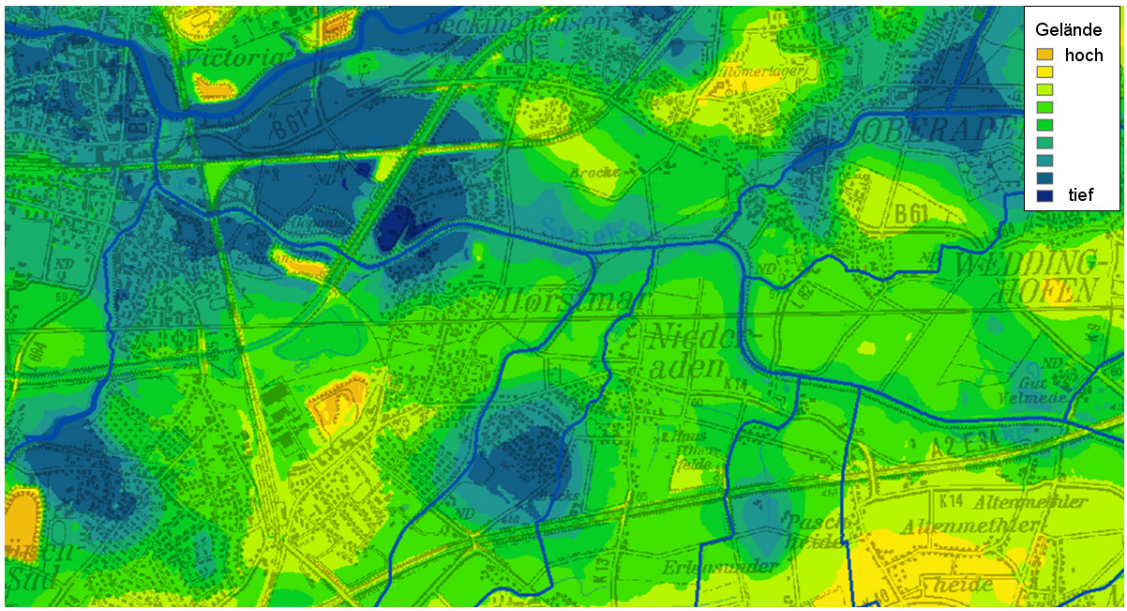


Abb. 1: Unterlauf der Seseke mit Geländehöhen

Aus diesem Grund wurden bei der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos auch kleine Gewässerläufe untersucht, die durch dicht besiedelte Gebiete fließen und oftmals durch Pumpwerke zu ihrem Vorfluter gefördert werden müssen. Somit zeigen auch diese kleinen Gewässer in der vorläufigen Bewertung ein signifikantes Hochwasserrisiko.

3. Erstellung von Hochwassergefahrenkarten

3.1 Methodik

Im Allgemeinen erfolgt die modellgestützte Ermittlung von Überflutungsflächen und die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten durch Wasserspiegellagenberechnung und anschließende Visualisierung anhand von raumbezogenen Informationssystemen. Im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens werden diese Arbeitschritte in einem Werkzeug zusammengefasst. Ziel ist, Erfahrungen zu gewinnen und die bisherige Methodik weiter zu entwickeln. Hier wurde das Programm MikeFlood (DHI-Wasy) ausgewählt. Das Programm erlaubt die Simulation ein- und - im Überflutungsfall - auch zwei-dimensionaler Fließvorgänge.
Zur Abbildung der dynamischen Fließprozesse bei Überflutungen, erfolgt die hydraulische Berechnung der Überflutungsflächen zweidimensional-instationär. Für das Ausuferungsverhalten der städtischen Gewässer sind meist die im Fließgewässer liegenden klein strukturierten Bauwerke wie Verrohrungen oder Brücken mit darunter liegenden, den Gewässerquerschnitt durchlaufenden Leitungsquerungen maßgebend. Diese Strukturen eignen sich gut für eine eindimensionale Modellierung. Deshalb werden die Gewässer für sich zunächst eindimensional unter Berücksichtigung der Bauwerke berechnet. Zur Berechnung von Überflutungsszenarien wird das eindimensionale Hydraulikmodell anschließend mit dem zweidimensionalen Modell gekoppelt.
Die instationäre Berechnung von Überflutungsflächen erfordert als Eingangsgröße Abflussganglinien von Hochwasserereignissen. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Betrachtung für die Hochwasserjährlichkeiten HQ10, HQ100 und HQextrem mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell (Programm Nasim von Hydrotec) berechnet.

3.2 Hydrologie – Berechnung von Hochwasserwellen

Für die Berechnung der Hochwasserwellen wurde das vom Lippeverband aufgebaute und kalibrierte Niederschlag-Abfluss-Modell Seseke benutzt. Mit dem Modell wird im ersten Schritt eine Langzeitsimulation über 57 Jahre berechnet. Die Ergebniszeitreihen werden statistisch ausgewertet, somit stehen Abflussscheitelwerte der in der HWRM-RL geforderten Größen HQ10 und HQ100 zur Verfügung.
In einem zweiten Schritt werden durch Modellregen unterschiedlicher Dauerstufen und Verteilungen (z.B. anfangsbetont, DVWK-Verteilung, endbetont) synthetische HQ100-Ganglinien berechnet, wobei die Niederschlagshöhen für die verschiedenen Dauerstufen aus der Niederschlagsstatistik für Tn = 100 a entnommen werden.
Bei den aus der Niederschlagsstatistik simulierten Abflüssen kann normalerweise nicht davon ausgegangen werden, dass Niederschläge einer bestimmen Jährlichkeit auch zu Abflüssen derselben Jährlichkeit führen, da Vorbedingungen stark variieren können und darüber hinaus mit einer statistischen Ungenauigkeit der Niederschlags- und Abflussstatistik gerechnet werden muss. Deshalb werden in einem 3. Schritt die Anfangsbedingungen und/oder die Niederschläge so verändert, dass die Maxima der mit den Modellregenereignissen berechneten Ganglinien für jeden Verteilungstyp (anfangsbetont, DVWK, endbetont) mit dem aus der Statistik errechneten Wert übereinstimmen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass plausible Werte für die Anfangsbedingungen bzw. die Niederschläge angenommen werden. Die Auswahl der Niederschlagsverteilung und der Dauerstufe, des Niederschlager-

eignisses, das zu einem HQ100 führt, bedarf einer Einzelfallprüfung. Im 4. Schritt werden Daten eines extremen Niederschlagsereignisses nach dem PEN-Verfahren generiert (LAWA 2005) und mit der für das HQ100 gefundenen Verteilung und Dauerstufe als Eingangsdaten für die Niederschlag-Abfluss-Simulation benutzt. Dieser Niederschlag kann zur Absicherung noch mit in der Umgebung extremen Niederschlagsereignissen verglichen und evtl. entsprechend verändert werden (DWA 2010). Die so berechnete Abflusswelle wird als HQextrem für die Berechnung der Überflutungsflächen verwendet.

3.3 Eindimensionale hydraulische Modellierung

Zum Aufbau des eindimensionalen Modells waren neben den Abflüssen insbesondere detaillierte Vermessungsdaten erforderlich. Die terrestrische Vermessung orientierte sich an folgenden Anforderungen:

- Vermessung der Querprofile in einem Abstand von 50 m
- Aufnahme der Querprofile an den Stellen mit Geometrieänderung (Verbreiterung, Einschnürung)
- Berücksichtigung von Neigungswechseln in den Querprofilen
- Herstellbarkeit eines Anschlusses der vermessenen Querprofile an das vorhandene Geländemodell
- Georeferenzierung der Querprofile

Zur korrekten Modellierung von Gewässereinschnürungen wurden zusätzlich alle Bauwerke mit Stationierung, Sohlhöhe und ihrer Geometrie vermessen. Aus diesen Vermessungsdaten resultieren die sogenannten Begrenzungspunkte. Überschreitet ein simulierter Wasserspiegel die gesetzten Begrenzthöhen, so erfolgt dort eine Ausuferung und entsprechend beginnt dann die zweidimensionale Modellierung.

Die Geometrie kleiner Gewässer, für die keine Vermessungsdaten vorliegen, wurde vereinfacht über ein digitales Geländemodell (DGM) in Verbindung mit repräsentativen Querprofilen erfasst. Die Rauheiten wurden zunächst auf Grundlage von Ortsbegehungen und daraus gefertigter Fotodokumentationen für die Gewässer in Ansatz gebracht. Im Rahmen der Modellkalibrierung werden darüber hinaus die jahreszeitlich bedingten Veränderungen berücksichtigt. Die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Pumpwerke wurden entsprechend ihrer Fördercharakteristik modelltechnisch abgebildet.

3.4 Zweidimensionale hydraulische Modellierung

Wesentliche Grundlage der zweidimensionalen Modellerstellung ist das Vorliegen eines digitalen Geländemodells (DGM). Das hier verwendete DGM hat eine Auflösung von 4 m. Ergänzt wurden die Höheninformationen aus dem DGM durch Gebäudedaten (aufgenommene Dachflächen). Die Gebäude wurden zunächst einheitlich mit einer 10 m Höhe versehen und mit dem DGM verschnitten. Das Ergebnis ist ein DGM mit Gebäudestrukturen (vgl. Abbildung 2). Durch diesen Schritt konnte die Darstellung der Überflutungsszenarien deutlich präzisiert werden. Es ist dadurch insbesondere auch eine Aussage über die lokal zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten möglich.

In dieser Untersuchung im Sesekegebiet werden die Abflüsse in den jeweiligen Fließgewässern mit dem Modell MIKE 11 berechnet. Im Falle einer Ausuferung wird das Modell MIKE 21

aktiv. Durch diese Trennung soll der Einfluss von Pumpwerken und Bauwerken bestmöglich abgebildet werden.

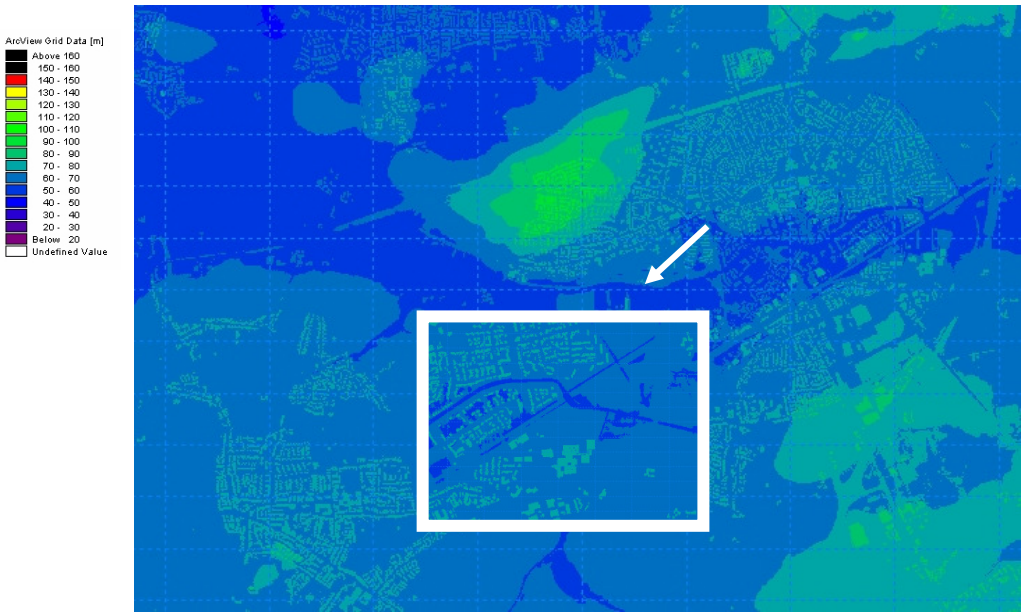


Abb. 2: Digitales Geländemodell (DGM) mit Gebäudestrukturen (Modellausschnitt)

3.5 Modellkopplung

Durch die Kopplung vom 1D- und 2D-Modell werden die Einzelsimulationen miteinander verknüpft. Vorteil der Kopplung ist, dass nur Bereiche, in denen es zu Ausuferungen und somit zu Querströmungsprozessen kommt, mit einem 2D-Modell simuliert werden. Dies erspart Rechenzeit. Die separate eindimensionale Modellierung bringt den Vorteil mit sich, dass steuerbare Elemente (z.B. Wehr- und Stauanlagen) berücksichtigt werden können. Zusätzlich werden Brückendurchlässe und verrohrte Strecken, wie sie hier vorkommen, betrachtet. Sie stellen häufig Abflusshindernisse dar, haben Ausuferungen zur Folge und wirken sich auch in der Seseke und ihren Nebenläufen besonders prägend auf die Wasserspiegellage aus. Zur Vermeidung von numerischen Instabilitäten wird empfohlen, im Zuge der Kopplung von Mike 11 und Mike 21 Pumpwerke und Bauwerke nicht mitzukoppeln. Dadurch entsteht für die Berechnungsschärfe kein Nachteil, weil die Objekte weiterhin in Mike 11 berücksichtigt werden.

3.6 Kalibrierung

Grundlage für die Kalibrierung sind zunächst gemessene Hochwasserereignisse, für die im Modellgebiet an drei Pegeln repräsentative Aufzeichnungen vorliegen. Zur Kalibrierung wurden je Pegel verschiedene rückstaufreie Hochwasserereignisse ausgewählt, die die vegetationsbedingten jahreszeitlichen Veränderungen der Abflussverhältnisse widerspiegeln.

3.7 Erste Ergebnisse (Rohmodell)

Exemplarisch zeigt Abbildung 3 einen Überflutungsbereich für ein einhundertjährliches Hochwasserereignis (HQ100, instationär, ungleichförmig, Zustand: 1,5 Stunden nach Ausufe-

rungsbeginn). Die Wassertiefen sind in dem morphologisch nur gering differenzieren Modellgebiet zunächst gering. Die Fließgeschwindigkeiten sind mäßig.

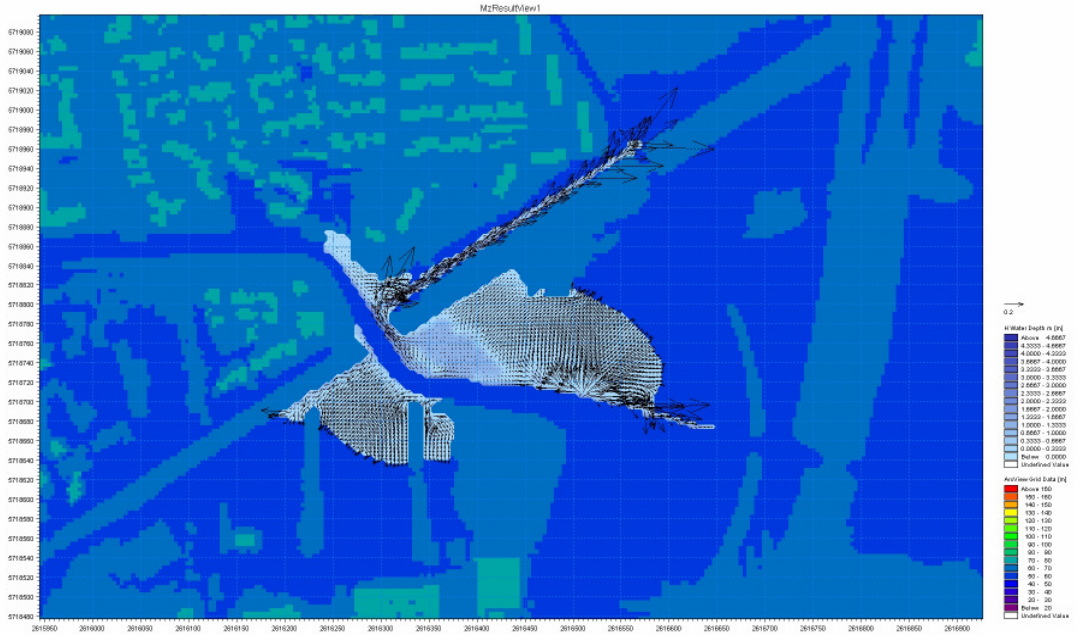


Abb. 3: Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (m/s), Abflussszenario: HQ100, instationär-ungleichförmig 1,5 Stunden nach Beginn der Ausuferung

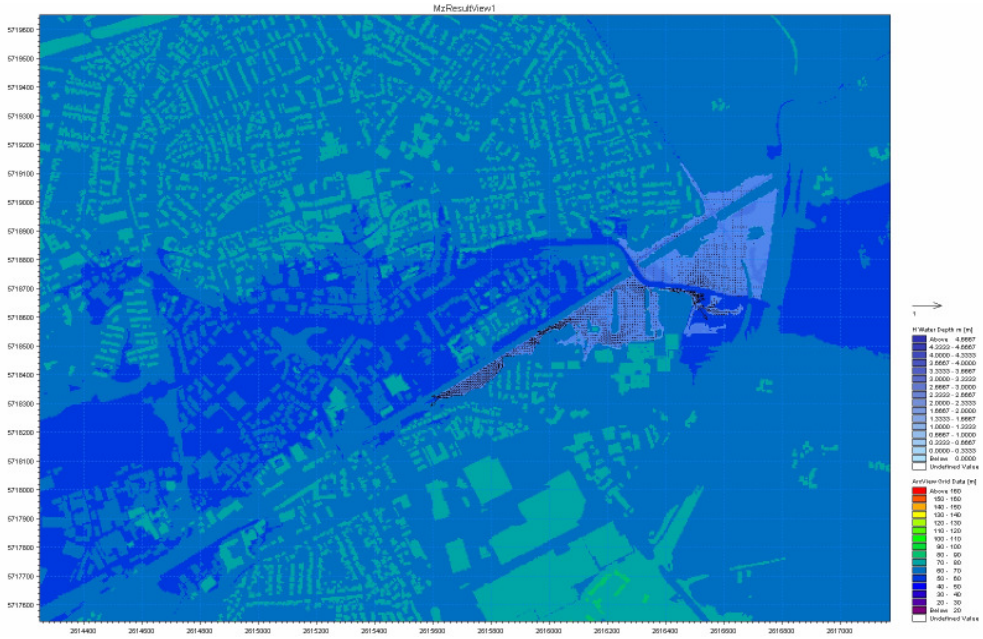


Abb. 4: Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (m/s), Abflussszenario: HQ100, instationär-ungleichförmig 5,5 Stunden nach Beginn der Ausuferung

Aufgrund der Möglichkeit zur Durchführung instationärer Berechnungen soll hier auch der Entwicklung der Fließgeschwindigkeiten im Verlauf eines Hochwasserereignisses besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Abbildung 4 zeigt entsprechend den gleichen Kartenausschnitt, jedoch im Zustand 5,5 Stunden nach Ausuferungsbeginn. Neben der Zunahme der Wassertiefen wird deutlich, dass maximale Fließgeschwindigkeiten auftreten, sobald örtliche

Höhenwiderstände überwunden werden bzw. wenn sich Teilströme nach der Umströmung von Hindernissen treffen. Besonders hohe Fließgeschwindigkeiten sind in dem hier gezeigten Fall vor dem Erreichen des Hochwasserscheitels zur erwarten.

4. Folgerungen und Ausblick

Der hier gewählte modelltechnische Ansatz und die Aussagekraft der damit gewonnenen Hochwassergefahrendarstellungen zeigen, dass auf dieser Grundlage Maßnahmen zur Vermeidung, zum Schutz und zur Vorsorge umgesetzt werden können. Insbesondere die Analyse und Darstellung von Fließzuständen in sehr differenziert strukturierten urbanen Räumen ist ein bedeutender Aspekt bei der Identifikation von Hochwasserrisiken. Durch die Bearbeitung der eigentlichen Modellierung mit einem Werkzeug ist eine zügige Fortschreibung der Hochwassergefahrenkarten gewährleistet. Gleichwohl ist aufgrund der Komplexität der Modellierung ein hohes Maß an technischem Sachverstand Voraussetzung für die sachgemäße Anwendung.

Wünschenswert wäre eine zusätzliche Einbeziehung von Informationen aus Kanalnetzen und auch der Grundwasserverhältnisse, um die vielfältigen Fließprozesse einer möglichst differenzierten Betrachtung zuzuführen.

Literatur

DWA Regelwerk Merkblatt DWA-M 552 (2010): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Gelbdruck).

Hochwasseraktionsplan Sieg 2002 (Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-HWRM-RL).

HWRM-RL (2007): RICHTLINIE 2007/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.

LAWA [Hrsg.: LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER] (2005): PEN-LAWA 2005 - Ergebnisse des Projekts PEN (Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags) des Instituts für Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover im Auftrag der LAWA. Software/Vertrieb: itwh, Hannover.

Visuelle Aktionsplanung im Hochwassermanagement mit Visdom

Jürgen Waser, Raphael Fuchs, Hrvoje Ribičić, Günter Blöschl

Zusammenfassung:
Wir präsentieren Visdom als ein System, das die Rechenleistung moderner Graphikprozessoren (GPUs) für die Planung im Hochwassermanagement nutzbar macht. Damit sind Probleme lösbar geworden, für die man bisher auf teure Supercomputer zurückgreifen musste. Die Benutzerführung ist intuitiv, sodass Personal, das mit der Simulationstechnik nicht vertraut ist, auch unter zeitkritischen Bedingungen das System bedienen kann. In den Ablauf der Simulation kann eingegriffen werden und mehrere parallele Szenarien können berechnet und visualisiert werden. Wir sehen zwei Einsatzmöglichkeiten des Systems: Die Anwendung als offline-Tool für die Planung und Schulung, sowie die online-Anwendung im Einsatzfall. Offline: Das System unterstützt die Erstellung von Hochwassermanagementplänen. Zum Beispiel können Barrieren aus Sandsäcken geplant werden. Hier ist es möglich, durch Interaktion mit der Visualisierung verschiedene Barrierenkonfigurationen zu erzeugen, diese in mehreren Simulationsläufen zu testen und die verschiedenen Szenarien zu vergleichen. Online: Visdom ist ein webbasiertes System, Berechnungen werden in Echtzeit am entfernten Server durchgeführt. Das zugrundeliegende, modulare Design von Visdom ermöglicht die leichte Einbindung existierender Simulationstechnologien.

1. Visuelle Verwaltung von Simulationen: World Lines

Im Hochwassermanagement gibt es oft mehrere, alternative Vorgangsweisen, die zum Ziel führen können. Es ist aber nicht immer vorab klar, welche Variante die günstigste ist. Tools mit denen die Auswirkungen alternativer Entscheidungen simuliert werden können, sind deshalb wünschenswert. Visdom bietet zu diesem Zweck die interaktive World Lines Darstellung, die zur Erzeugung und Verwaltung mehrerer Simulationsläufe herangezogen wird. Abbildung 1 zeigt World Lines während der Untersuchung eines virtuellen Dammbruchszenarios. Die Methode verwendet bekannte Metapher aus der multimedialen Welt zur Visualisierung von Simulationsläufen als sogenannte Tracks, die sich in der Zeit ausdehnen. Jeder Track ist durch einen bestimmten Eingabeparametersatz ausgezeichnet. Im Dammbruchszenario können BenutzerInnen interaktiv und zu jedem Zeitpunkt in der Simulation relevante Parameter wie den Randzufluss ändern oder die Abwurfpositionen mehrerer Sandsäcke zum Bau eines Schutzdamms definieren. Jede dieser benutzerdefinierten Entscheidungen wird als Verzweigung dargestellt und führt zu einem neuen Track in der World Lines Ansicht. Die Verbindung der alternativen Szenarien entsteht dadurch, dass nur ein Teil der Parameter geändert wird, während das restliche Szenario beibehalten wird. Direkt neben einem Track befinden sich eingebettete Interaktionselemente, die das Setzen von Parametern erleichtern. Die kausale Kombination mehrerer verzweigerter Tracks definiert einen möglichen Ablauf von Ereignissen und wird aufgrund der physikalischen Analogie als Weltlinie (MINKOWSKI 1909) bezeichnet. Um eine Parameteränderung an einem bestimmten Simulationsschritt durchführen zu können, muss dieser auswählbar sein. World Lines bietet Techniken zur intuitiven Navigation sowohl in der Zeit als auch zwischen alternativen Lösungen. Dabei wird

der aktuelle Simulationsschritt durch einen interaktiven Positionszeiger markiert. An das World Lines Fenster können Visualisierungen gekoppelt werden, welche das Szenario zum Zeitpunkt des aktuellen Simulationsschritts darstellen.

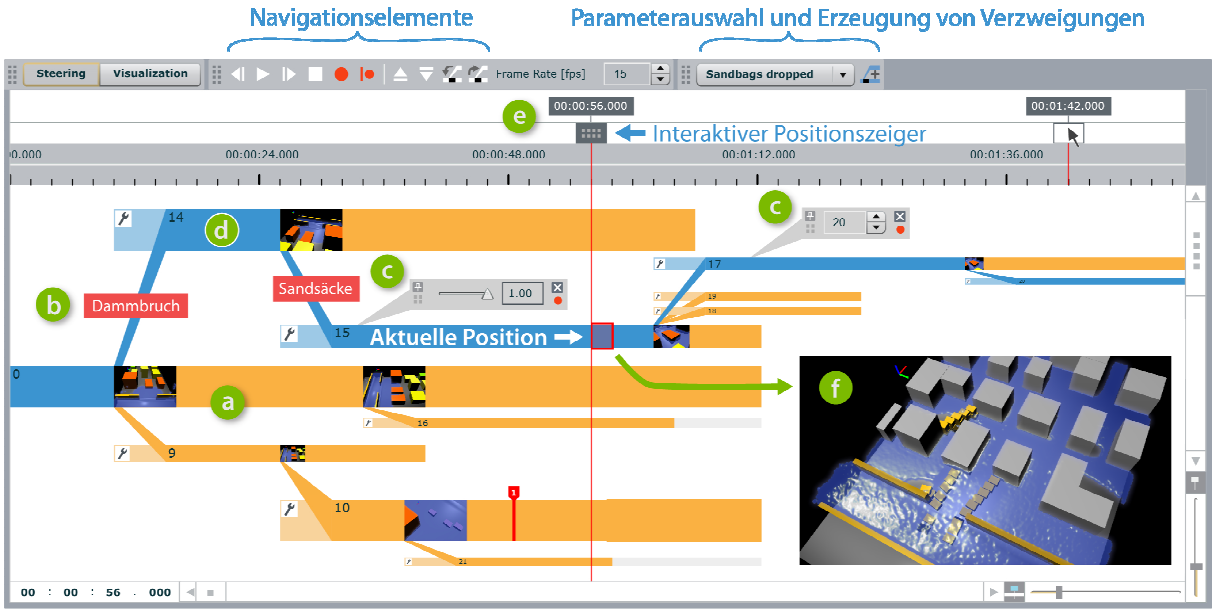


Abb. 1: World Lines. (a) Ein Simulationslauf wird als Track dargestellt. (b) Wird ein Parameter der Simulation geändert, entsteht eine neue Verzweigung. (c) Eingebettete Interaktionselemente erleichtern die Steuerung des Systems. (d) Eine Weltlinie bezeichnet den ausgewählten Ablauf von Verzweigungen und wird blau hervorgehoben. (e) Beim Abspielen verfolgt der Positionszeiger diese Weltlinie. (f) Eine gekoppelte Visualisierung (hier nur in der Abbildung eingebettet) zeigt das Szenario zum aktuellen Simulationsschritt.

Das virtuelle Dammbruchszenario basiert auf Experimenten, die in einem Labor durchgeführt wurden (SATTAR et al. 2008). Die Aufgabe besteht darin mit einer möglichst geringen Anzahl von Sandsäcken Schutzdämme zu entwerfen, die dem steigenden Wasserspiegel standhalten um eine Siedlung zu schützen. In einer World Lines Fallstudie (WASER et al. 2010) wurden für dieses Problem 59 zusammenhängende Simulationsläufe benötigt um durch Anpassung und Analyse des Barrierendesigns schrittweise zu einer robusten Konfiguration zu gelangen. Das Resultat besteht aus einer Kombination mehrerer Sandsackbarrieren, die zwischen den Gebäuden abgeworfen werden. Die Möglichkeit eine Vielzahl verwandter Lösungen vergleichen zu können und aus dieser Information Schlüsse zu ziehen, ist in diesem Beispiel ein entscheidender Vorteil.

2. Randbedingungen zeichnen

Die Simulationsparameter und Randbedingungen eines bestimmten Tracks können nicht nur mithilfe der eingebetteten Interaktionselemente gesetzt werden, sondern auch in speziellen Kontrollfenstern definiert werden. Vorrangig ist hier die intuitive und schnelle Benutzerführung. Es soll möglich sein auch unter zeitkritischen Bedingungen verschiedene Parameter zu testen. Diese Kontrollfenster zeigen das Szenario zum aktuellen Zeitschritt in Form einer

zwei- oder dreidimensionalen Darstellung. Die AnwenderInnen haben die Möglichkeit verschiedene Parameterwerte in diese Bilder einzuzeichnen. Abbildung 2 zeigt ein Kontrollfenster für das Dammbruchszenario. Eine schlauchförmige Kurve wurde skizziert und bestimmt die Anzahl und Abwurfstellen der Sandsäcke. Die Visualisierung zeigt sofort wie die Linienführung als Randbedingung vom Simulationssystem übernommen wird. Die wahrscheinliche Landeposition der Sandsäcke wird mithilfe von transparenten Blöcken dargestellt. Um die Randbedingungen gegebenenfalls anpassen zu können, besitzt die Kurve Interaktionspunkte zur Änderung ihrer Form.

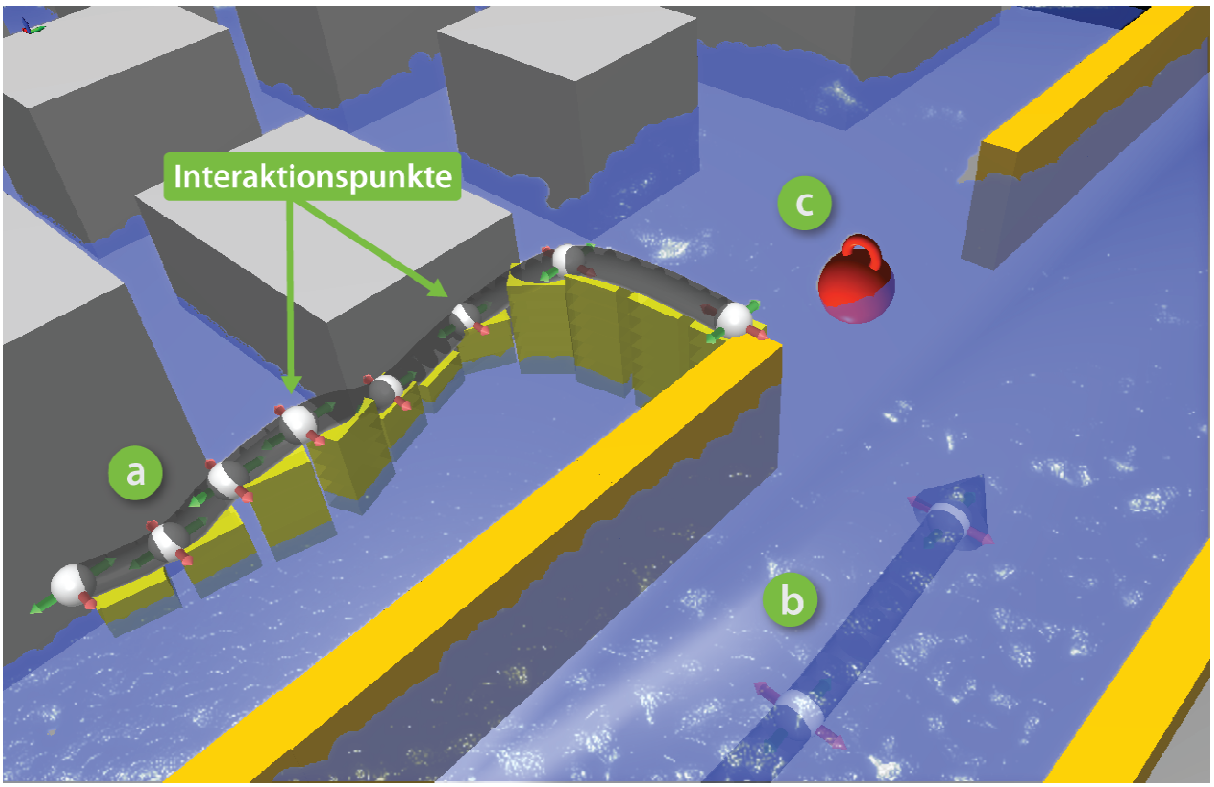


Abb. 2: Kontrollfenster zur intuitiven Eingabe von Simulationsparametern. (a) Sandsäcke werden direkt eingezeichnet. (b) Interaktive Beeinflussung der Fließparameter. (c) Eine Boje repräsentiert einen Run Watcher zur Visualisierung der lokalen Geschwindigkeit.

Die Skizzierungsmethode kann auch dazu verwendet werden, um Pseudokräfte zu erzeugen, die auf das Wasser wirken. Auf diese Weise können mögliche, bevorstehende Änderungen der Randbedingungen wie erhöhter Zufluss berücksichtigt werden, ohne auf das Fortschreiten der Simulation warten zu müssen. Durch rasches Skizzieren einer Pseudokraft, welche den Durchfluss und die Strömungsgeschwindigkeit lokal beeinflusst, kann die Auswirkung eines erhöhten Randzuflusses getestet werden.

3. Parameterstudien mit World Lines

Es ist möglich, mithilfe von World Lines eine Vielzahl von Simulationsläufen vorzudefinieren, wobei der Verzweigungsstruktur keine Grenzen gesetzt sind. Dabei ist die Eingabe von Parametern zur Erzeugung einzelner Tracks nicht immer effizient. Oft will man vollständige

Wertebereiche abhandeln wie etwa bei Ensemblesimulationen (CLOKE & PAPPENBERGER 2009). In der World Lines Ansicht können per Knopfdruck Parameterstudien erstellt werden, die den gewünschten Wertebereich durch mehrere erzeugte Tracks abdecken. Die Berechnung einzelner Werte ist durch die ausgewählte Verteilungsfunktion festgelegt. Parameterstudien in World Lines eignen sich daher zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten, die in der Hochwasservorhersage eine große Rolle spielen (APEL et al. 2004). In Abbildung 3a ist eine zeitliche Parameterstudie zu sehen. Dieser Typ wird eingesetzt, falls der Zeitpunkt eines Ereignisses und somit der Verzweigungspunkt für einen bestimmten Parameter nicht exakt bekannt ist. In dem gezeigten Beispiel wird der Zeitpunkt eines Dammbruchs mit einem Konfidenzinterval angenommen. Die resultierende Parameterstudie zeigt eine Anordnung von Tracks, deren Startzeiten und somit Dammbruchzeiten einer gaußschen Verteilung folgen.
Durch Drücken des Aufnahmeknopfes werden die Simulationsschritte aller Tracks in benutzerdefinierter Reihenfolge durchgeführt. Besonders interessant ist diejenige Abfolge, welche die Tracks nicht nacheinander simuliert, sondern den momentanen Zeitpunkt für alle Tracks im Ensemble generiert. Auf diese Weise können nicht robuste Lösungen rascher identifiziert und beendet werden.

4. Automatisierte Überwachung: Run Watchers

Je mehr Simulationsläufe auf einmal durchgeführt werden desto schwieriger kann es für die BenutzerInnen sein die Übersicht zu bewahren. Um den AnwenderInnen einfache Überwachungsaufgaben abzunehmen, schlagen wir sogenannte Run Watchers vor. Run Watchers sind vordefinierte Kriterien, die automatisch auf jeden Zeitschritt der Simulation angewendet werden um eine Statusklassifikation in Gruppen wie „grün“, „orange“ oder „rot“ zu erhalten. Zum Beispiel könnte eine Überwachung des Wasserstands Alarmstufe rot melden, sobald ein kritisches Wasserniveau erreicht ist. Die Kriterien der Run Watcher können interaktiv erstellt und verfeinert werden. Sinnvollerweise kann die Konfiguration der Run Watchers im Voraus definiert und gespeichert werden, um während des Simulationsvorgangs automatisch auf wichtige Ereignisse in den Daten hinzuweisen. Die Run Watchers können auf lokale hydrologische Kriterien eingestellt werden und werden anschaulich als interaktive Bojen dargestellt. In das Kontrollfenster in Abbildung 2 wurde eine Boje platziert, die die lokale Geschwindigkeit und den Wasserstand überwacht. Darüber hinaus kann der Run Watcher autorisiert werden, einen Simulationslauf zu terminieren, sobald ein zu hoher Wasserstand ereicht wird.
Eine weitere Anwendung ist das automatische Auffinden von bedeutsamen Merkmalen innerhalb der Ergebnisse. Diese können zum Beispiel ein hoher Wasserstand rund um Gebäude, unerwünschtes Entstehen von Wirbeln oder starke Druckunterschiede sein.

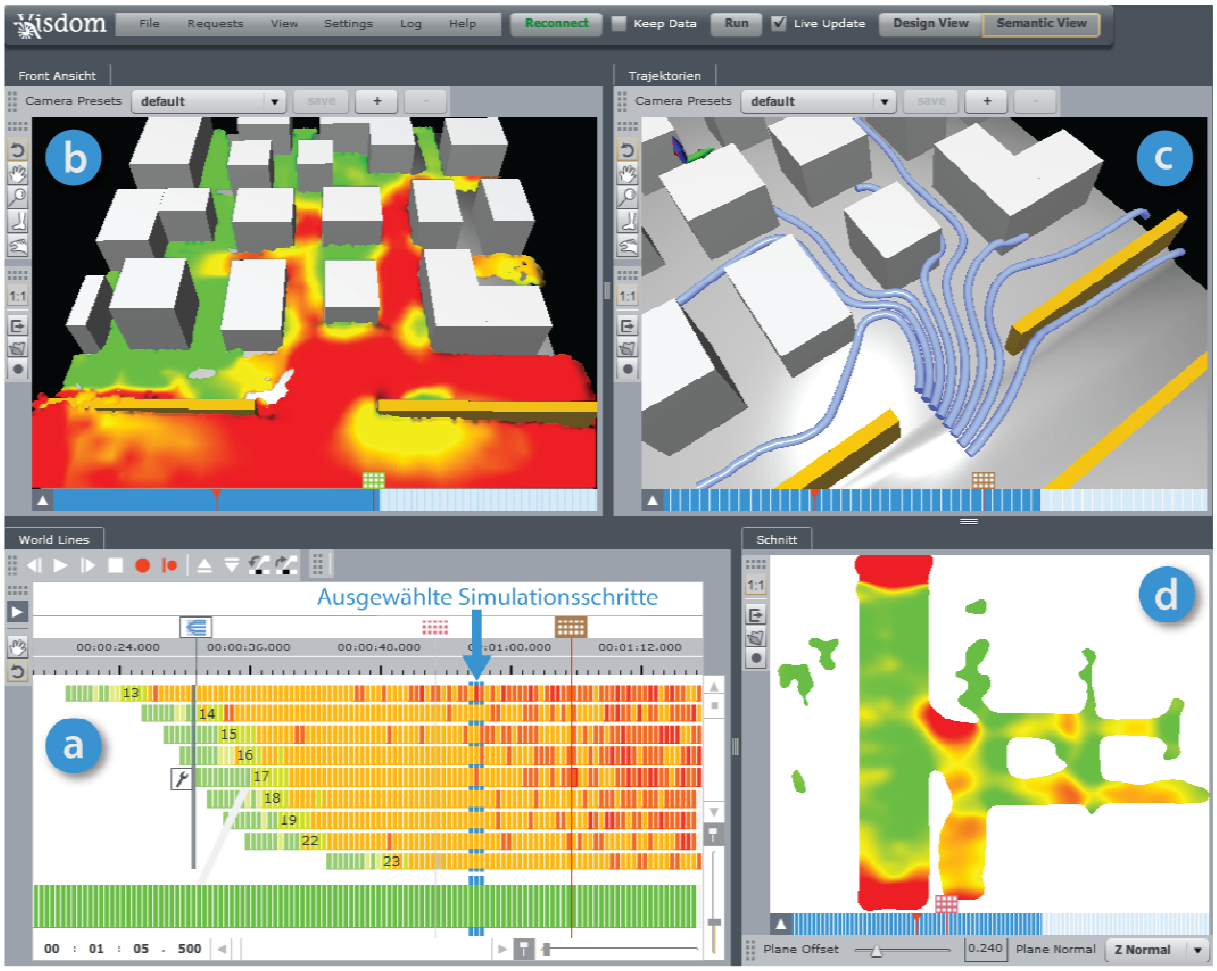


Abb. 3: Vergleichende Analyse. (a) World Lines zeigen eine Parameterstudie um Unsicherheiten bezüglich des Dammbruchzeitpunkts zu berücksichtigen. Die blau umrandeteten Simulationsläufe sind ausgewählt. (b) Die dreidimensionale Ansicht der Szene stellt vergleichende Informationen der ausgewählten Daten dar. (c) Trajektorien illustrieren das Strömungsverhalten. (d) Wassergeschwindigkeit im Schnittbild.

5. Vergleichende Visuelle Analyse

Vergleichende visuelle Analyse basiert auf der Einsicht, dass komplexe Zusammenhänge oft intuitiv durch bildliche Darstellung verständlich gemacht werden können (FUCHS & HAUSER 2009). Konkret geht es darum, ein Verständnis des komplexen Zusammenspiels zwischen Eingabeparametern und Simulationsergebnissen zu gewinnen. Abbildung 3b zeigt ein Beispiel für diesen Ansatz. Flüssigkeit und Boden sind in Falschfarben dargestellt, um die Wassergeschwindigkeit zu visualisieren. Die Farbwerte werden zwischen rot und grün interpoliert, wobei Positionen mit sehr hohen Geschwindigkeiten rot eingefärbt werden. Auch wenn man in dieser Darstellung nicht die exakten Werte ablesen kann, ist es auf diese Weise oft möglich, rasch ein intuitives Verständnis der Situation zu entwickeln. Das Beispiel in Abbildung 3b geht allerdings noch einen Schritt weiter: anstatt ausschließlich Informationen über einen einzelnen Simulationsschritt anzuzeigen, stellt die Farbe in diesem Bild die maximale Geschwindigkeit an einem Punkt über alle ausgewählten Simulationsschritte da. Aus diesem Grund ist es auch möglich, dass eine Position eingefärbt ist, an der sich im ausge-

wählten Simulationsschritt kein Wasser befindet: in anderen Simulationsschritten befindet sich Wasser an dieser Stelle und das Maximum der Wassergeschwindigkeit wird aus diesen Schritten berechnet. Auf diese Weise kann sich der Benutzer schnell einen Überblick über potentiell relevante Positionen verschaffen. Geeignete Eigenschaften sind zum Beispiel Wassertiefe, Druck, Geschwindigkeit, Dauer der Überflutung oder die Stärke von Turbulenzen in der Strömung.
Eine weitere Klasse von wichtigen Informationen, die am besten in der graphischen Darstellung verstanden werden können, sind Trajektorien von Partikel. Diese Trajektorien beschreiben näherungsweise die Bewegung der durch das Wasser mittransportierten Stoffe wie zum Beispiel Öl oder Schwemmholz. Diese Trajektorien können anschaulich durch Linienglyphen dargestellt werden, wodurch das Verhalten der Strömung während eines Zeitintervalls veranschaulicht werden kann (Abbildung 3c).
In vielen Fällen enthält die Darstellung der gesamten dreidimensionalen Szene zu viele Objekte um alle relevanten Informationen zugleich darstellen zu können. Aus diesem Grund ist es sinnvoll mehrere alternative Ansichten anzubieten. In Abbildung 3d gibt ein Schnittbild einen Überblick über die Wassergeschwindigkeit innerhalb der ausgewählten Schicht. Obwohl die zweidimensionale Darstellung eine Reduktion der vorhandenen Information darstellt, sind solche vereinfachten Ansichten oft eine nützliche Ergänzung.
Die Darstellung einzelner Simulationsschritte in World Lines kann ebenfalls zur Visualisierung von Ergebnissen verwendet werden. In Abbildung 3a wird durch Einfärbung der Simulationsschritte, die zeitliche Entwicklung der Gebäudeüberflutung dargestellt, wobei rot einen hohen und grün einen niedrigen Prozentsatz an überfluteten Gebäuden bedeutet.

6. Systemanforderungen

Um eine sinnvolle Nutzung des vorgestellten Systems in der Praxis zu gewährleisten sehen wir drei zentrale Anforderungen: Geschwindigkeit, Modularität und Kompatibilität mit dem Internet.
Geschwindigkeit: Um eine ausreichende Simulationsgeschwindigkeit zu erhalten, implementiert das System Funktionalität, um die notwendigen Berechnungen auf die Graphikprozessoren (GPU) auszulagern.
Modularität: Durch ein Plugin-system können externe Simulationsmodule einfach eingebunden werden. Darauf aufbauend steuert ein Datenflusskontrollsystem die Ausführung der individuellen Plugins. Eine interaktive graphische Oberfläche ermöglicht schnelles Hinzufügen und Austauschen von Komponenten. Eine Anwendung dieser Funktionalität wäre zum Beispiel die Wiederverwendung einer World Lines Verzweigungsstruktur, die im Vorfeld mit einer Grobsimulation erzeugt und durchgeführt wurde. Die Grobsimulation unterstützt die schnelle Berechnung auf der GPU und liefert interaktive Ergebnisse. Im Anschluss an diese Phase kann das Simulationsmodul ausgetauscht werden um genauere Ergebnisse über Nacht zu bestimmen.
Web-basierter Zugriff: Das System ist in zwei Komponenten aufgeteilt. Der Server übernimmt die numerische Berechnung und die Verwaltung der Daten. Der Client ist eine schlanke Webanwendung, die auch im Browser eines Mobilgerätes lauffähig ist. Dadurch muss der Anwender das System nicht installieren und die Administration der Hardware kann zentral

erfolgen. Die aufwendigen Berechnungen werden im entfernten Server durchgeführt, nur Bilder und Ergebnisse werden an den Browser des Anwenders gesendet. Dieses Design hat eine Reihe von Vorteilen: das auf Kombination mit dem Internet ausgelegte System ermöglicht die Entwicklung zusätzlicher Schnittstellen um weitere Informationen aus dem Internet einzubinden. Relevant könnten Informationen über lokale Abflussbedingungen sein oder über das Internet verfügbare Geoinformation.

7. Diskussion

Visdom kombiniert Simulation, Visualisierung und interaktive Analyse der Ergebnisse in einer einzigen Anwendung, wodurch ein intuitives Aufsetzen und Vergleichen von mehreren Simulationsläufen möglich wird. Verschiedene Simulationsparameter wie zum Beispiel die Abwurfposition von Sandsäcken, können durch zeichnerische Interaktion mit der Visualisierung definiert werden. Mit dieser Methode könnte das Training von Personal vereinfacht werden, weil die übende Person kein detailliertes Expertenwissen über die zugrundeliegende Simulationstechnik benötigt. Der offline Einsatz des präsentierten Systems als Hilfestellung bei der Definition von Aktionsplänen im Hochwassermanagement ist vorstellbar. Ein erster Schritt in Richtung Praxis müsste die Modularität der Applikation ausnützen um existierende hydrologische Simulationskomponenten einzubinden. Durch Zusammenarbeit mit den AnwenderInnen können dann Visualisierungen und Eingabemethoden entwickelt werden, welche auf die Erfahrung und das Wissen der BenutzerInnen abgestimmt sind.

Literatur

APEL, H., A. H. THIEKEN, B. MERZ & G. BLÖSCHL (2004) Flood risk assessment and associated uncertainty. Natural Hazards and Earth System Science, 4, 295-308.

FUCHS, R. & H. HAUSER (2009) Visualization of Multi-variate Scientific Data. Computer Graphics Forum, 28, 1670-1690.

MINKOWSKI, H. (1909) Raum und Zeit. Physikalische Zeitschrift, 10, 104-111.

CLOKE, H.L. & F. PAPPENBERGER (2009) Ensemble flood forecasting: A review. Journal of Hydrology, 375, 613-626.

SATTAR, A. M. A., A. A. KASSEM & M. H. CHAUDHRY (2008) Case Study: 17th Street Canal Breach Closure Procedures. Journal of Hydraulic Engineering, 134, 1547-1558.

WASER, J., R. FUCHS, H. RIBICIC, B. SCHINDLER, G. BLÖSCHL & E. GRÖLLER (2010) World Lines. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16 (6), pp. 1458-1467.

Wirksamkeit von Öffentlichkeitsbeteiligung im Flussgebietsmanagement am Beispiel des F&E-Projekts IMSURF-RBM

Karl Rohrhofer, Frederick M. Cate, Julia Pfann

Zusammenfassung

Die Öffentlichkeitsbeteiligung spielt in einem ganzheitlichen Flussgebietsmanagement eine zentrale Rolle und hat eine Tradition sowohl in Europa (Niederlände, Frankreich) als auch und in angelsächsischen Ländern wie z.B. USA, UK, Australien. In Deutschland und Österreich tat man sich bislang mit dem ganzheitlichen Ansatz des Flussgebietsmanagements und mit der damit verbundenen Öffentlichkeitsbeteiligung schwer. Durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wird jedoch die Wasserwirtschaft in diesen Ländern vor große Herausforderungen gestellt und sucht auch nach Möglichkeiten, die Anforderungen der WRRL hinsichtlich Öffentlichkeitsbeteiligung zu erfüllen.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts IMSURF-RBM (Integrated Monitoring of Surface Water Quality in the Lafnitz River Basin as a Contribution to Integrated River Basin Management in Medium-sized International River Basins) des Clusters „austrian water“ wurde die Wirksamkeit der Öffentlichkeitsbeteiligung untersucht und auch eine Methode entwickelt, um die Wirksamkeit von Öffentlichkeitsbeteiligungen in Flussgebieten mit unterschiedlichem Charakter zu bewerten.

In Anbetracht des global wachsenden Anteils der Bevölkerung in urbanen Konglomeraten erfolgt auch ein Ausblick auf die Frage der öffentlichen Beteiligung im Flussgebietsmanagement in urbanem Raum.

1. Einleitung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) stellte und stellt die Wasserwirtschaftsverwaltung aufgrund des neuen Paradigmas des sektorübergreifenden, integrativen und verstärkt partizipativen Flussgebietsmanagements vor große Herausforderungen. Besonders die geringer werdende Personaldecke erschwert es den zuständigen Verwaltungen, eine breite Öffentlichkeitsbeteiligung zu organisieren (UHLENDAHL 2010).

In Österreich tat man sich bislang mit diesem integrativen Ansatz des Flussgebietsmanagements schwer. Nicht nur, dass das System der Flussgebietseinheiten über bisherige wasserwirtschaftliche Strukturen hinausgeht, auch hat die Verwaltung mit der Öffentlichkeitsbeteiligung wenig Erfahrung, im Gegensatz zu den angelsächsischen Ländern wie z.B. USA, UK, Australien. In einer Analyse der bisherigen Bürgerbeteiligungsprozesse in Österreich und Deutschland musste konstatiert werden, dass die Bürgerbeteiligung in den Bundesländern der beiden Staaten überwiegend einem Top-Down-Ansatz gefolgt war. Traditionelle Frontalveranstaltungen mit Verbandsfunktionären würden aber kaum dem Geist der Wasserrahmenrichtlinie entsprechen (GEILER 2010). Öffentlichkeitsbeteiligung im Sinne des Artikels 14 der WRRL und der Århus-Konvention hat in Österreich kaum Tradition und wurde von manchen in der Verwaltung als „lästige Notwendigkeit“ gesehen. Die Erkenntnis, dass sich schwierige Prozesse und oft unangenehme Maßnahmen leichter verwirklichen

lassen, wenn sie von einer breiten Öffentlichkeit mitgetragen werden, hat sich leider noch nicht überall durchgesetzt.

2. „Breite Öffentlichkeitsbeteiligung“ oder Stakeholderbeteiligung

In Artikel 14 “Information und Anhörung der Öffentlichkeit“ der WRRL sieht die Richtlinie vor, dass „Die Mitgliedstaaten fördern die aktive Beteiligung aller interessierten Stellen an der Umsetzung dieser Richtlinie, insbesondere an der Aufstellung, Überprüfung und Aktualisierung der Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete“. Nähere Ausführungsbestimmungen fehlen und „aktive Beteiligung“ ist weniger rechtsverbindlich als die Anhörung zum Bewirtschaftungsplan. Ebenso ist die Auswahl der Beteiligten („interessierte Stellen“) zwangsläufig selektiv angesichts der Vielzahl zu bewältigender Aufgaben bei der Umsetzung der gesamten Richtlinie (NEWIG 2003). In der Begründungserwägung Nr. 14 erklärt die Richtlinie: „Der Erfolg der vorliegenden Richtlinie hängt von einer engen Zusammenarbeit und kohärenten Maßnahmen auf gemeinschaftlicher, einzelstaatlicher und lokaler Ebene ab. Genauso wichtig sind jedoch Information, Konsultation und Einbeziehung der Öffentlichkeit, einschließlich der Nutzer.“

Abb. 1: Stufen der Beteiligung der Öffentlichkeit (EU 2002)

Obwohl der Begriff „Beteiligung der Öffentlichkeit“ in der Richtlinie nicht verwendet wird, werden drei Formen der Beteiligung der Öffentlichkeit – Informationsvermittlung, Anhörung und aktive Beteiligung – erwähnt. Gemäß der Richtlinie sind die beiden ersten „zu gewährleisten", letztere soll „gefördert" werden (vgl. Abbildung 1). Der Umsetzungsleitfaden zeigt, wie sehr die aktive Beteiligung für Erreichung der Ziele der Richtlinie genutzt werden kann. Die drei genannten Formen können als “Beteiligung der Öffentlichkeit“ interpretiert werden, obwohl Beteiligung der Öffentlichkeit meist eine breiteres Spektrum an Aktivitäten umfasst als in der Richtlinie beschrieben. Außerdem wird eingeschränkt, dass „es keinen einzig richtigen Ansatz zur Durchführung aktiver Beteiligung gibt. Sie erfordert ein maßgeschneidertes Vorgehen, das immer kontextspezifisch ist. Dies erschwert es, im Sinne einer Beschreibung des Prozesses aktiver Einbeziehung Vorgaben zu machen“ (EU 2002).
Da genaue Vorgaben in der Richtlinie fehlen und der Umsetzungsleitfaden einräumt, dass ein „maßgeschneidertes Vorgehen, das immer kontextspezifisch ist“ sinnvoll ist, stellt sich für die Praxis die Frage ob alle Stufen der Beteiligung der „breiten Öffentlichkeit“ zugänglich gemacht werden sollen, oder ob ein „kombinierter Ansatz“ praktikabler ist. Zugang zu

Informationen im Sinne der Informationsvermittlung kann mit relativ einfachen Mitteln einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.
Die zweite Stufe – Anhörung – ist schon mit mehr Aufwand verbunden, wie z.B. die Internetplattform „Wasseraktiv“ des Österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) zeigt. Obwohl alle Beteiligten ein Feedback erhalten haben, ist aufgrund des Umfangs der Anregungen zu hinterfragen, in wie weit alle eingebrachten Anliegen bei der Erstellung des Nationalen Gewässerentwicklungsplanes tatsächlich berücksichtigt werden konnten. Bei der dritten Stufe, der aktiven Beteiligung, wäre eine Einbindung der breiten Öffentlichkeit schon in einem relativ kleinen EU-Mitgliedsstaat wie Österreich, nur mit einem unverhältnismäßig hohen Kostenaufwand möglich. In den größeren Mitgliedsstaaten wie Frankreich oder Deutschland ist eine derartige Einbindung wahrscheinlich nicht praktikabel.
So wäre u.U. ein „kombinierter, stufenartiger Ansatz“ praktikabler und mehr im Sinne der WRRL. In diesem wird die breite Öffentlichkeit in der ersten Stufe ausführlich informiert. In der zweiten Stufe bekommt sie eine Möglichkeit Anregungen einzubringen, aber nur in solchem Maß, dass diese dann auch in vollem Umfang in die Bearbeitung einfließen können. Die „interessierte Stellen“ werden im Umsetzungsleitfaden definiert, als „jede Person, Gruppe oder Organisation mit einem Interesse (‚Stake’) an einem Thema, entweder, weil sie unmittelbar betroffen sind oder weil sie Einfluss auf das Ergebnis haben könnten. ‚Interessierte Stelle’ umfasst auch Mitglieder der Öffentlichkeit, die sich noch nicht dessen bewusst sind, dass sie betroffen sein werden (in der Praxis meist einzelne Bürger und viele kleine Nicht-Regierungsorganisationen und Unternehmen)“ (EU 2002). Diese interessierten Stellen (‚Stakeholder’) werden bereits in der zweiten Stufe identifiziert und ihnen wird dann in der dritten Stufe die aktive Beteiligung ermöglicht. Teilweise wurde dies in Österreich durchgeführt, da es einerseits Hintergrundgespräche mit Lobbyvertretern der Wasserkraft, Fischerei, NGOs etc. gab. Andererseits gab es Initiativen, z.B. vom Umweltdachverband die Stakeholder zur Diskussion an den runden Tisch zu holen. Außerdem gab es F&E-Projekte wie IMSURF-RBM des Clusters „austrian water“, die teilweise mit öffentlichen Mittel (EraSME FFG) finanziert wurden oder Projekte der Bundesländer, wie z.B. den „Flussdialog 2009“. Diese Art der Beteiligung kann zu einem konstruktiven Dialog aller einbezogenen, relevanten Stellen fu□hren und die verschiedenen Stakeholder, die Verwaltung und die Fachleute können vom Bewusstsein des jeweils anderen im Hinblick auf Wasserbewirtschaftungsfragen lernen. Obwohl z.B. das Projekt „Flussdialog 2009“ in den Regionen sehr gut angenommen wurde, sind manche dieser Prozesse gescheitert oder haben nicht die gewünschte Wirkung erzielt. Wesentlich ist immer die entsprechende Unterstützung der wasserwirtschaftlichen Verwaltung um einen Erfolg sicher zu stellen.

3. Beispiel IMSURF-RBM – Stakeholderbeteiligung und ihre Wirksamkeit

Im Zuge des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten F&E-Projekts IMSURF-RBM wurden im Flussgebiet der Lafnitz (vgl. Abbildung 2), einem Flussgebiet mittlerer Größe (ca. 2.000 km²), verschiedene Methoden der Stakeholderbeteiligung erprobt.

Abb. 2: Lage des Bearbeitungsgebietes des Projekts IMSURF-RBM

Eine der Methoden waren leitfadengestützte Befragungen bei Gemeindevertretern. Dabei sollten Vertreter aller 65 Gemeinden im Bearbeitungsgebiet zu ihren gewässer-spezifischen Problemen und Wünschen befragt werden. In 45 Gemeinden konnte diese Befragung persönlich stattfinden, zwei wurden telefonisch befragt, in weiteren 18 Gemeinden war es leider nicht möglich, einen Termin zu vereinbaren. Allgemein standen die GemeindevertreterInnen den Befragungen sehr positiv gegenüber und waren sehr auskunftswillig. Probleme wie z.B. ein deutlich sichtbarer Rückgang von Wasser in der Region und sinkende Fischbestände in den letzten Jahren wurden ebenso genannt wie Wasserverschmutzung durch landwirtschaftliche Flächen, die direkt bis an die Ufer reichen. Nach dieser Befragung und während des weiteren Projektablaufs wurden drei Workshops durchgeführt. Dabei sollten die gewonnenen Informationen überprüft und zur Diskussion gestellt werden. Bei den Workshops waren Stakeholder wie Fischerei, Wasserkraft, Landwirtschaft, Tourismus etc anwesend und vertraten ihre gewässerspezifischen Anliegen mit großem Interesse. Die „breite Öffentlichkeit“ konnte jedoch trotz Bemühungen in den Gemeinden nicht erreicht werden. So konnte auch im Projekt IMSURF-RBM die Erfahrung gewonnen werden, dass obwohl die "breite Öffentlichkeit" das Gewässer zwar sehr stark lebensraumprägend wahrnimmt, diese aber im Allgemeinen nicht bereit ist, Zeit für Beteiligungsprozesse aufzuwenden. Daraus lässt sich schließen, dass entweder eine reine Stakeholderbeteiligung oder ein kombinierter Ansatz (siehe oben), der der breiten Öffentlichkeit die Chance gibt, nach Interesse und Zeitkapazität sich einzubringen, in der Regel sinnvoller ist als nur eine breit angelegte Öffentlichkeitsbeteiligung.
Ein Sorgenkind bei der Partizipation à la EG-WRRL waren und sind die Kommunen in den Flusseinzugsgebieten. Es gibt nur wenige Leuchtturmprojekte, in denen sich die Gemeinden entlang eines Fließgewässers zu ihrem Fluss bekennen und sich koordiniert für dessen

ökologische Aufwertung stark machen (GEILER 2009). Eine effiziente Möglichkeit die "breitere Öffentlichkeit" einzubeziehen ist über die aktive Teilnahme der gewählten Gemeindevertreter bei dem Beteiligungsprozess. Hier können Gemeindevertreter, die "nahe an dem Bürger" sind, wichtige Drehscheiben für die Information und für die Einbringung von Bedürfnisse und Anregungen der Bürger sein. Sowohl im Projekt IMSURF-RBM als auch in einem früheren F&E Projekt im Oberen Triestingtal (NÖ) hat sich der Einsatz der Gemeindevertreter als Vermittler zu den Bürgern bewährt. In einem weiteren Projekt auf Gemeinde-Ebene in Karlstein (NÖ) haben die Gemeindevertreter eine zentrale Rolle im Beteiligungsprozess eingenommen.

Im Rahmen des IMSURF-RBM Projekts wurde auch eine Methode entwickelt, um die Wirksamkeit von Öffentlichkeitsbeteiligungen zu bewerten. Dafür wurden drei Fallstudien, die Flussgebiete unterschiedlichen Charakters beinhalten, herangezogen.

- Lafnitz, 2000 km², 66 Gemeinden, ca. 80.000 Einwohner
- Obere Triestingtal, 200 km², 5 Gemeinden, ca. 9.000 Einwohner
- Karlstein, 49 km², 1 Gemeinde, ca. 1.600 Einwohner

Es wurden Parameter identifiziert, die die Zielerreichung von Flussgebietsmanagement-projekten charakterisieren. Da diese mitunter kaum oder gar nicht im klassischen Sinn zu messen sind wurden die Fallstudien mittels einer „Auswertung ohne Messung“ evaluiert. Drei Hauptparameter (Effizienz, Akzeptanz und Kosten) wurden definiert, verbal beschrieben und einem bestimmten Erfüllungsgrad zugewiesen.

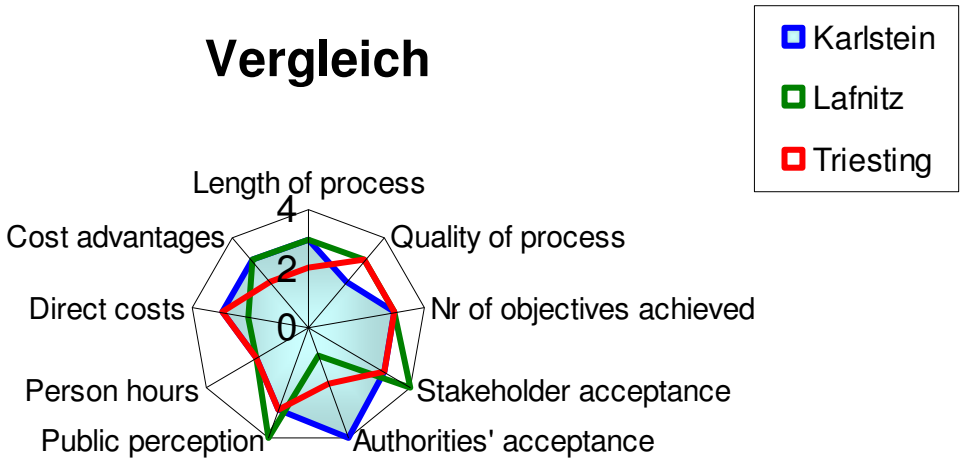


Abb. 3: Vergleich der Effektivität von Öffentlichkeitsbeteiligungsprozessen (CATE 2008)

Dabei hat sich herausgestellt, dass die Größe und Komplexität des Bearbeitungsgebietes einen großen Einfluss auf die Parameter hat. Um einen sinnvollen Vergleich von Flussgebieten mit unterschiedlicher Größe und Komplexität durchführen zu können, werden mit Hilfe diese beiden Faktoren eine Homogenisierung der Erfüllungsgrade durchgeführt, z.B. die Kosten bei einem große Einzugsgebiet werden "herunter" skaliert um die Vergleichbarkeit mit den Kosten eines kleinen Einzugsgebiet herstellen zu können. Während die Größe leicht ermittelt werden kann (z.B. anhand des Flusseinzugsgebiets), ist die Komplexität schwieriger zu quantifizieren. Als mögliche Variable für Komplexität kann die Anzahl der Beteiligten verwendet werden. Mit dieser Methode lassen sich die Stärken und

Schwächen der untersuchten Prozesse der Öffentlichkeitsbeteiligung eindeutig erkennen. Die Resultate können einfach und schnell für den Vergleich von Öffentlichkeitsbeteiligungsprozessen in unterschiedlichen Flussgebietsmanagementprojekten verwendet werden.

4. Ausblick auf Flussgebietsmanagement im urbanen Raum

Der Großteil der Erfahrungen mit der öffentlichen Beteiligung beim Prozess des Flussgebietsmanagements ist in Einzugsgebieten gewonnen worden, die entweder überwiegend ländlicher Natur sind oder hauptsächlich dem ländlichen/sub-urbanen Raum zu zuordnen sind. Dazu gibt es auch viele Beispiele und eine umfangreiche Literatur.

In Anbetracht des global wachsenden Anteils der Bevölkerung in urbanen Konglomeraten ist jedoch die Frage der öffentlichen Beteiligung im Flussgebietsmanagement in urbanen Bereichen von steigender Bedeutung. Damit wird gewissermaßen Neuland betreten, sowohl in der Umsetzung als auch in der Forschung, wobei durchaus auf bisherige Erfahrungen aus den nicht-urbanen Bereichen herangezogen werden können.

In sektoralen Bereichen der Wasserwirtschaft wird schon der Bezug zum Flussgebietsmanagement bewusst hergestellt, wie z.B. beim „Integralen Kanalmanagement" in der Europäischen Norm EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden“. Ein Beispiel für laufende Forschungsvorhaben zu dieser Frage ist das von der Europäischen Kommission finanziertes Projekt "PREPARED Enabling Change". (PREPARED) im Kontext des Siebenten Rahmenprogrammes "Umwelt". Im "Policy brief" zum Projekt wird ausgeführt:

The PREPARED project originates from the WSSTP (Water Supply and Sanitation Technology Platform - www.WssTP.eu) thematic working group Sustainable Water Management in Urban areas. The PREPARED project is about the adaptation of the water supply and sanitation sector to cope with the impacts of climate change. Among other tasks PREPARED will also do that through the creation of awareness amongst end-users through participatory approaches and enabling change within the local and national decision making processes as well as positively affecting the decision-making and policy processes at local level through the key involvement of the problem-owners: the city utilities. The PREPARED project is driven by the problem□owners/end-users: 12 European city utilities and 2 non-European utilities. PREPARED focuses on the urban water cycle, the WFD on river basin management, the difference being mainly the scale. PREPARED will work [sic] a risk assessment and risk management approach to the whole urban water cycle. A sucess factor will be the communication of risks and costs to the people involved, the citizens (HULSMANN et al 2010).

Die Gewässer in der Stadt haben eine Vielzahl von Funktionen auf engstem Raum zu erfüllen. Die größeren Fliessgewässer sind z.B. für Schifffahrt und für die Energiegewinnung interessant (z.B. KW Freudenau in Wien), die mittleren und kleineren sind u.a. Vorfluter für die Niederschlagswasserentwässerung bzw. für Mischwasserüberläufe. Entlang diesen Gewässern sind Naherholungsräume und Radwege (z.B. in Wien Liesing, Wienfluss). Die stehenden Gewässer sind vielfach bedeutende Erholungsräume (z.B. Wannsee in Berlin, Alte Donau in Wien). Ein klassisches Beispiel für eine Mehrzwecknutzung im urbanen Raum ist die Neue Donau in Wien (Hochwasserschutz, Naherholung, Veranstaltungsort, Grund-

wasseranreicherung). Alle diese Gewässer stehen im Zusammenhang mit dem Grundwasser; sind vom Hochwasser betroffen; und sind vielfach Vorfluter für das Entwässerungssystem.

Auch im urbanen Raum muss somit der Blick das gesamte Einzugsgebiet umfassen. Hier sind Rückhalt und Versickerung des Regenwasserabflusses sowie der Rückhalt des Hochwassers anzuführen. Vor allem die Grundwassersituation ist als Gesamtes in Wechselwirkung mit Gewässern, Wasserversorgung, Entwässerungssystemen und sonstige Infrastruktur zu beachten.

Am Beispiel der Regenwasserbewirtschaftung ist klar ersichtlich, wie die einzelnen Bürger in ihrem Nahbereich von der Wasserwirtschaft betroffen sind. Die Anlage von Versickerungen zur Entlastung der Regenwasserkanäle und zur Anreicherung des Grundwassers ist hier anzuführen wie auch die Frage der Entwässerung von Hofflächen und Dächern. Die Frage stellt sich zum Beispiel, ob durch Rückhaltemaßnahmen in den Außenbezirken eine wesentliche Entlastung des dichten verbauten Stadtkerns zu erreichen ist. Hier kann als Beispiel das Bachkonzept der Stadt Zürich angeführt werden.

Infolge dieser vielseitigen sachlichen und räumlichen Wechselwirkungen wird die Beteiligung der Öffentlichkeit im Rahmen eines urbanen Flussgebietsmanagement vor große Herausforderungen gestellt. Wahrscheinlich ist ein stufenweises Vorgehen wie oben beschrieben am sinnvollsten. Eine wesentliche Rolle werden auch die gewählten MandatarInnen in den Bezirken wie z.B. zuständige Bezirksräte/Bezirksrätinnen in Wien zu erfüllen haben. Wesentlich sind auch klare Vereinbarungen über die jeweilige Rolle der einzelnen städtischen Verwaltungsabteilungen bzw. städtischen Betrieben sowohl im Rahmen des Flussgebietsmanagement als auch bei der Öffentlichkeitsbeteiligung. Eine entsprechende Schulung der beteiligten Mitarbeiter dieser Organisationen wird erforderlich sein, um eine effektive Umsetzung zu erreichen.

Literatur

CATE, F.M. et al. (2008): Analysis of Public Participation in River Basin and Water Resource Management - Efficiency, Acceptance, Cost Implications; Poster Presentation, 11th International Specialised Conference on Watershed and River Basin Management; Budapest, 3 – 5. September 2008

EU (2002): Leitfaden zur Beteiligung der Öffentlichkeit in Bezug auf die Wasserrahmenrichtlinie. Aktive Beteiligung, Anhörung und Zugang der Öffentlichkeit zu Informationen (Übersetzung der englischen Originalfassung). Endgültige, nach dem Treffen der Wasserdirektoren im November 2002 erarbeitete Fassung. Guidance Document No. 8.

GEILER, N. (2009): Öffentlichkeitsbeteiligung in den deutschen Bundesländern: Von der Frontalveranstaltung bis zur aktiven Einbindung in die Maßnahmenplanung; Vortrag Regensburg 2009

GEILER, N. (2010): Outsourcing des Bürgerbeteiligungsprozesses? Gedanken und Entwicklungen in der österreichischen Wasserwirtschaft. – In: Korrespondenz Wasserwirtschaft. Hrsg. DWA. Hennef, 2010.

HULSMANN, A. et al. (2010): PREPARED Enabling Change – Policy Brief. 7th Framework Programm

NEWIG, J. (2003): Information, Anhörung, Partizipation – die Öffentlichkeitsbeteiligung nach der EG-Wasserrahmenrichtlinie – Hintergründe, Anforderungen und Fragen der Umsetzung, Vortrag gehalten auf dem 12. Workshop „Umweltrecht“ der Lehrstühle Schulte (TU Dresden) und Oebbecke (Univ. Münster) in der Historisch-Ökologischen Bildungsstätte, 3.–5.9. 2003, Papenburg.

UHLENDAHL, T.CH. (2010): Flussgebietsmanagement in der Diskussion – Ein Kommentar Herausforderungen an ein integratives Flussgebietsmanagement. – In: Korrespondenz Wasserwirtschaft. Hrsg. DWA. Hennef, 2010.

weitere Literaturhinweise

CONRADIN, F. & J. VILLIGER (1993): Das Bachkonzept der Stadt Zürich. Eine Standortbestimmung nach fünf Jahren. Hrsg. GWA Zürich.

DAVENPORT, T.E. (2003): The Watershed Project Management Guide. Lewis Publishers. Boca Raton.

KATZNER, D.W. (1983): Analysis without measurement. Cambridge University Press. Cambridge.

Autorenverzeichnis

Bárdossy, András, Prof. Dr.-Ing. habil., Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Tel.: +49 711 685 64663, E-mail: andras.bardossy@iws.uni-stuttgart.de

Barneveld, Hermjan, Ir., HKV Hydrokontor GmbH, Dennewartstr. 25/27, 52068 Aachen,Tel.: +49 (0)241 9631282, Fax: +49 (0)241 9631284, E-mail: barneveld@hkv-hydrokontor.de

Belli, Aslan, Dipl.-Ing., Institut für Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Tel.: +49 511 762 2497, E-mail: belli@iww.uni-hannover.de

Beudert, Burkhard, Dipl.-Geoökologe, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald Sachgebiet Forschung und Dokumentation Integriertes Ökosystemmonitoring, Konrad-Wilsdorfstraße 3, 94518 Spiegelau, 08553 979492, 08553 979493, E-mail: bbeudert@npv-bw.de

Blaschke, Alfred Paul, Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, Österreich, Tel: +43-1-58801-22325, Fax:+43-1-58801-22399, E-mail: blaschke@hydro.tuwien.ac.at

Blöschl, Günter, Univ. Prof. Dr., TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, Österreich, Tel: +43-1-58801-22315, Fax:+43-1-58801-22399, E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Blume, Theresa, Dr., Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Sektion 5.4, Hydrologie, Telegrafenberg, C4 2.25, D-14473 Potsdam, Tel: 0331-288-1512, Fax: +49 331 288-1570 , E-mail: theresa.blume@gfz-potsdam.de

Böhm, Oliver, Diplomgeograph, Universität Augsburg, Lehrstuhl für Physische Geographie und Quantitative Methoden, Universitätsstraße 10, 86135 Augsburg (Germany), +49(0)821-598 2279, E-mail: oliver.boehm@geo.uni-augsburg.de

Böhm, Reinhard, Dr., Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien, E-mail: reinhard.boehm@zamg.ac.at

Bormann, Helge, Apl.-Prof. Dr., Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, 26111 Oldenburg, Tel.: 0441-798-4459, Fax.: 0441-798-3769, E-mail: helge.bormann@uni-oldenburg.de

Brinkmann, Martin, Dipl.-Ing., Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen, +49 (0)211 15902212, +49 (0)211 15902176, E-mail: martin.brinkmann@lanuv.nrw.de

Büttner, Uwe, Dipl.-Hydr., Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Landeshochwasserzentrum, Zur Wetterwarte 3, 01109 Dresden, Tel: +49-351-89284512, E-mail: Uwe.Buettner@smul.sachsen.de

Buytaert, Wouter, Dr., Imperial College London, Department of Civil and Environmental Engineering, Environmental & Water Resources Engineering, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, Tel: +44-20-7594-1329, E-mail: w.buytaert@imperial.ac.uk

Casper, Markus, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Universität Trier Fachbereich VI – Geographie/Geowissenschaften, Behringstrasse, 54286 Trier, Tel.: 0651-201 4518, Fax: 0651-201 3976, E-mail: casper@uni-trier.de

Cate, Frederick M., DI, Interival ZT GmbH, Carl Reichert-Gasse 28, 1170 Wien, Tel. +43 (0) 1-4805010-0, Fax +43 (0) 1-4805010-99, E-mail: frederick.cate@interival.at

Chiari, Michael, DI Dr., Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, Peter-Jordanstraße 82, 1190 Wien, E-mail: michael.chiari@boku.ac.at

Chirico, Giovanni B., Dr., University of Naples Federico II, Division for Water Resources and Biosystems Engineering, Department of Agricultural Engineering and Agronomy, Via Università n. 100, 80055 Portici (Naples), Italien, Tel.: +39-081-2539423; Fax: +39-081-2539412, E-mail: gchirico@unina.it

Danáčová, Michaela, Department of Land and Water Resources Management, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, E-mail: michaela.danacova@stuba.sk,

Diener, Jürgen, Dipl.-Ing., Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, Hohenzollernstraße 50, 45128 Essen, Tel. +49(0)2013610-200, Fax. +49(0)2013610-100, E-mail: j.diener@ewlw.de

Disse, Markus, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Wasserwesen, Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Tel.: +49 (0)89 6004 3491, Fax: +49 (0)89 6004 4642, E-mail: markus.disse@unibw.de

Drabek, Ulrike, Dipl.-Ing. Dr., Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222-2, 1040 Wien, Tel. +43-1-58801-22314, Fax +43-1-58801-22399, E-mail: drabek@hydro.tuwien.ac.at

Drastig, Katrin, Dr., Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, Tel.: +49-(0)331-5699-218, Fax: +49-(0)331-5699-849, E-mail: kdrastig@atb-potsdam.de

Ebner von Eschenbach, Anna-Dorothea, Doktor-Ingenieurin, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, +49 261-1306-5187, +49 261 1306-5280, E-mail: EbnerVonEschenbach@bafg.de

Exbrayat, Jean-François, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement (ILR), Justus-Liebig-Universität Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany, Tel: 0641-99-37384, Fax: 0641-99-37389, E-mail: Jean-Francois.Exbrayat@umwelt.uni-giessen.de

Fenz, Robert, Dipl.-Ing., Dr., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasser, Sektion VII/1, E-mail: robert.fenz@lebensministerium.at

Fleckenstein, Jan, Dr., Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Department Hydrogeologie, D-04318 Leipzig, E-mail: jan.fleckenstein@ufz.de

Flühler, Hannes, Prof. Dr. em., ETH Zürich, Institut für Terrestrische Ökosysteme, CHN F 50.4, Universitätstrasse 16, 8092 Zürich, Schweiz, Tel: +41-44-633-6070, Fax: +41-44-633-1123, E-mail: hannes.fluehler@env.ethz.ch

Frei, Sven, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Hydrologie, D-95447 Bayreuth, E-mail: sven.frei@uni-bayreuth.de

Fuchs, Martin, DI Dr., Pöyry Energy GmbH, Laaer-Berg-Straße 43, 1100 Wien

Fuchs, Raphael, Dipl.-Inf. Dr., ETH-Zentrum Computational Science, Universitätsstraße 6, 8092 Zürich, Schweiz, Tel: +41-44-6327144, E-mail: raphael@inf.ethz.ch

Gobiet, Andreas Ass.-Prof. Dr., Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WegCenter), Institut für Physik, Institutsbereich für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie (IGAM), Karl-Franzens-Universität Graz, Leechgasse 25, A-8010 Graz, Österreich, Tel.: +43-(0)316-380-8448, Fax.: +43-(0)316-380-9830, E-mail: andreas.gobiet@uni-graz.at

Grigoryan, Gayane, Dipl.-Umweltwiss., Universität Trier Fachbereich VI – Geographie/Geowissenschaften, Behringstrasse, 54286 Trier, Tel.: 0651-201 4556, Fax: 0651-201 3976, E-mail: grigorya@uni-trier.de

Gronz, Oliver, M.Sc., Universität Trier Fachbereich VI – Geographie/Geowissenschaften, Behringstrasse, 54286 Trier, Tel.: 0651-201 4555, Fax: 0651-201 3976, E-mail: gronz@uni-trier.de

Grünewald, Uwe, Prof. Dr. rer. nat. habil., Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus, Telefon: +49-355-69-4233, Fax: +49-355-69-4235, E-mail: Uwe.Gruenewald@tu-cottbus.de

Gustafsson, David, Dr., Royal Institute of Technology KTH, Department of Land and Water Resources Engineering, Stockholm, Schweden, Tel: +46-8-790-7382, E-mail: davidg@kth.se

Gutknecht, Dieter, em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c, TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13, 1040 Wien, E-mail: dieter.gutknecht@tuwien.ac.at.

Haberlandt, Uwe, Prof. Dr.-Ing., Institut für Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Tel.: +49 511 762 2287, E-mail: haberlandt@iww.uni-hannover.de

Hannaford, Jamie, Head of the National River Archive, NERC Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Grossbritannien, E-mail: jaha@ceh.ac.uk

Hannappel, Stephan, Dr., HYDOR Consult GmbH, Am Borsigturm 40, D-13507 Berlin, 0049-30-43726730, E-mail: hannappel@hydor.de

Haslinger, Klaus, Mag., Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien, E-mail: klaus.haslinger@zamg.ac.at

Hausmann, Bernd, Dipl.-Ing., Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe Straße 1, 52074 Aachen, +492418025281, +492418022701, E-mail: hausmann@lfi.rwth-aachen.de

Heinemann, Günther, Univ.-Prof. Dr., Universität Trier Fachbereich VI – Umweltmeteorologie, Behringstrasse, 54286 Trier, Tel.: 0651-201 4623, Fax: 0651-201 3817, E-mail: heinemann@uni-trier.de

Heinz, Ingo Dr., Universität Dortmund (ehem.), Bierstraße 9, 58239 Schwerte, 02304-74831, E-mail: ingo.heinz@uni-dortmund.de

Heller, Katja, Dipl.-Geogr., Institut für Geographie, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr.10, 01069 Dresden, E-mail: katja.heller@tu-dresden.de

Hoevel, Hartmut, Dipl.-Ing., Erftverband, Am Erftverband 6, 50126 Bergheim/Erft, (02271) 88-1142, (02271) 88-1261, E-mail: hartmut.hoevel@erftverband.de

Hohenrainer, Jochen, Diplom-Hydrologe, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, +49 261-1306 – 5180, +49 261 1306 – 5280, E-mail: Hohenrainer@bafg.de

Holländer, Hartmut M., Dr., Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Referat 3.2: Grundwasser- und Abfallwirtschaft, Altlasten, GEOZENTRUM Hannover, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Tel.: 0511-643-2485, Fax: 0511-643-532485, E-mail: hartmut.hollaender@lbeg.niedersachsen.de

Hölzel, Herwig, Dr., BTU Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, Tel: 0355-69-5065, Fax: 0355-69-4235, E-mail: hoelzel@tu-cottbus.de

Hübl, Johannes, Univ. Prof. DI Dr., Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, Peter-Jordanstraße 82, 1190 Wien, E-mail: johannes.huebl@boku.ac.at

Ihle, Tilo, Dr., Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Referat Wassergüte, Untersuchungsstelle Paulsdorf, Talsperrenstraße 42, D-01744 Dippoldiswalde OT Paulsdorf, Tel.: +493504 619690, Fax: +493504 614986, E-Mail: Tilo.Ihle@ltv.sachsen.de

Ihringer, Jürgen, Doktor-Ingenieur, Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, +49 721 608 – 43907, +49 721 608 – 45651, E-mail: Ihringer@kit.edu

Jagsch, Niels, Dipl.-Ing., Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, Hohenzollernstraße 50, 45128 Essen, Tel. +49 (0) 201 3610 490, Fax. +49 (0) 201 3610 100, E-mail: jagsch@ewlw.de

Johann, Georg, Dipl.-Hydrologe, Emschergenossenschaft Lippeverband, Kronprinzenstraße 24, 45128 Essen, Tel. +49(0)201-1042249, Fax. +49(0)201-1043149, E-mail: johann.georg@eglv.de

Kern, Ulrich, Dr.-Ing., Erftverband, Am Erftverband 6, 50126 Bergheim/Erft, (02271) 88-1245, (02271) 88-1261, E-mail: ulrich.kern@erftverband.de

Kinzelbach, Wolfgang, Prof., ETH Zürich, Institut f. Umweltingenieurwissenschaften, HIL G 37.3, Wolfgang-Pauli-Str. 15, 8093 Zürich, Telefon: +41 44 633 30 66, Fax: +41 44 633 10 61, E-Mail: wolfgang.kinzelbach@ifu.baug.ethz.ch

Klasz, Gerhard, Dipl.-Ing., Ingenieurbüro (Beratender Ingenieur) für Kulturtechnik & Wasserwirtschaft Klasz, Franz-Josefs Kai 27, A-1010 Wien, E-mail: gerhard.klasz@a1.net.

Kleber, Arno, Prof. Dr., Institut für Geographie, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr.10, 01069 Dresden, E-mail: arno.kleber@tu-dresden.de

Kling, Harald, DI Dr., Pöyry Energy GmbH, Laaer-Berg-Straße 43, 1100 Wien, E-mail: harald.kling@poyry.com

Knorr, Klaus-Holger, Dr., Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Hydrologie, Limnologische Forschungsstation, Unistrasse 30, 95440 Bayreuth, E-mail: kh.knorr@uni-bayreuth.de

Kraatz, Simone, Dr., University of Wisconsin-Madison, 460 Henry Mall, Madison, WI 53706 Tel.: +1-(608) 262-1106, Fax: +1-(608) 262-1228, E-mail: kraatz@wisc.edu

Kraft, Philipp, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement (ILR), Justus-Liebig-Universität Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany, Tel: 0641-99-37385, Fax: 0641-99-37389, E-mail: Philipp.Kraft@umwelt.uni-giessen.de

Krauße, Thomas, TU Dresden, Dipl.-Inf., Fachrichtung Wasserwesen, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Bergstr. 66, 01069 Dresden, Tel: 0351-463-35556, Fax: 0351-463-37162, E-mail: thomas.krausse@tu-dresden.de

Kreuzinger, Norbert, Ass.Prof. Mag. Dr., Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Karlsplatz 13/226-2, 1040 Wien, Tel. +43(1)58801-22622, Fax +43(1)58801-22699, E-mail: norbert.kreuzinger@tuwien.ac.at

Kroiß, Helmut, O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c., Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Karlsplatz 13/226-2, 1040 Wien, Tel. +43(1)58801-22610, Fax +43(1)58801-22699, E-mail: helmut.kroiss@tuwien.ac.at

Kupfersberger, Hans; Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr., Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Forschungsgruppe Wasser Ressourcen Management, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz, Österreich, Tel.: +43(0)316-876-1378, Fax: +43(0)316-876-1321, E-mail: hans.kupfersberger@joanneum.at

Kutschera, Gesa, Dr.-Ing., HKV Hydrokontor GmbH, Dennewartstr. 25/27, 52068 Aachen, +49 (0)241 9631281, +49 (0)241 9631284, E-mail: kutschera@hkv-hydrokontor.de

Laaha, Gregor, Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Institut für Angewandte Statistik und EDV, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien, Tel: +43-1-476545066, Fax: +43-1-476545069, E-mail: gregor.laaha@boku.ac.at

Lammersen, Rita, Dr., Rijkswaterstaat Waterdienst, Zuiderwagenplein 2, 8224 AD Lelystad, Niederlande, +31 (0)6 51923811, +31 (0)320 249218, E-mail: rita.lammersen@rws.nl

Leismann, Michael, Dr.-Ing., Bezirksregierung Arnsberg, Seibertzstr. 1, 59821 Arnsberg, Tel. +49(0)2931-822678, E-mail: michael.leismann@bezreg-arnsberg.nrw.de

Leistert, Hannes, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwig Universität Freiburg, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg, Tel.: +49 (0)761 203 3528, E-Mail: hannes.leistert@hydrology.uni-freiburg.de

Lemke, Gabriele, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Goldberger Str. 12, 18273 Güstrow, 0049-3843-777331, E-mail: Gabriele.Lemke@lung.mv-regierung.de

Leschik, Sebastian, Dr., Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Gewässersanierung, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany

Ley, Rita, Dipl.-Geogr., Universität Trier Fachbereich VI – Geographie/Geowissenschaften, Behringstrasse, 54286 Trier, Tel.: 0651-201 4271, E-mail: leyrita@uni-trier.de

Lischeid, Gunnar, Prof. Dr., Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research, Institute of Landscape Hydrology, Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg, E-mail: lischeid@zalf.de

Mehlig, Bernd, Dipl.-Ing. , Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen, +49(0)21115902214, E-mail: bernd.mehlig@lanuv.nrw.de

Merz, Ralf, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn., Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13 / 222-2, A-1040 Wien, Tel: +43-1- 5880122312, E-mail: merz@hydro.tuwien.ac.at

Moss, Timothy, Dr., Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung, Erkner, E-mail: mosst@irs-net.de

Musolff, Andreas, Dr., Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Hydrogeologie, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany

Nachtnebel, Hans Peter, o.Univ.Prof.Dipl.Ing.Dr.techn.Dr.h.c.; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau; Muthgasse 18; A-1190 Wien; Tel.: +43-1-47654/5501; Fax: +43-1-47654/5549; E-mail: hans_peter.nachtnebel@boku.ac.at

Nacken, Heribert, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe Straße 1, 52074 Aachen, +492418025273, +492418022701, E-mail: nacken@lfi.rwth-aachen.de

Nazemi, Ali, Department of Civil & Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK S7N 5A9 Canada, E-mail: aln626@mail.usask.ca

Nester, Thomas, Dipl.-Ing., Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222-2, 1040 Wien, Tel. +43-1-58801-22313, E-mail: nester@hydro.tuwien.ac.at

Nölting, Benjamin, Dr., Zentrum für Technik und Gesellschaft, Technische Universität Berlin

Osenbrück, Karsten, Dr., Universität Tübingen, Institut für Geowissenschaften, Sigwartstrasse 10, 72076 Tübingen, Germany

Parajka, Juraj, Dr., TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, Österreich, Tel: +43-1-58801-22311, Fax:+43-1-58801-22399, E-mail: parajka@hydro.tuwien.ac.at

Paul, Lothar, Dr., Technische Universität Dresden, Ökologische Station Neunzehnhain, Neunzehnhainer Straße 14, D-09514 Lengefeld, Tel.: +4937367 2401, Fax: +4937367 2103, E-Mail: Lothar.Paul@tu-dresden.de

Paulin, Maria, DI, Pöyry Energy GmbH, Laaer-Berg-Straße 43, 1100 Wien

Pfann, Julia, DI, Interival ZT GmbH, Carl Reichert-Gasse 28, 1170 Wien, Tel. 01-4805010-0, Fax 01-4805010-99, E-mail: julia.pfann@interival.at

Preuß, Patrick, Diplom-Ingenieur, Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, +49 721 608 – 47692, +49 721 608 – 45651, E-mail: Preuss@kit.edu

Prien, Klaus-Joachim, Prof., Zum Schlankerberg 26, D-33181 Bad Wünnenberg, Tel.: +492953 8363, Fax: +492953 966610, E-Mail: k-j.prien@t-online.de

Prochnow, Annette, PD Dr., Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, Tel.: +49-(0)331-5699 218, Fax: +49-(0)331-5699 849, E-mail: aprochnow@atb-potsdam.de

Reckendorfer, Walter, Mag. Dr., Technisches Büro Reckendorfer - Wien, Franz-Josefs-Kai 27, A-1010 Wien, E-mail: w.reckendorfer@t-b-r.at

Reinstorf, Frido, Prof. Dr. habil., Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Breitscheidstr. 2, 39114 Magdeburg, Tel.: +49-(0)391-886-4480, Fax: +49-(0)391-886-4430, E-mail: frido.reinstorf@hs-magdeburg.de

Reszler, Christian, Dipl.-Ing. Dr., Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Forschungsgruppe Wasser Ressourcen Management, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz, Österreich, Tel.: +43(0)316-876-1991, Fax: +43(0)316-876-1321, E-mail: christian.reszler@joanneum.at

Ribičić, Hrvoje, MSc., VRVis, Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs-GmbH, Donau-City-Straße 1, A-1220 Wien, Österreich, Tel: +43-1-20501-30803, E-mail: ribicic@vrvis.at

Richter, Katharina, Diplom-Hydrologin, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, +49 261-1306 – 5181, +49 261 1306 – 5280, E-mail: Richter@bafg.de

Rock, Andreas, Universität Trier Fachbereich VI – Geographie/Geowissenschaften, Behringstrasse, 54286 Trier

Rohrhofer, Karl, DI, Rohrhofer & Partner, Carl Reichert-Gasse 28, 1170 Wien, Tel. 01-4805010-0, Fax 01-4805010-99, E-mail: karl@rohrhofer.at

Rücker, Kirsten, Dr., Institut für Ökosystemforschung, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel, Tel. 0431/ 880 4313, Fax. 0431/ 880 4083, E-Mail: kruecker@ecology.uni-kiel.de

Salinas, Jose Luis, Dipl.-Ing., TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, Österreich, Tel: +43-1-58801-22312, Fax:+43-1-58801-22399, E-mail: salinas@hydro.tuwien.ac.at

Schäfer, Martina, Prof. Dr. Dr., Zentrum für Technik und Gesellschaft, Technische Universität Berlin

Schaufler, Reinhard, DI, Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Oberflächengewässerwirtschaft, Gewässerbezirk Braunau, Hammersteinplatz 9, 5280 Braunau/Inn, Tel. +43 (0)7722 63100-13, E-mail: reinhard.schaufler@ooe.gv.at

Scheidl, Christian, DI Dr., Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, Peter-Jordanstraße 82, 1190 Wien, E-mail: christian.scheidl@boku.ac.at

Schirmer, Mario, Prof. Dr. habil., EAWAG, Abteilung für Wasserressourcen und Trinkwasser, Überlandstraße 133, 8600 Dübendorf, Switzerland

Schöner, Wolfgang, Dr., Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien, E-mail: wolfgang.schoener@zamg.ac.at

Schrautzer, Joachim, Prof. Dr., Institut für Ökosystemforschung, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel, Tel. 0431/ 880 4595, Fax. 0431/ 880 4083, E-Mail: jschrautzer@ecology.uni-kiel.de

Schumann, Andreas, Prof. Dr. rer. nat.., Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum, Telefon: +49-234-32-24693, Fax: +49-234-32-14153, E-mail: andreas.schumann@rub.de

Schwarze, Robert, Dr., TU Dresden Fak. f. Forst-, Geo- u. Hydrowissenschaften Institut für Hydrologie und Meteorologie Lehrstuhl für Hydrologie, Bergstraße 66, 01069 Dresden, 0351 463 36377, 0351 463 37162, E-mail: robert.schwarze@tu-dresden.de

Schwerdtfeger, Beate, Dr., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Goldberger Str. 12, 18273 Güstrow, 0049-3843-777450, E-mail: Beate.Schwerdtfeger@lung.mv-regierung.de

Stahl, Kerstin Dr, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg, Tel.: +49 (0)761 203 3532, Fax: +49 (0)761 203 3594, E-mail: kerstin.stahl@hydrology.uni-freiburg.de

Stamm, Christian, Dr., Swiss Federal Institute for Environmental Sciences and Technology (Eawag), Umweltchemie, Überlandstrasse 133, Postfach 611, 8600 Dübendorf, Schweiz, Tel: +41-44-823-5565, Fax +41-44-823-5471, E-mail: christian.stamm@eawag.ch

Steidl, Jörg, Dipl.-Ing., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg, E-mail: jsteidl@zalf.de

Steinhardt, Uta, Prof. Dr., Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, E-mail: usteinhardt @hnee.de

Stoll, Sebastian, Dipl.-Hydr., ETH Zurich, Institute of Environmental Engineering, HIL G 35.2, Wolfgang-Pauli-Str. 15, 8093 Zurich, Schweiz, Tel: +41-44-633-7659, E-mail: stoll@ifu.baug.ethz.ch

Strauch, Gerhard, Dr., Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Hydrogeologie, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany

Suklitsch, Martin, Dr., Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WegCenter), Institut für Physik, Institutsbereich für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie (IGAM), Karl-Franzens-Universität Graz, Leechgasse 25, A-8010 Graz, Österreich, Tel.: +43-(0)316-380-8464, Fax.: +43-(0)316-380-9830, E-mail: martin.suklitsch@uni-graz.at

Súrek, Peter, Department of Land and Water Resources Management, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, E-mail: peter.surek@stuba.sk

Szolgay, Jan, Department of Land and Water Resources Management, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, E-mail: jan.szolgay@stuba.sk

Tallaksen, Lena M., Prof. Dr., Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norwegen, E-mail: l.m.tallaksen@geo.uio.no

Teichgräber, Burkhard, Dr.-Ing., Emschergenossenschaft Lippeverband, Kronprinzenstraße 24, 45128 Essen, Tel. +49(0)201-1042234, Fax. +49(0)201-1042800, E-mail: teichgraeber.burkhard@eglv.de

Theiss, Susanne, Dipl. Hydrologin, Institut für Wasser und Boden, Lungkwitzerstr. 12, 01259 Dresden, 0351-2709854, 0351-4668800, E-mail: susanne.theiss@iwb-dresden.de

Truhetz, Heimo, Dr., Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WegCenter), Institut für Physik, Institutsbereich für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie (IGAM), Karl-Franzens-Universität Graz, Leechgasse 25, A-8010 Graz, Österreich, Tel.: +43-(0)316-380-8442, Fax.: +43-(0)316-380-9830, E-mail: heimo.truhetz@uni-graz.at

van Lanen, Henny A.J., Prof. Dr., Hydrology and Quantitative Water Management Group, Centre for Water and Climate, Wageningen University, Wageningen, Niederlande, E-mail: Henny.vanLanen@wur.nl

Viglione, Alberto, Dr., TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien, Österreich, Tel: +43-1-58801-22317, Fax:+43-1-58801-22399, E-mail: viglione@hydro.tuwien.ac.at

Vogt, Reinhard, Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR, StEB-HSZ Hochwasserschutzzentrale, Ostmerheimer Straße 555, 51109 Köln, E-Mail: reinhard.vogt@steb-koeln.de

Walther, Jörg, Dr. rer. nat., DHI-WASY GmbH, Niederlassung Dresden, Comeniusstraße 109, 01309 Dresden, Tel: +49-351-3161622, Fax: +49-351-3161612, E-mail: j.walther@dhi-wasy.de

Waser, Jürgen, Dipl.-Ing., VRVis, Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs-GmbH, Donau-City-Straße 1, A-1220 Wien, Österreich, Tel: +43-1-20501-30803, E-mail: waser@vrvis.at

Weiler, Markus Prof. Dr, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwig Universität Freiburg, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg, Tel.: +49 (0)761 203 3535, Fax: +49 (0)761 203 3594, E-Mail: markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Wetzel, Karl-Friedrich, Prof. Dr., Institut für Geographie, Universität Augsburg, Universitätsstraße 10, D-86135 Augsburg, Tel. 0049(0)821 598 2277, Fax 0049(0)821 598 2264, E-mail: wetzel@geo.uni-augsburg.de

Weyer, Christina, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Ökologische Modellbildung, D-95447 Bayreuth

Wiesinger, Thomas, Mag. Dr., Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, Peter-Jordanstraße 82, 1190 Wien, E-mail: thomas.wiesinger@boku.ac.at

Winter, Florian, Dipl.-Hyd., Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Wasserwesen, Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Tel.: +49 (0)89 6004 2231, Fax: +49 (0)89 6004 4642, E-mail: florian.winter@unibw.de

Wittenberg, Hartmut Prof. Dr.-Ing., Leuphana Universität Lüneburg, Oetzendorf 35, D29599 Weste, 058053020,058051372, E-mail: wittenberg@uni.leuphana.de

Zeilfelder, Sarah, HYDOR Consult GmbH, Am Borsigturm 40, D-13507 Berlin, 0049-30-43726730, E-mail: zeilfelder@hydor.de

ABSTRACTS DER POSTERBEITRÄGE

Posterbeiträge zum Thema 1:
Extreme: Prozesse und Modellierung

Monte-Carlo-basierte Hochwasserrisikoanalyse und Maßnahmenbewertung – Unsicherheiten durch unterschiedliche statistische Verteilungsfunktionen

Stefan Achleitner, Matthias Huttenlau, Bernhard Gems, Johann Stötter, Markus Aufleger

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Evaluierung existierender und zukünftiger Hochwasserschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet des Ötztals/Tirol (~893 km² Einzugsgebietsfläche und 22 km Länge des Hauptgerinnes). Hochwasserrisikoanalysen und darauf aufbauende ökonomische Bewertungen wie Kosten-Nutzen-Analysen oder die Ermittlung der positiven externen Faktoren von technischen (Hochwasserschutz-) Maßnahmen folgen dabei methodisch einem Risikokonzept bestehend aus der Gefährdung, der Exposition potentieller Risikoelementen und der strukturellen Vulnerabilität.

Basierend auf einem integrierten ereignisbasierten Modellansatz bestehend aus räumlich verteilten hydrologischen Modellen gekoppelt mit einer hydraulischen 1D/2D Simulationen des Hauptgerinnes werden Überflutungsflächen und relevante Hochwasserparameter für Starkregenereignisse berechnet. Die Kalibrierung des gekoppelten hydrologischhydraulischen Modells erfolgt an verschiedenen Pegelmeßstellen für gut dokumentierte historische Ereignisse. Zusätzlich findet der Sedimenttransport im hydrologischen als auch den hydraulischen Modellen Berücksichtigung.

Die potentiellen Ereignisschäden unterschiedlicher Szenarien im Siedlungsraum werden als ein Produkt aus Wasserstand und der strukturellen Anfälligkeit der einzelnen betroffenen Objekte analysiert. Diese potentiellen Szenarienschäden können prinzipiell mit der entsprechenden Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios in Relation gesetzt werden. Die Gegenüberstellung von Schäden – bzw. mit den durch eine Hochwasserschutzmaßnahme vermiedenen Schäden ist nur bedingt möglich. Hier ist es notwendig einen Bewertungszeitraum zu definieren in dem Maßnahmenkosten und die statistisch zu erwartenden (vermiedenen) Schaden zu bilanzieren sind. Mittels eines stochastischen Ansatzes (Monte-Carlo Simulation) werden dafür synthetische Zeitreihen von Hochwasserspitzen und schlussendlich Überflutungsflächen und Schadenwerten, basierend auf gültigen Pegelstatistiken generiert. Eine Auswertung der für den Istzustand und verschiedene Planzustände generierten Schadenswerte ermöglicht eine Kosten-Nutzenbewertung geplanter Maßnahmen.

Derartige Analysen sind vielseitigen daten- und modelltechnischen Unsicherheiten unterworfen. Hier soll in einem ersten Schritt auf die Sensitivitäten im Bezug auf verschieden anwendbare statistische Verteilfunktionen eingegangen werden.

Starkregen-/Hangabflussgefahrenkarten als Planungsschritt zu einem dezentralen Hochwasserschutzkonzept

Georg Johann, André Assmann

Der Lippeverband ist der verantwortliche Wasserverband für den größten Teil des Lippe-Einzugsgebietes. Ein wichtiger Aspekt der nachhaltigen Hochwassermanagementstrategie des Verbandes ist die Implementierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen in Zusammenarbeit mit seinen Kommunen. Bei dem 2800 km² großen Verbandsgebiet sind insbesondere Methoden relevant, die auf der einen Seite eine ausreichende Detaillierung für die Planung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen bieten, sich auf der anderen Seite aber auch auf entsprechend große Einzugsgebiete anwenden lassen.
Als Grundlagendaten standen Teil-Geländemodelle verschiedener Auflösung zur Verfügung, nach einer Vorprozessierung konnte daraus ein durchgängiges 4-m-Modell erstellt werden. Ebenso standen Boden- und Landnutzungsdaten in vergleichbarer Qualität zur Verfügung.
Über die Koppelung eines Niederschlag-Abfluss-Modells mit einem Hydraulikmodell (FloodArea) konnte eine Starkregensimulation für das gesamte Gebiet durchgeführt werden. Es wurden Rechenläufe für einen 10-, einen 100-jährlichen und einen Extremniederschlag durchgeführt, dabei wurde ein 1-stündiger, endbetonter Niederschlag angesetzt. Die nötigen Rechner-Ressourcen (ca. 200 Mio. Rechenknoten/Rasterzellen) konnten durch den Einsatz von High-Performance- Computing, d.h. verteiltes Rechnen unterstützende Modeltechnologie, bereitgestellt werden. Die verschiedenen Ergebniskarten zeigen sowohl die Hochwasserentstehungsgebiete als auch die durch den Abflussprozess besonders betroffenen Unterlieger (Gefahrenkarten).
In einem semiautomatischen Verfahren wurden potentielle Rückhaltestandorte selektiert und für diese dann GIS-gestützt weitere, für die Planung benötigte Parameter berechnet. Bei einer exemplarischen Auswahl von 100 Standorten in den problematischsten Teileinzugsgebieten wurde Gefährdung und Standorteignung vor Ort validiert und erste Planungsvorschläge (Maßnahmentyp und Lage) erarbeitet. Die Ergebnisse wurden in 2-seitigen Kurzbeschreibungen dokumentiert und können als Grundlage für weitere Planungsschritte dienen.

Flut-Risiko-Modellierung in Indien

Korbinian Breinl

Das Cat Research & Development Team der Allianz Re in München entwickelt zur Zeit ein Flut-Risikomodell für ausgewählte Ballungsgebiete in Indien wie Mumbai, Kolkata, Chennai und Delhi. Hierbei handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Cat R&D Team und JBA Consulting, einem auf Hochwasserrisiko spezialisierten Beratungsunternehmen in Großbritannien. Entwicklungs- und Schwellenländer sind besonders häufig von Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Erdbeben und Wirbelstürmen betroffen. Auch das verheerende Hochwasser in Pakistan in diesem Jahr hat einmal mehr gezeigt, wie vulnerabel die Region gegenüber Extremereignissen ist. Darüber hinaus wird Asien weiter an ökonomischer Bedeutung in der Versicherungsindustrie gewinnen. Da bisher kein kommerzielles Überschwemmungsmodell für Indien von Anbietern wie RMS, AIR oder EQECAT lizenzierbar ist und sich die Allianz vermehrt auf eigene Modellentwicklungen konzentriert, haben wir uns für dieses Gemeinschaftsprojekt entschieden.

In der Versicherungsindustrie konnte in den letzten Jahren viel Erfahrung beim Hochwasser-Risikomanagement speziell im europäischen Raum gewonnen werden. Der asiatische Raum und speziell die Monsun-Regionen sind bisher hingegen weniger im Fokus, weshalb die Allianz mit diesem Modell Neuland in der Risikomodellierung betreten hat.

Im Fokus des neuen Modells stehen sowohl Flusshochwasser als auch Überschwemmungen durch Starkniederschläge. Ein prägnantes Ereignis in Indien war der Starkniederschlag von Mumbai im Jahr 2005, bei dem innerhalb 24h fast 1000mm Niederschlag fielen, der bis dahin höchste jemals gemessene Wert. Das Ereignis führte zu hohen ökonomischen Schäden.

Eine der Herausforderungen bei der Modellentwicklung war die Datenlage. So sind über das Global Runoff Data Center (GRDC) meist nur monatliche Abflussdaten mit kurzen Zeitreihen verfügbar. Durch detaillierte Abflussdaten aus Nachbarstaaten konnten Annahmen für Tageshöchstwerte in Indien getroffen werden. Für das Einzugsgebiet des Ganges sind hingegen gar keine Abflussdaten erhältlich. Sie werden zwar erfasst, aus politischen Gründen und anhaltenden Konflikten bez. der Wasserversorgung mit den Nachbarstaaten aber geheim gehalten. Einfache Korrelations-Annahmen mussten hier für die Abschätzung von Abflüssen getroffen werden. Hierzu wurden in erster Linie gegriddete Niederschlagsdaten von der CRU (Climate Reserach Unit) verwendet. Diese dienten auch zur Gewinnung von Korrelationen für die Erzeugung synthetischer Flut-Ereignisse, da die Abflussdaten durch ihre teils sehr kurzen Zeitreihen keine stabile Extremwertstatistik ermöglichen. Für die eigentliche Modellierung der Überschwemmungsflächen wurde JFlow- GPU benutzt. Hierbei handelt es sich um ein hydraulisches 2D-Modell, das von JBA Consulting entwickelt wurde.

Vulnerabilitätsannahmen basieren hauptsächlich auf der Schadenserfahrung zweier Großereignisse, nämlich den Überschwemmungen von Mumbai 2005 und Surat 2006, sowie Wasserstands-Schadensfunktionen verschiedener Regionen weltweit, die an typische Bauweisen in Indien angepasst werden. Das eigentliche Risikomodell wird ab 2011 auf einer Software-Plattform kalibriert und betrieben, die von JBA Consulting zur Verfügung gestellt wird.

Mögliche Konzepte zur Abschätzung von künftigen Hochwasserschäden an Wohngebäuden

Holger Cammerer

Die jüngsten Hochwasser in Mitteleuropa haben die Verwundbarkeit hochtechnisierter Gesellschaften deutlich vor Augen geführt. In erster Linie waren bei diesen Extremereignissen monetäre Schäden sowohl an öffentlicher Infrastruktur als auch im gewerblichen, landwirtschaftlichen und privaten Sektor zu beklagen. Vor dem Hintergrund der globalen Klimaänderung ist mit einer weiteren Verschärfung der Hochwassergefahr und der damit einhergehenden Hochwasserschäden in weiten Teilen Mitteleuropas zu rechnen.
Am Beispiel des Forschungsprojektes FloodTimeS wird aufgezeigt, wie im Rahmen von Hochwasserrisikoszenarien für das alpine Lechtal (Tirol) Schäden für den Wohngebäudesektor projiziert werden, die sowohl auf hydrologischen und hydraulischen Modellierungen als auch auf Szenarien künftiger Siedlungs- und Werteentwicklung basieren. Dabei wird anhand von früheren Schadensanalysen aufgezeigt, dass Hochwasserschäden an Wohngebäuden maßgeblich durch einen Vielzahl von Einwirkungs- (Wasserstand, Hochwassertyp, Kontaminationsart) und Widerstandsparametern (Vorsorge- und Sofortmaßnahmen) beeinflusst werden, die in den wenigsten Schadensmodellen Eingang finden. Das hier zum Einsatz kommende multifaktorielle Schadensmodell FLEMOps, das neben dem Wasserstand auch einige Gebäudeeigenschaften (und in einer zweiten Modellstufe das Vorsorge- und Kontaminationsniveau) berücksichtigen kann, wird durch in situ Schadenserhebungen und Werteermittlungen für das Untersuchungsgebiet angepasst. Diese Herangehensweise liefert letztlich Schadensprojektionen für den Wohngebäudebereich in einem sich sowohl hydrologisch als auch sozioökonomisch ändernden Umfeld.

Neue Methoden zur Ermittlung der Sedimentspitzen aus stark erodierenden Einzugsgebieten (NO-Spanien)

Till Francke, Axel Bronstert

Erosion und Sedimentaustrag aus Einzugsgebieten hat in der Regel, insbesondere in Trockeneinzugsgebieten, einen noch stärker episodischen Charakter als das Abflussregime: Der größte Anteil der Sedimentfracht wird durch Stark- und Extremereignisse („Sedimentspitzen") mobilisiert, während der Austrag über den restlichen Zeitraum oft vernachlässigbar ist. Diese extreme Dynamik stellt daher Abschätzungen von transportierten Sedimentmengen vor große Herausforderungen bei gleichzeitig großer Bedeutung für Fragen der Wasserqualität und des Verlustes des Stauvolumens von Stauseen.
Existierende Verfahren zur kontinuierlichen Messung der Konzentration suspendierter Sedimente (KSS) sind oft störanfällig, kostenintensiv und bereichslimitiert. Deshalb ist die direkte Probennahme weiterhin eine weit verbreitete Methode. Da sie jedoch keine kontinuierlichen Daten liefert, müssen Verfahren zu Abschätzung der KSS verwendet werden, die Aussagen über unbeobachtete Zeitpunkte zulassen. Zu diesem Zeck kamen bisher Interpolation, einfache Regression mit der Abflussrate, Fuzzy Logic oder Neuronale Netze zum Einsatz.
Im Rahmen eines internationalen Forschungsprojektes wurden Abfluss- und KSS-Daten im Feld erhoben, verschiedene Ansätze zu KSS-Bestimmung verglichen sowie ein neues Verfahren zur KSS-Bestimmung und Abschätzung des Sedimentaustrages entwickelt. Das Untersuchungsgebiet ist das Isábena-Einzugsgebiet im Vorland der Zentralpyrenäen in Spanien. An seinem Auslass befindet sich der Barasona-Stausee, der in den vergangenen Jahrzehnten ca. 20% seines Speichervolumens durch Sedimentablagerung verloren hat, was entsprechende Folgen für die Lebensdauer des Stausees und damit seine Funktion für Wasserbereitstellung, Hochwasserschutz und Energiegewinnung hat. Das abgelagerte Material stammt zum Großteil von so genannten Badlands, die durch extreme Erosionsraten sehr viel Sediment generieren. So wurden während des Beobachtungszeitraums extrem hohe KSS von bis zu 280g/l in Nebenflüssen gemessen. Für deren kontinuierliche Abschätzung erwiesen sich herkömmliche Verfahren jedoch als unzureichend, da für die KSS-Dynamik neben der Abflussrate eine Vielzahl weiterer Faktoren wirksam sind. Daher konnte die Verwendung von Generalised Linear Models (GLMs), die auch zusätzliche Prädiktoren wie z.B. Niederschlagsmenge und Jahresgang berücksichtigen, eine deutliche Verbesserung erzielen. Dennoch erwiesen sich die GLMs in der Validierung als wenig robust. Die auf Regressionsbäumen aufbauenden Techniken des *Random Forest* bzw. *Quantile Regression Forests* stellten sich hierfür als besonders geeignet heraus. Weiterhin ermöglichten sie die Identifikation der maßgeblichen Faktoren für die KSS-Dynamik und die Berechnung von Konfidenzintervallen. Mit einer Monte-Carlo-Simulation eröffnete dies die Möglichkeit, für die instrumentierten Teileinzugsgebiete den Sedimentaustrag zu bestimmen, seine saisonale Variabilität sowie auch die inherenten Unsicherheiten zu quantifizieren.
Die berechneten Erosionsraten von bis zu 6300 t km^{-2} bestätigen die herausragende Rolle der Badlands in Rahmen der Sedimentgenerierung. Die zeitliche Konzentration des Sedimentaustrags in der Zeit (90% des Austrags in weniger als 1% der Zeit) unterstreicht die Rolle von Starkniederschlagsereignissen, bzw. der dadurch induzierten Sedimentspitzenereignisse.

Zur Anwendung hydrologischer Modelle für die Bestimmung von Hochwasserabflüssen – Vergleich eines Unit Hydrograph Modells mit einem kontinuierlichem Wasserhaushaltsmodell

Bernhard Gems, Johannes Schöber, Stefan Achleitner, Friedrich Schöberl,
Robert Kirnbauer, Markus Aufleger, Helmut Schönlaub

Die Wahl adäquater Modellansätze spielt bei der hydrologischen Modellierung hinsichtlich der Aussagekraft und Güte der Ergebnisse eine maßgebende Rolle. Sie richtet sich im Allgemeinen nach dem Zweck der Modellierung, der Modellskala, der Charakteristik des Einzugsgebietes bzw. daraus folgend nach den jeweils dominierenden hydrologischen Teilprozessen. Die Abschätzung von Bemessungsabflüssen erfolgt bei alpinen Einzugsgebieten oftmals mit vereinfachten ereignisbezogenen Modellansätzen. Komplexere Wasserhaushaltsmodelle hingegen erlauben die Bilanzierung der Feuchtehaushalts oder auch die Modellierung von Schnee- und Gletscherabflusskomponenten. Somit wird eine Abflusssimulation abseits des reinen Niederschlags-Abflussverhaltens möglich.
Der vorliegende Beitrag widmet sich den Fragestellungen, welchen Einfluss die Wahl des hydrologischen Modells auf die Ergebnisse hat bzw. inwieweit die in der Literatur empfohlenen Werte für die Modellparameter plausibel erscheinen und realistische Modellergebnisse liefern.
Die Modellierung erfolgt dabei für 5 Teileinzugsgebiete des Ötztales in den Tiroler Alpen (890 km², 700 – 3774 m.ü.A, Gletscheranteil 13%). Das SCS-CN Verfahren in Kombination mit dem Lag-Routing Ansatz bildet die Basis für das ereignisbasierte Modell, welches an ein instationäres 1D-hydraulisches Modell gekoppelt ist. Als Modelleingangsdaten stehen Messreihen von 23 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgt an 14 Abflusspegeln. Auf Basis von Satelitenbildern (Landsat) wurden Schnee- und Gletscherflächen identifiziert und durch separat parametrisierte Einzugsgebietsflächen in vereinfachter Form berücksichtigt. Diesem Modellansatz stehen ein kontinuierliches Hydrotopmodell (HQ_{sim}) sowie ein kontinuierliches Schnee- und Gletschermodell (SES) gegenüber. Die Niederschlagsdaten sowie deren Aufbreitung sind identisch. Als zusätzliche Eingangsgrößen werden für SES und HQsim die Temperatur benötigt. Das auf Energiebilanz basierende Modell SES benötigt zusätzlich Globalstrahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit.
Der Vergleich der Modellansätze erfolgt anhand von drei historischen Hochwässern, welche im Tiroler Ötztal teilweise schwere Hochwasserschäden verursachten bzw. welche durch verfügbare Messdaten für Niederschlag und Abfluss eine ereignisspezifische Modellierung / Kalibrierung erlauben. Zudem wurden N-A Modellierungen mit synthetischen Modellregen (5000-jährlicher Bemessungsregen) durchgeführt.
Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit den für spezifische Einzelereignisse kalibrierten UH-Modellen bei vorwiegend niederschlagsinduzierten Hochwässern eine bessere Wiedergabe der Abflussbeobachtungen möglich ist. Schmelzinduzierte Hochwässer sind jedoch besser (zum Teil ausschließlich) mittels Wasserhaushaltsmodellierung abbildbar. Bei der Anwendung von Unit Hydrograph Modellen für unbeobachtete Einzugsgebiete ist zu berücksichtigen, dass die Parametrisierung mit Literaturwerten zu teils sehr unrealistischen Ergebnissen führt. Zudem sind die Modellparameter der Ereignismodelle sehr sensitiv.

Isotopendaten zur multivariaten Kalibrierung – eine Methode zur Verbesserung der Modellierung komplexer hydrologischer Systeme?

Andreas Hartmann, Jens Lange, Markus Weiler,Martin Kralik, Franko Humer

Die Fläche der Nördlichen Kalkalpen stellt einen großen Teil der gesamten Landfläche Österreichs dar. Mit Dolomit und Kalkstein als vorherrschendes Grundgestein sind sie eine wichtige Quelle für die Trinkwasserversorgung. Jedoch können auch, durch die Verkarstung beschleunigt, Hochwässer entstehen, welche große Schäden anrichten können. Zur Hochwasservorhersage ist eine hydrologische Modellierung dieser Gebiete von großem Interesse. Karstgebiete verhalten sich aufgrund des heterogenes Fließ- und Speicherverhaltens sehr komplex, was die Modellierung deutlich erschwert. In dieser Studie untersuchen wir den Nutzen von stabilen Isotopendaten ($_2$H und $_{18}$O) mit unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung für die Verbesserung der Parameteridentifizierung eines konzeptionellen Karstmodells.

Unser Untersuchungsgebiet ist ein Dolomitkarstsystem am nördlichen Ende des Kalkalpen Nationalparks wo steile Hängen ein Hochplateau flankieren. Abflussmessungen am oberflächlichen Auslass des Plateaus zeigen, dass sich damit die Wasserblilanz nicht schließen lässt. Der Hauptteil verlässt das Plateau als Zwischenabfluss oder Perkolation in das Dolomitgestein, um das System durch zahlreiche Quellen oder als diffuse Zuflüsse zu den umgebenden Gerinnen am Fuße der steilen Hänge zu verlassen. Tracerversuche zeigten, dass mittlere Fließzeiten von wenigen Tagen möglich sind. Jedoch konnte durch natürliche Tracer auch nachgewiesen werden, dass Verweilzeiten von einigen Monaten bis mehrere Jahre möglich sind.

Mit diesem Wissen als Basis entwickelten wir eine konzeptionelles Modell, welches die dominanten Prozesse des Karstsystems beschreibt. Speicher- und Fließverhalten werden durch eine Serie von Reservoiren modelliert, welche jeweils bestimmte Teile des Karstystems, d.h. den Boden, Zwischenabfluss, präferentielles Fließen durch das Dolomitgestein und langsames Matrixfließen, darstellen. Um das Transportverhalten der Wasserisotope mit modellieren zu können, wurden Stofftransportroutinen mit den Abflussroutinen des Modells gekoppelt. Dieses Modell wurde dann zuerst zur Modellierung eines einzelnen Ereignisses, für welches hochaufgelöste Daten zur Verfügung standen, angewandt, um es danach für eine vierjährige Modellierung desselben Systems einzusetzen. Sowohl im ersten als auch im zweiten Schritt wurde die Parameteridentifizierbarkeit mit und ohne zusätzliche Information durch Isotopendaten mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Spezieller Fokus lag zudem auf der Übertragbarkeit von Parameterwerten aus der kurzfristigen Modellierung in eine langjährige Zeitskale. Es zeigte sich, dass Isotopendaten die Parameteridentifizierung verbessern können, jedoch unter der Voraussetzung, dass die Stofftransportroutinen die Realität angemessen wiederspiegeln.

Radar-gestützte Quantifizierung konvektiver Starkniederschläge

Maik Heistermann, Stephan Jacobi

Die Hochwasservorhersage und damit auch die Frühwarnung in gebirgigen Einzugsgebieten gilt als besonders problematisch: steile Hänge und geringmächtige Böden sowie kurze Distanzen zum Gebietsauslass führen zu einer raschen Reaktion auf Starkniederschläge und somit zu kurzen Vorwarnzeiten. Gleichzeitig führen geringe Gebietsgrößen zu einer starken Anfälligkeit der Abflussvorhersage gegenüber Fehlern in der räumlichen Verortung von Niederschlagsspitzen. Diese Problematik der „Treffsicherheit“ verschärft sich, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. Gleichzeitig sind kleine Gebiete besonders anfällig für Hochwasser, welche durch kleinräumige Starkniederschläge ausgelöst werden. Die daraus erwachsende Notwendigkeit einer hohen räumlichen Trennschärfe von Niederschlagserfassung –und Vorhersage stellt gleichzeitig das Dilemma und die Herausforderung der Hochwasser- Frühwarnung in kleinen Einzugsgebieten dar.
Einen möglichen Ausweg bieten in diesem Zusammenhang radargestützte Technologien. Diese sind wiederum anfällig für schwerwiegende und raumzeitlich stark heterogene Messfehler -und Artefakte. Am Beispiel des verheerenden Starzel-Hochwassers aus dem Jahr 2008 (Wiederkehrintervall größer 100 Jahre) erläutern wir Ansätze zur Echtzeit- Korrektur derartiger Messfehler unter extremen Niederschlagsbedingungen. Dabei konzentrieren wir uns auf Verfahren zur Korrektur statischer Festechos sowie der Dämpfung des Radarechos durch konvektive Starkniederschlagszellen. Zu diesem Zweck bedienen wir uns eines modifizierten gate-to-gate Korrekturverfahrens nach KRÄMER & VERWORN (2009). Wir zeigen, dass es bei derartigen Extremereignissen einer Dämpfungskorrektur bedarf, um am Boden gemessene Niederschlagssummen annähernd zu reproduzieren. Wir zeigen ferner, dass die Korrektur der Radarmessung durch punktuelle bodengestützte Beobachtungen („Aneichung“) zwar unter gewissen Umständen erfolgreich sein kann, dass andererseits aber der Erfolg stark von der räumlichen Konstellation und Dichte des Ombrometer-Messnetzes abhängt. Schließlich erörtern wir Hemmnisse, die den operationellen Einsatz der Dämpfungskorrektur gegenwärtig noch erschweren, sowie unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung der parametrischen Unsicherheit des zugrundeliegenden Korrekturalgorithmus.

Literatur:

KRÄMER, S., H. R. VERWORN (2009): Improved radar data processing algorithms for quantitative rainfall estimation in real time. Water Sc. Tech. 60(1): 175-184.

First flush in natürlichen semiariden Einzugsgebieten

Franziska Kirsch, Matthias Gaßmann, Oliver Olsson

Die Auswirkungen von *first flush* (Spülstoß-) Ereignissen am Anfang der regenreichen Zeit in Abflüssen aus urbanen Gebieten wurden vielfach untersucht. Dabei kommt es zu erhöhten Schmutzstoffbelastungen im Anfangsabflussvolumen beim Regenwasserablauf von Straßen oder Regenüberlaufbecken. In ländlichen Einzugsgebieten wurde dem Phänomen first flush bisher wenig Beachtung geschenkt. First flush Ereignisse sind jedoch wesentlich häufiger und intensiver in semiariden Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad anzutreffen. Daher ist das Ziel dieser Studie, anhand einer Auswertung zum Stand der Wissenschaft, die Zusammenhänge und Auswirkungen des Extremereignisses first flush in natürlichen semiariden Einzugsgebieten darzustellen.

First flush, infolge von Einzelregenereignissen sowie als saisonales Phänomen, beschränkt sich nicht nur auf Flussbetten sondern ereignet sich ebenfalls auf landwirtschaftlichen Flächen. Besonders problematisch ist hierbei die Akkumulation von Schmutz- und Schadstoffen in temporären Gewässern und auf Agrarflächen während der Trockenphase. Als Folge ist die Wasserqualität in Flüssen durch partikulare und gelöste Frachten während der ersten Niederschläge oft sehr schlecht und sehr variabel.

Die zu erwartende Zunahme an extremen Trockenphasen und Starkregenereignissen als Auswirkungen des Klimawandels in semiariden Regionen wird gleichzeitig häufigere und intensivere first flush Ereignisse mit sich bringen. Dieses hat zur Folge, dass das Risiko einer hohen Gewässerverschmutzung sich besonders in temporären Gewässern oder für Perioden mit Niedrigwasserständen vergrößert.

Die erlangten Erkenntnisse zeigen den Zusammenhang zwischen hydrologischen und einzugsspezifischen Eigenschaften und tragen dazu bei Optionen (i) zur Minderung von first flush Auswirkungen (z.B. Minimierung von Schmutz- und Schadstoffausträgen) und (ii) für angepasste Bewirtschaftungsstrategien auf Einzugsgebietsebene zu entwickeln.

Vergleichung von regionalen Methoden für die Bestimmung von Bemessungshochwässern in der Slowakei

Silvia Kohnová, Ján Szolgay, Ladislav Gaál

Im Rahmen einer Reihe von Projekten für die schrittweise Einführung von neuen Methoden zur Bestimmung von Bemessungshochwässern in der Slowakei wurde auch die Praxistauglichkeit der Verwendung von existierenden und neuen regional anwendbaren Verfahren geprüft. In diesem Beitrag werden die Resultate der Verifikation von zwei regionalen Methoden zur Bestimmung der Bemessungshochwässer bezüglich deren Anwendbarkeit in der Praxis beschrieben. Das Verfahren nach Hosking und Wallis (HOSKING & WALLIS, 1997) sowie zwei Regionalisierungsmethoden basierend auf dem ROI-Ansatz (BURN, 1990) wurden mit einem Datensatz der jährlichen Hochwasser aus 168 kleinen und mittleren Einzugsgebieten in der ganzen Slowakei getestet und miteinander verglichen. Die Möglichkeiten der Anwendung dieser Regionalisierungsmethoden in der Praxis werden diskutiert.

Literatur:

BURN, D.H. (1990): Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. Water Resources Research, 26(10), 2257–2265.

HOSKING, J.R.M., J.R. WALLIS (1997): Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge.

Integrierte hydrologische und hydro-numerische Modellsysteme für eine verbesserte Hochwasservorhersage

Carsten Lange, Yunchol Om, Reinhard Hinkelmann, Christian Peters, Frauke Jakobs, Heiko Sieker, Tammo Eiben, Frank Sellerhof, Christoph Lippert

Bei Starkregenereignissen in Einzugsgebieten kleinerer und mittlerer Fließgewässer, entstehen Hochwasserschäden i.d.R. aus dem Zusammenwirken dreier unterschiedlicher Prozesse: dem Oberflächenabfluss im Gelände, dem Ausufern der Fließgewässer im ländlichen und urbanen Raum sowie der Überlastung und dem Überstau der Kanalnetze. Bislang werden diese drei Abflussprozesse meist getrennt oder nur unzureichend gekoppelt betrachtet, da geeignete Werkzeuge fehlen. So ist es in Forschung und Praxis beispielsweise üblich, die Abflussbildung in einem Einzugsgebiet mit Hilfe von hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modellen zu simulieren, deren Ergebnisse dann im Weiteren als Randbedingungen für separate hydraulische bzw. hydro-numerische Fließgewässermodelle dienen, mit denen dann wiederum lokale (Hoch-)Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden. Zudem wird die Kanalisation meistens unabhängig vom Fließgewässermodell berechnet.

Nicht nur um den Forderungen der Europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie gerecht zu werden, erscheint es sinnvoll, die einzelnen Modelle zu koppeln. Zur Entwicklung eines integrativen Modellansatzes haben sich die drei oben genannten Institutionen im FuE-Kooperationsprojekt „Hyd3Flow“ zusammengeschlossen, welches von der AIF in deren Programm „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ seit 2009 gefördert wird. Dabei sind bereits etablierte Modellierungssysteme intelligent gekoppelt und über eine intuitiv nutzbare interaktive Oberfläche zusammengeführt worden. Diese neu entwickelte Oberfläche ermöglicht eine gemeinsame Datenhaltung für verschiedene Modelle und erlaubt es so, für jeden Teil eines Einzugsgebietes das am besten geeignete Modell einzusetzen und die Interaktionen zwischen den Modellen korrekt abzubilden.

Hyd³flow wird zurzeit am Beispiel eines Modellgebietes bei Baden-Baden getestet. Aufgrund einer vorhergehenden Bearbeitung einer Hochwasserschutzkonzeption und eines Generalentwässerungsplanes stehen für das Gebiet eine umfassende Datengrundlage und die Modelle für die Abflussbildung im Einzugsgebiet, das Kanalnetz und die Fließgewässer zur Verfügung.

Die Nutzung eines Sensor Observation Service (SOS) nach dem Standard des Open Geospatial Consortiums (OGC) bildet dabei die Grundlage des Datenaustausches zwischen den Modellen. Auf einem Server wurde deshalb ein SOS-Dienst mit zugehöriger PostgreSQL-Datenbank eingerichtet. Die Zeitreihen verschiedener Ereignisse wurden in die Datenbank eingepflegt und stehen über den SOS-Dienst zur Abfrage über das Internet zur Verfügung. Die Modellkopplung umfasst die Interaktion zwischen den Modellen auf Grundlage des gemeinsamen SOS-Datenformates. Diese Interaktion ist so gestaltet, dass jedes Modell seine erforderlichen Eingangsdaten von den jeweiligen SOS-Diensten mit den Ergebnisdaten der anderen Modelle bezieht. Eine Interaktion zwischen den Modellen kann weitgehend mit der Übergabe von Steuerparametern im SPS-Standard (Sensor Planning Service) umgesetzt werden.

Für den Hochwasserschutz ergeben sich dahingehend neue Perspektiven, dass basierend auf Niederschlagsvorhersagen entsprechend automatisiert aktuelle Hochwasservorhersagen durchgeführt werden können. Dadurch kann die Vorwarnzeit erheblich verlängert werden, was zu erheblich verlängerten Reaktionszeiten von Hochwasserschutzmaßnahmen, wie z.B. dem mobilen Hochwasserschutz, führt.
Im geplanten Beitrag sollen die Modellkonzeption, die Internet-basierte Modellkopplung, Ergebnisse aus dem Modellgebiet Baden-Baden sowie Vergleiche zwischen der üblichen und integrierten Vorgehensweise vorgestellt werden.

Entwicklung einer neuen Methode zur Niederschlagsinterpolation im alpinen und voralpinen Raum

Hannaleena Pöhler, Sybille Wendel, Jane Korck, Johann Weber, Jörg Schulla

Im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt wurden für das Vorhaben KLIWA (Klimawandel und Wasserwirtschaft) und das Interreg IVb-Projekt AdaptAlp (Adaption to Climate Change in the Alps) Wasserhaushaltsmodelle mit dem Modellsystem WaSiM-ETH für alle rechtsseitigen bayerischen Zuflüsse der Donau und die links zufließende Ilz erstellt. Dabei wurde deutlich, dass die bisherige Niederschlagsinterpolation zu systematischen Abweichungen führte. Vor allem in den Hügelländern bzw. im Flachland zwischen Alpenvorland und Donau kam es zu einer Überschätzung des Wasserinputs, während das Niederschlagsdargebot in den Alpen, insbesondere am Nordkamm der Alpen, teilweise erheblich unterschätzt wurde. Dies belegte sowohl ein Vergleich der interpolierten Niederschläge mit dem sogenannten REGNIE-Raster des DWD als auch eine Bilanzbetrachtung der gemessenen und modellierten Abflusssummen an zahlreichen Pegeln.
Aus diesem Grund wurden Untersuchungen für eine angepasstere Regionalisierung der Eingangsgröße Niederschlag durchgeführt. Dafür wurde das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH um ein flexibilisiertes Regionalisierungsmodul für meteorologische Eingangsdaten erweitert. Danach wurden verschiedene Regionalisierungsmethoden in unterschiedlich zugeschnittenen Niederschlagszonen angewandt und hinsichtlich der Wasserbilanz an den Pegeln ausgewertet.
Im Untersuchungsgebiet erwiesen sich die Windkorrektur des Niederschlags und die Einteilungsmethode des Gesamtareals in unterschiedliche Interpolationszonen als zentrale Einflussfaktoren für eine realitätsnahe Niederschlagsinterpolation. Die Verwendung unkorrigierter (also *nicht* windkorrigierter) Niederschlagsdaten in Verbindung mit einer Zonierung des Gebietes auf Grundlage von „*Residuen der Höhenregression*“ liefert die insgesamt besten Ergebnisse hinsichtlich Niederschlagsmenge und -verteilung. Dies kann durch einen flächendeckenden Vergleich von Abflussmesswerten mit simulierten Abflüssen im Zeitraum 1971-2000 belegt werden. Lediglich im Kopfgebiet der Isar sowie im Einzugsgebiet der Ilz (Bayerischer Wald) kam es zunächst noch zu deutlichen Wasserüberschüssen bzw. –defiziten hinsichtlich der Abflussbilanz. Abweichungen können vor allem durch eine ungünstige Verteilung der Klimastationen erklärt werden. Für die Ilz führt eine deutliche Erhöhung der Anzahl in die Berechnung einbezogener Niederschlagsstationen zu nahezu ausgeglichenen Wasserbilanzen.

Reduktion der Transpiration bei Wassermangel und Auswirkungen auf das Dickenwachstum von Buchen

Heike Puhlmann, Yvonne Morgenstern, Andrea Hölscher, Klaus von Wilpert

Die Buche ist eine trockenheitssensitive Baumart. Es ist deshalb zu erwarten, dass sie unter den für das nächste Jahrhundert prognostizierten Klimabedingungen verstärkt leiden wird. Über eine hydrologische Modellierung der Bodenwasserverfügbarkeit – als Ergebnis von Wasserinfiltration und Pflanzenwasseraufnahme – kann eine mögliche zukünftige Verschärfung des Trockenstresses für Buchenbestände abgeschätzt werden. Die realistische Beschreibung des Evapotranspirationsterms in hydrologischen Modellen ist ausschlaggebend für eine sinnvolle Quantifizierung der Bodenwasserverfügbarkeit. Die direkte Messung der realen Evapotranspiration ist jedoch, insbesondere in Wäldern, schwierig. In vielen praktischen Anwendungen wird deshalb die potentielle Evapotranspiration über (semi)-empirische Gleichungen berechnet und anschließend über Reduktionsfunktionen in Abhängigkeit von der Wassersättigung im Boden reduziert. FEDDES et al. (1976) ist die vermutlich am weitesten verbreitete Reduktionsfunktion. Sie beschreibt die Pflanzenwasseraufnahme als Funktion des Matrixpotentials im Boden und ist in vielen gebräuchlichen Wasserhaushalts- und -transportmodellen implementiert. Obwohl die Feddes-Funktion häufig angewendet wird, existieren kaum Messwerte zu deren Parametrisierung. Sehr häufig werden “Standardwerte” verwendet, welche nicht genügend zwischen verschiedenen standörtlichen Gegebenheiten (z.B. Bodenart) und Baumarten unterscheiden.

Ziel der im Poster vorgestellten Untersuchung ist die Ableitung der Parameter für die Feddes- Funktion für Buche. Kontinuierliche Messungen des Bodenwasserpotentials (verlässliche Messungen mit pF-Metern bis zum permanenten Welkepunkt) und des Stammdurchmessers (Dendrometer) in vier verschiedenen Buchenbeständen in Baden- Württemberg/Deutschland wurden hinsichtlich ihrer täglichen Fluktuationen analysiert. Aus den Amplituden der Tagesschwankungen wurden die Parameterwerte für die Feddes- Funktion abgeleitet. Die ermittelten Parameterwerte lagen im Bereich der Literaturangaben, variierten allerdings auch in Abhängigkeit von Bodenart, Bodentiefe und Kronensituation.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurde geprüft, ob die kritischen Saugspannungswerte, welche aus den Tagesschwankungen der pF-Meter und Dendrometer abgeleitet wurden, das in Jahrringen beobachtete Wachstumssignal erklären können. Hierfür wurden Anzahl und Durchmesser einzelner Zellen entlang von Jahrringen hinsichtlich möglicher Korrelationen mit synchronen Zeitreihen der Wasserverfügbarkeit untersucht. In einer ersten Auswertung – an Fichtenbohrkernen – wurde eine Verminderung der Zelldurchmesser beobachtet, wenn die Wasserverfügbarkeit im Boden kritische Schwellwerte unterschritt. Es ist geplant, diese Auswertung auf Buchenbohrkerne auszuweiten und damit die aus den Tagesamplituden der pF-Meter und Dendrometer abgeleiteten Parameter der Feddes-Funktion zu validieren.

Literatur:

FEDDES et al. 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function, J. Hydrol. 31: 13-26.

Abbildung von Schwellenwertprozessen in der Hochwasserstatistik

Magdalena Rogger, Jürgen Komma, Alberto Viglione, Ralf Merz, Günter Blöschl, Herbert Pirkl

Gemessene Pegeldaten, die mittels Hochwasserstatistik analysiert werden, weisen oft Sprünge auf. Werden solche Sprünge nur durch einige Datenpunkte angedeutet, dann können sie durch die falsche Einschätzung der Jährlichkeit von sehr großen Ereignissen erklärt werden. In anderen Fällen allerdings werden die Sprünge so klar durch die Daten abgebildet, dass sie auch mit Schwellenwertprozessen in Verbindung gebracht werden können. Derartige Sprünge werden bislang in der Hochwasserstatistik bei der Anpassung von Verteilungsfunktionen nicht berücksichtigt.

In dieser Studie wird eine Analyse der Abflussprozesse in zehn Piloteinzugsgebieten in Tirol (Österreich) durchgeführt, um zu untersuchen, unter welchen Umständen Schwellenwertprozesse auftreten können. Zu diesem Zweck werden die Abflussprozesse in mit Hilfe eines flächendetaillierten kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodells beschrieben. Dies ermöglicht die Berücksichtigung lokaler Besonderheiten des Gebietes durch Einbezug aller vorhandener Daten (Orthophotos, Landnutzung, usw.). Besonders berücksichtigt wird die Hydrogeologie zur Beschreibung des Speichervermögens des Gebietes durch detaillierte hydrogeologische Karten. Mittels Monte-Carlo-Simulationen werden durch generierte Niederschlags- und Temperaturdaten Simulationen über mehr als 10.000 Jahre durchgeführt. Aus dem somit generierten Abflusskollektiv kann eine empirische Verteilungsfunktion abgeschätzt werden und auftretende Sprünge in Hinsicht auf die verursachenden Prozesse analysiert werden.

Interaktion zwischen zwei Hydrosystemen

Matthias Schöniger, Kathrin Helmholz, Ulli Dettmann

Die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasserleitern ist aus der Sicht der Geoökologie und der Wasserwirtschaft ein bedeutender Prozess in einem Flusseinzugsgebiet. Hohe Grundwasserabflussanteile am Gebietsabfluss, flussinduzierte Grundhochwässer aber auch bedeutende Stofffrachten mit einem regionalgeologischen Bezug belegen die Bedeutung der Wechselwirkungen für die beiden Hydrosysteme Fluss und Grundwasserleiter. Während die modellhafte Beschreibung relevanter Strömungs- und Transportprozesse in Fließgewässern und in Porengrundwasserleitern hydraulisch und auch rechentechnisch auf einem recht hohen und für die Praxis nutzbringendem Standard liegen, stehen die praxisorientierten Modellanwendungen zur hydrodynamischen Wechselwirkungen auf Flussgebietsebene erst in den Anfängen (u.a. die Software-Paketen von DHI-WASY: Mike-Familie, FEFLOW, IFMMIKE11 und vom USGS: MODFFLOW- RIVERPACKAGE).
An zwei Fallbeispielen der Flüsse Oker (Pegel Harxbüttel mit einem MQ = 3,36 m³/s |1961-2008) und Elbe (Pegel Neu Darchau mit einem MQ = 765 m³/s |1961-2008) soll der so genannte „gliederte“ Lösungsansatz zur Beschreibung der hydrodynamischen Wechselwirkung vorgestellt werden und im Hinblick auf die Realisierung der Programmschnittstelle, der Parametrisierung und der Messdatenverfügbarkeit analysiert werden. Bei dem gewählten „gegliederten“ Ansatz werden die hydrodynamischen Prozesse in den Teilsystemen modelliert und über ein Randbedingungskonzept (Dirichlet/Cauchy-Neumann-Methode) miteinander gekoppelt. Die Parametrisierung der Kolmationsschicht als Teil des hydrogeologischen Untergrundes und die zeitliche Diskretisierung des wechselseitigen Austausches der Potential-Randbedingungen 1. oder 3. Art mit der Fluss-Randbedingung 2. Art steht dabei im Vordergrund. Aufgrund der technischen Eigenschaften wird das Grundwassermodells FEFLOW favorisiert und vorgestellt („korrekte“ Behandlung der freien Grundwasseroberfläche mit der so genannten BASD-Technik, leistungsstarker Netzgenerators, Multi-Grid-Löser) und der schrittweise Modellaufbau und -kopplung mit dem hydrodynamischen Fließgewässermodell MIKE 11 präsentiert und diskutiert.
Auf der Basis kalibrierter Modellrealisationen wird die Verwendbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich zwei Fragestellungen bewertet. Zum einen steht die flussinduzierte Bildung von Grundhochwasser in den Elbauen im Vordergrund, zum anderen ein Konzentrationsübertritt von einem PCE-Grundwasserschadensfall in einen angrenzenden Vorfluter.

Einfluss der Modellstruktur auf die Simulation von Abflussereignissen in einem alpinen Einzugsgebiet

Philipp Stanzel, Hans-Peter Nachtnebel

In Zusammenhang mit der Entwicklung verschiedener hydrologischer Modellansätze wurden in der Vergangenheit Fragestellungen der Parameterschätzung und ihrer Auswirkungen auf Simulationsergebnisse ausführlich untersucht. Zunehmend wird derzeit in hydrologischen Untersuchungen aber auch der Einfluss der Wahl der Modellstruktur einer genaueren Analyse unterzogen, indem Ensembles verschiedener Modelle angewendet werden.
Ziel dieser Präsentation ist ein Beitrag zu dieser Diskussion der Rolle der Modellstruktur bei der hydrologischen Modellierung. Grundlage der Untersuchung bildet dabei ein Konzeptmodell, das auf einer Abfolge von linearen und nicht-linearen Speichern basiert. Durch das Ersetzen einzelner Modellkomponenten durch stärker physikalisch basierte Prozessbeschreibungen werden unterschiedliche Modellstrukturen entwickelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch physikalisch-basierte Modelle aufgrund unzureichender Informationen über Gebietseigenschaften und ihre Parametrisierung eigentlich als konzeptuelle Modelle (mit höherer Komplexität) angesehen werden müssen.
Vier verschiedene Modellstrukturen und die resultierenden Simulationsergebnisse für sommerliche Abflussereignisse in einem alpinen Einzugsgebiet werden präsentiert. Anhand der Ereignissimulationen wird die Eignung der verschiedenen Modelle zur Simulation von Hochwasserereignissen analysiert und es wird diskutiert, ob Rückschlüsse auf dominante Abflussprozesse möglich sind. Durch die vergleichende Anwendung unterschiedlich aufgebauter Modelle kann darüber hinaus die mit der Modellstruktur verbundene Unsicherheit in der hydrologischen Modellierung untersucht werden.

Posterbeiträge zum Thema 2:
Wandel: Erfassung und Auswirkungen

Die Verwendung von Residuenanalysen zur Verbesserung der Parametrisierung des Modells SWAT in einem datenarmen Einzugsgebiet in China

Katrin Bieger, Georg Hörmann, Nicola Fohrer

Das öko-hydrologische Modell SWAT wird weltweit in zahlreichen Studien verwendet, um den Einfluss von verschiedenen Faktoren des globalen Wandels auf die Wassermenge und –qualität in Flusseinzugsgebieten abzuschätzen. Im Xiangxi-Einzugsgebiet in der chinesischen Provinz Hubei wird derzeit der Einfluss des Landnutzungswandels, der durch den Bau des Drei-Schluchten-Saudamms ausgelöst wurde, auf die Wasserbilanz sowie den Sediment- und Phosphortransport untersucht. Hier steht der hohe Datenbedarf des Modells SWAT einer geringen Datenverfügbarkeit gegenüber.

Um diesem Problem zu begegnen, wird die Durchführung von Residuenanalysen zur Verbesserung der Modellparametrisierung getestet. Die Betrachtung von Residuen hat den Vorteil, dass nicht nur Gütemaße und Indizes für den gesamten Datensatz berechnet werden, sondern dass die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Daten in täglicher Auflösung betrachtet werden können. Dies ermöglicht eine separate Betrachtung von ansteigenden und abfallenden Ästen der Abflussganglinie und von verschiedenen Jahreszeiten zur besseren Erfassung saisonaler Unterschiede. Zudem kann die Kreuzkorrelation der Residuen mit anderen Variablen wie beispielsweise dem Niederschlag berechnet werden.

Durch die Residuenanalyse sollen entscheidende Parameter identifiziert werden, die sich besonders stark auf die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Daten auswirken, so dass diese bei der Kalibrierung besonders berücksichtigt werden können. Außerdem werden saisonale Unterschiede herausgestellt, die bei der Berechnung eines einzigen Gütemaßes für den gesamten Datensatz nicht zu erkennen wären. Dies liefert weitere wichtige Informationen darüber, welche Parameter für die Kalibrierung von besonderer Bedeutung sind.

Entscheidungshilfe für Fragen der Stadtentwässerung mit HydroNET-SCOUT

Thomas Einfalt, Arnold Lobbrecht

Die Integration von Software für die Bereitstellung von zeitlich und räumlich detaillierten Niederschlagsdaten spielt eine wichtige Rolle für Planungsaufgaben und für die Abschätzung des Hochwasserrisikos. Insbesondere ist die Nutzerfreundlichkeit gefragt, so dass sowohl Sachbearbeiter eine gute Übersicht haben als auch Modelle direkt mit Daten versorgt werden können. Radargemessene Niederschläge werden heute mit dem SCOUT Radarniederschlagsverarbeitungssystem (hydro & meteo, 2009) automatisch qualitätsgeprüft und korrigiert, bevor sie mit ebenso aufwendig geprüften Regenschreibermessungen angeeicht werden und so eine sehr wertvolle Information für stadthydrologische Anwendungen in Echtzeit oder als Analysewerkzeug darstellen.

Endnutzer von Niederschlagsinformationen haben je nach Anwendung sehr unterschiedliche Anforderungen an die Qualität und Verfügbarkeit ihrer Daten. HydroNET ist ein Werkzeug, das meteorologische Informationen direkt auf den Schreibtisch von wasserwirtschaftlichen Nutzern bringt und die tägliche Arbeit unterstützt, insbesondere im Hinblick auf Informationen zu aktuellen oder vergangenen Überflutungen. Nutzerreaktionen und viel Detailarbeit haben zur Weiterentwicklung zu HydroNET Urban geführt (de.hydronet.info). Diese Web- Anwendung unterstützt Nutzer in der Auswertung vergangener Ereignisse und unterstützt die Echtzeitbewirtschaftung von städtischen Gewässern und Kanälen. Die Anwendung wurde als Portal entwickelt, mit dem Nutzer auf einfache Weise Zugriff auf Daten und weitere Auswertungen (z.B. Vergleich mit Bemessungsregen) haben.

In der Langfassung dieses Beitrages wird für eine Region an der Deutsch-Niederländischen Grenze gezeigt, wie Radardaten mehrerer Standorte verbunden (“kompositiert”) werden können. Die Daten stehen dabei auf einem 1x1 km-Gitter und mit einem 5-Minutenzeitschritt zur Verfügung. Es werden sowohl gemessene Daten als auch Kurzfristvorhersagen (“Nowcasting”) bereitgestellt (TESSENDORF & EINFALT 2011). Hier gehen die Verarbeitung der Daten und ihre anschließende Visualisierung und Bereitstellung Hand in Hand, so dass das Ergebnis aus den Berechnungen mit den Messdaten direkt für die wasserwirtschaftliche Anwendung nutzbar ist.

Die Programme SCOUT und HydroNET sind inzwischen als integrierte Anwendung nutzbar. Das bedeutet, dass wasserwirtschaftliche Anwender die Software für ihr eigenes Einzugsgebiet (z.B. Kanalnetz, Gewässersystem) nutzen können, ohne dass Programme installiert werden müssen. Die Software selbst läuft auf einem Server außerhalb der Anwenderwelt, so dass Wartung und Pflege der Programme einfach durchgeführt werden können. Diese Aufgaben werden von Experten regelmäßig für die Nutzer von HydroNETSCOUT durchgeführt.

Literatur:

hydro & meteo (2009): The SCOUT User Manual Version 3.30, hydro & meteo GmbH & Co. KG, Lübeck.

TESSENDORF, A., T. EINFALT (2011): Ensemble radar nowcasts - a multi-method approach, Angenommen für WraH 2011 symposium, Exeter, 18.-21. April 2011.

Wechselwirkung und Wandel aus hydrologischer und hydromorphologischer Sicht - Untersuchungen an einem naturnah gestalteten Bachlauf im Auwald zwischen Neuburg und Ingolstadt

Peter Fischer, Florian Haas, Bernd Cyffka,

Die Donau, ein Fluss von großer europäischer Bedeutung, ist in großen Teilen starken anthropogenen Veränderungen unterworfen. Ganz besonders negativ wirkten sich hierbei die Eindeichung und der Bau der Staustufen aus. Ein Vorhaben zur Verbesserung dieses Zustandes, auch im Sinne der EU-WRRL, wurde im Juli 2010 nach jahrelanger Planung in großem Rahmen an der Donau zwischen Neuburg und Ingolstadt gestartet. Auf einer Fläche von 1.200 ha wird der Auwald durch Ausleitung von Donauwasser in einem naturnah gestalteten Bachlauf wieder an die natürlichen Wasserstandsschwankungen der Donau angeschlossen.

Neben der kontinuierlichen Ausleitung von etwa 1-5 m^3/s führen gezielte ökologische Flutungen zu einer verstärkten hydrologischen und morphologischen Dynamik im Gerinnesystem. Vor allem die an Hochwasserereignisse gekoppelten Flutungen mit bis zu 30 m^3/s führen zu verstärkten Umlagerungsprozessen. Die steuerbare Einleitung des Wassers (in Zeit und Menge) in die zum Teil ganz neuen Gerinnestrukturen ist als spannendes Freilandexperiment unter naturnahen Bedingungen zu verstehen.

Ein Jahr vor Beginn der ersten Ausleitung startete daher auch das E+E-Begleitvorhaben „Monitoring Auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen“, das durch das Bundesamt für Naturschutz gefördert wird. Schwerpunkte dieses Verbundprojektes, an dem sechs Forschungsinstitute.beteiligt sind, sind die systematische Erforschung und Dokumentation der Auswirkungen, die sich durch diese Ausleitung ergeben mit dem Ziel Erfahrungswerte für zukünftige Projekte zu sammeln.

Ein wichtiges Teilprojekt (Teilprojekt II) dieses Forschungsverbundes, beschäftigt sich in erster Linie mit den hydrologischen und hydromorphologischen Fragestellungen in Verbindung mit dem neu geschaffenen Bachlauf. Im Rahmen dieses Teilprojektes werden so wichtige hydrologische Parameter, wie Grundwasserstand, Bodenfeuchte und Abfluss mit einem dichten Messnetz beobachtet.

Daneben werden die Gewässermorphologie und die Prozesse der fluvialen Morphodynamik (Erosion-Transport-Sedimentation) erfasst und die daraus resultierenden Veränderungen dokumentiert. Für die Erfassung der Gerinnemorphologie wird ein Terrestrischer Laserscanner (TLS, Riegl LMS Z 420i) eingesetzt. Weitere Messmethoden wie Geschiebe und Schwebstoffmessung, Querprofilvermessung, Gewässerstrukturkartierung, Sedimentanalysen ergänzen die Forschungsarbeit im und am neuen Umgehungsgewässer.

Der vorgeschlagene Vortrag soll das hydrologische und hydromorphologische Untersuchungsdesign und erste Ergebnisse dieses Projektes vorstellen.

Ableitung des jahreszeitlichen Verlaufs von Vegetationsparametern auf Grundlage von Satellitenbeobachtungen und klimatologischen Aufzeichnungen für die Wasserhaushaltsmodellierung von Flusseinzugsgebieten in Niedersachsen

Anja Weber, Kristian Förster

Es ist davon auszugehen, dass der Klimawandel wahrscheinlich eine Intensivierung des Wasserkreislaufs und eine Veränderung der Vegetationsdynamik zur Folge haben wird. Es besteht eine intensive Rückkopplung zwischen Vegetation und Wasserhaushalt über die Transpiration und über die Interzeption.

Das Ziel war, die Vegetation anhand der drei Klimaelemente Lufttemperatur, Photoperiode und Feuchte in Form des Growing Season Index (GSI) dynamisch zu parametrisieren, um diesen in Zukunft in das Wasserhaushaltsmodell *Panta Rhei* zu implementieren. Der GSI wurde anhand von Satellitenbildern mit dem Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) angepasst. Es wurden verschiedene Landnutzungen (Ackerland, Laubwald, Nadelwald, Mischwald sowie Wiesen und Weiden) untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass an Ackerstandorten die Modellierung des Vegetationsverlaufs durch den GSI nicht möglich ist, da der anthropogene Einfluss der Ernte und des Wechsels der Fruchtfolge mit dem rein klimatologisch basierten GSI nicht abzubilden ist. Für Laubwald ist der GSI ohne Einschränkung anwendbar. Für die Landnutzungen Mischwald, Wiesen und Weiden wurde der GSI zum GSI* modifiziert, da bei diesen Nutzungen das Ende der Vegetationsperiode durch den GSI im Vergleich zum NDVI stets zu früh vorhergesagt wurde. Durch den GSI* konnte die Modellierung teilweise erheblich verbessert werden. Zum Ende der Vegetationsperiode wurde der Vergleich durch schlechte Beobachtungsbedingungen in Form von Wolken und Schnee erschwert. Dennoch konnten plausible Ergebnisse erzielt werden. Für die Nutzung Nadelwald lässt sich nur die Vermutung äußern, dass die Aktivität der Bäume durch den GSI nachzubilden ist. Da er ganzjährig grün ist, sieht man ihm äußerlich keine Veränderung über den NDVI an, aber im Laufe des Jahres ändert sich seine Stoffwechselaktivität ebenfalls, sie macht sich nur nicht durch Blattabwurf bemerkbar.

Der GSI soll in Zukunft in das Wasserhaushaltsmodell *Panta Rhei* zur dynamischen Parametrisierung der Vegetation implementiert werden, um die Prozesse Transpiration und Interzeption innerhalb eines Jahres in Abhängigkeit des Entwicklungstands der Vegetation zu berechnen.

Einfluss hoher Datenqualität bei Regenschreibermessungen auf die Güte radarbasierter Niederschlagsinformationen

Inga Frerk, Thomas Einfalt, Markus Jessen

Radarniederschlagsmessungen sind heute die Niederschlagsdaten mit der höchsten zeitlich-räumlichen Datendichte. Das Radar misst dabei mit einem indirekten Verfahren in der Atmosphäre, so dass die exakte Menge des Niederschlages am Boden unsicher bleibt. Als Referenz hat sich in der Hydrologie der Regenschreiber bewährt, der als Punktmessung in der Regel genaue Werte liefert. Aus diesem Grunde wird in der Praxis heute meist ein Abgleich zwischen Radar und Regenschreiber durchgeführt, um qualitativ hochwertige und hoch aufgelöste Niederschlagsdaten zu erhalten. Dieser Abgleich wird durch eine Aneichung der radargemessenen Mengen an die bodengemessenen Mengen durchgeführt.
Die Schritte für die Aufbereitung radarbasierter quantitativer Niederschlagsdaten sind:

- Radardatenqualitätskontrolle mit Datenkorrektur (GOLZ et al. 2006)
- Qualitätskontrolle der Regenschreibermessungen
- Aneichung der Radardaten an zugehörige Regenschreibermessungen (EINFALT et al. 2004)

Anschließend findet dann die Weiterverarbeitung der angeeichten Radardaten für den Einsatz in Modellen statt.
Der Schritt der Qualitätskontrolle der Regenschreibermessungen wird dabei oft in seinem Wert für eine hohe Qualität von Radarniederschlägen unterschätzt. Deshalb konzentriert sich dieser Beitrag auf diesen Aspekt und vergleicht drei Regenschreiberqualitäten bei der Radaraneichung:

- Weitgehend originale Regenschreibermessungen
- Regenschreibermessungen, die einen automatischen Plausibilitätstest bestehen
- Regenschreiberdaten nach manueller Überprüfung und Korrektur (nur Lückensetzung und Zeitverschiebung)

Die erste untersuchte Qualität dient als Vergleich, die zweite entspricht der Datenqualität, die heute mit automatischen Prüfverfahren in Echtzeit erreichbar ist und z.B. für Hochwasserwarnungen zur Verfügung steht. Die dritte Qualität ist die derzeit bestmögliche Datenqualität, die wegen intensiver manueller Nacharbeitung nur für Nachuntersuchungen möglich ist. Für jeden der drei Fälle werden qualitätsgeprüfte und korrigierte Radardaten eines Jahres genutzt.
Die verwendeten Radardaten stammen aus einem Projekt zur Erstellung einer zehnjährigen, zeitlich und räumlich hochaufgelösten Datenbasis für zehn Wasserverbände in NRW, das Ende 2011 abgeschlossen sein wird (JESSEN et al. 2008). Resultat werden Radardaten von 2000 bis 2010 sein, die für eine Fläche von über 20 000 km² berechnet wurden. Dabei werden Radardaten der Standorte Essen, Neuheilenbach und Flechtdorf des Deutschen Wetterdienstes genutzt, die mit einer Auflösung von 5 Minuten und 1x1 km vorliegen. Die Regenschreiberdaten von über 500 Stationen werden von den Wasserverbänden in Nordrhein-Westfalen bereitgestellt. Eine quantitative Bewertung der Ergebnisse wird mit ca. 10% der

Stationen durchgeführt, die nicht für die Aneichung verwendet werden und die damit als unabhängige Verifizierstationen dienen.
Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen quantitativ deutlich den Unterschied zwischen der Verwendung automatisch gemessener Regenschreiberdaten ohne weitere Prüfung und sorgfältig geprüften Messdaten. Außerdem wird die Datenqualität bewertet, die heute mit automatischen Verfahren erzielt werden kann. Konsequenzen für die Weiterverwendung der jeweiligen Daten werden diskutiert.

Literatur:

EINFALT, T., K. ARNBJERG-NIELSEN, C. GOLZ, N. E. JENSEN, M. QUIRMBACH, G. VAES & B. VIEUX. (2004): Towards a Roadmap for Use of Radar Rainfall data use in Urban Drainage. *Journal of Hydrology*, 299, pp. 186-202.

GOLZ, C., T. EINFALT & G. GALLI (2006): Radar data quality control methods in VOLTAIRE. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 5, 497-504

JESSEN, M. & T. EINFALT (2008): Lessons learnt from the analysis of two years of weather radar data, Proceedings ERAD 2008, Helsinki, ISSN 978-951-697-676-4.

Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Modellierung des natürlichen Abflusses in einem intensiv und mehrfach genutzten Teileinzugsgebiet (125 km²) der Spree (Deutschland)

Anne Gädeke, Ina Umlauf

Bereits unter den aktuellen Klimabedingungen gilt der Wasser- und Stoffhaushalt der Lausitz als tiefgreifend gestört. Die jahrzehntelangen gewaltigen Eingriffe in die Landschaft durch den Braunkohletagebau sowie die abrupte Stilllegung von Tagebauen Anfang der 1990er Jahre führten zu überregionalen wasser- und stoffhaushaltlichen Problemen und daraus folgenden vielfältigen Nutzungskonflikten (GRÜNEWALD, 2005).
Das Hinzutreten neuer beziehungsweise die Verschärfungen bereits bestehender Nutzungskonflikte zeichnet sich durch die zukünftig zu erwartenden Landnutzungs- und Klimaänderungen (großräumiger Wiederanstieg des Grundwassers, Entstehung von tiefen und großflächigen Tagebaurestseen, zunehmender Anbau nachwachsender Rohstoffe mit hohem Flächen- und Wasserbedarf) ab.
Im Rahmen des Projektes „Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin“ (INKA BB) sollen im Teilprojekt 21 „Instrumentarien für die nachhaltige regionale wasserwirtschaftliche Planung und Entwicklung - Beispiel Lausitz“ Strategien und Handlungsoptionen entwickelt werden, um mögliche negative Folgen des Klimawandels auf den Wasser- und Stoffhaushalt abzuschätzen.
Um dies zu erreichen, ist zunächst die Bestimmung des natürlichen (unbeeinflussten) Abflussverhaltens in den Gewässereinzugsgebieten notwendig, da diese Informationen als Eingangsdaten für die Anwendung von Wasserbewirtschaftungsmodellen essentiell sind. Zunächst wurde ein Teileinzugsgebietes der Spree (A = 125 km²) gewählt, da dieses anthropogen kaum beeinflusst ist und sich somit gut für die Kalibrierung und Validierung hydrologischer Einzugsgebietsmodelle eignet. Für einen Modellvergleich wurden das prozessbasierte, distributive Wasserhaushaltssimulationsmodell WaSiM-ETH und das konzeptionelle, ökohydrologische, semidistributive Modell SWIM ausgewählt. Der Modellvergleich fokussiert auf den Einfluss der unterschiedlichen räumlichen Diskretisierungsverfahren (WaSiM ETH: Raster, SWIM: Hydrotope).
Werden für beide Modelle homogene Boden- und Landnutzungsverhältnisse angenommen, sind die simulierten Unterschiede gering. Durch die Berücksichtigung räumlicher Muster von Boden und Landnutzung weichen die simulierten Abflüsse beider Modelle jedoch voneinander ab. Die Unterschiede resultieren sowohl aus den verschiedenen räumlichen Diskretisierungsverfahren als auch aus den unterschiedlichen Prozessbeschreibungsverfahren. Bei kleinräumiger Betrachtung erscheint der rasterbasierte Ansatz von WaSiM-ETH besser geeignet, um den natürlichen Abfluss zu beschreiben und damit die sensitiven Eingaben für das wasserwirtschaftliche Modell bereit zu stellen. Die Frage, in wieweit dies auch für größerer Räume gilt oder ob dafür der konzeptionelle, semidistributive Ansatz von SWIM besser geeignet ist, soll durch Modellvergleiche für das Einzugsgebiete der Spree (ca. 9700 km²) und der Schwarzer Elster (ca. 5700 km²) beantwortet werden.

Literatur:

GRÜNEWALD, U. (2005): Probleme der Integrierten Wasserbewirtschaftung im Spree-Havel-Gebiet im Kontext des globalen Wandels. In: WECHSUNG, F., BECKER, A., GRÄFE, P. (Hrsg.) Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Weißensee Verlag Berlin Kap.III-2.1.1.

Hydrologische Wirkungsanalyse des Klimawandels und Anpassungsmaßnahmen auf der Grundlage von hochaufgelösten Klimadaten

Erik Pasche, Sandra Hellmers

Die neue Generation der Klimamodelle erreicht zeitliche und räumliche Auflösungen von regionalen Klimaverhältnissen, die neue Perspektiven in der Klimafolgenforschung für die hydrologische Prozessanalyse eröffnen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhaben KLIMZUGNord wurden auf dieser verbesserten Datengrundlage meteorologischer Modelle die Folgen für die Hochwasserabflussverhältnisse in einem Einzugsgebiet der norddeutschen Flachlandregion mit Hilfe des konzeptionellen, deterministischen, nicht linearen, detaillierten hydrologischen Modells KALYPSO Hydrology untersucht. Wegen der Differenzierung von Klimawandelszenarien entsprechend dem IPCC-Bericht (2000) und den klimamodellspezifischen Berechnungsansätzen, können die Auswirkungen des Klimawandels bis 2100 nur in einer Bandbreite von Ergebnissen bewertet werden. Um den Einflüssen des Klimawandels zu begegnen, werden nachhaltige, effektive und flexibel anpassbare Maßnahmen erforderlich. Im Binnenhochwassermanagement werden hier unter Anderem Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (DRWBM) eingesetzt, deren Wirkung auf den Hochwasserabfluss mit der Software KALYPSO modelliert werden kann. Dazu werden Einzelmaßnahmen wie Mulden, Gründächer und Rigolen als summarische Größe in städtebaulichen Nutzungseinheiten eingebracht. Trotz dieser Aggregierung ist es möglich, die in den verschiedenen Anlagen der DRWBM ablaufenden Prozesse der gestaffelten Rückhaltung beim konsekutiven Durchfließen von Gründächern, Mulden und Rigolen sehr realistisch abzubilden.

Das neue Modellkonzept von hochauflösenden Klimamodellen und prozessbasierten Niederschlag- Abfluss-Modellen konnte erstmalig in dem Einzugsgebiet der Krückau angewendet werden. Dazu wurden vom Klimamodell REMO entsprechende kontinuierliche Regenreihen für die IPCC-Klimaszenarien A1B, A2 sowie B1 generiert und anschließend in das Niederschlag- Abfluss- Modell KALYPSO Hydrology importiert. In den Modelluntersuchungen konnte dargelegt werden, dass sich durch verkettete Elemente des dezentralen Regenwassermanagements erhebliche Reduktionen in der Abflussbildung erzielen lassen und somit eine Überlastung einzelner Rückhaltekomponenten bei Extremereignissen abgefangen werden kann. Im Rahmen dieses Beitrages wird das neue Modellkonzept der verknüpften Anwendung von regionalen Klimamodellen und Niederschlag-Abfluss-Modellen präsentiert und an einem Pilotgebiet in Norddeutschland die damit erzielbare Verbesserung in der Quantifizierung der Klimafolgen auf den Hochwasserabfluss verdeutlicht.

Auswirkungen von Kurzumtriebsplantagen auf den Wasserhaushalt

Petra Kahle, Christopher Schulze, Bernd Lennartz

Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit schnell wachsenden Baumarten, wie z.B. Pappeln und Weiden, werden deutschland- und weltweit in zunehmendem Maße für die Erzeugung von Biomasse für die energetische und die stoffliche Nutzung eingesetzt. Charakteristika dieser Landnutzungsform sind die Einstellung der regelmäßigen Bodenbearbeitung, der Verbleib der Laubstreu auf der Fläche und die Beerntung der oberirdischen Biomasse im Abstand von 2 bis 6 Jahren. Die Umstellung der Landnutzung von einjähriger Ackerkultur zu mehrjährigen KUP lässt hydrologische und bodenökologische Veränderungen zu erwarten, deren Ausmaß und Richtung in Mitteleuropa noch weitgehend unbekannt sind. Derzeit besteht ein Informationsdefizit zur Frage der Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes auf Standort- und Einzugsgebietsebene. Vorliegende Wasserhaushaltsimulationen bedienen sich vielfach geschätzter Eingangsparameter, weshalb die Realitätsnähe der Ergebnisse zu hinterfragen ist.
Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss der Kurzumtriebswirtschaft auf ausgewählte Wasserhaushaltskomponenten mittels Coup-Modell zu quantifizieren, eine Differenzierung nach den Baumarten Pappel und Weide vorzunehmen und Vergleiche zu einer annuellen Kulturart (Weizen) anzustellen.
Untersuchungsbasis bildet eine langjährige Versuchsanlage am Standort Gülzow (Mecklenburg Vorpommern) mit zahlreichen Pappel- und Weidenklonen/-sorten. Die Daten zu pflanzlichen (Blattflächenindex, Höhenwachstum, Ertragsverhalten), bodenkundlichen (Horizontmächtigkeit, Bodentextur, Wasserleitfähigkeit, Wasserspannung) sowie meteorologischen Eingangsparametern (Niederschlag, Bodentemperatur, Lufttemperatur, Globalstahlung, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit) wurden Vorort ermittelt bzw. früheren Untersuchungen entnommen. Die Anzahl geschätzter Eingangsgrößen war vergleichsweise gering.
Über den Simulationszeitraum (1998-2009) variierten die Niederschlagsummen im Bereich von 387 mm/a (2003) bis 923 mm/a (2007). 62% (Pappel), 58% (Weide) bzw. 53% (Winterweizen) der Jahresniederschläge verteilten sich auf die Evapotranspiration. Hinsichtlich der Transpiration übertrafen die schnell wachsenden Bäume die annuelle Ackerkultur deutlich. Die Folge sind reduzierte Sickerwasserraten unter KUP. Beim Baumartenvergleich erwies sich die Pappel transpirationsstärker als die Weide. Die Aspekte des Bodenwasserhaushaltes sind bei der Bewertung der langfristigen Auswirkungen von KUP auf die Umwelt und bei der Standortwahl für diese Landnutzungsform zu berücksichtigen.

Bewertung und Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf die Abflusssituation in Wildbacheinzugsgebieten

K. Klebinder, B. Kohl, A. Maldet, G. Markart, M. Pittracher, B. Sotier, L. Stepanek

Zahlreiche Katastrophenereignisse der letzten Jahre, unter anderem jene im August 2005 in Westösterreich haben gezeigt, dass die Mehrwassermengen von Oberflächenabflüssen aus versiegelten Flächen einen wesentlichen und nicht zu unterschätzenden Faktor im Abflussverhalten von Wildbächen und ihren Vorflutern darstellen können (BMLFUW, 2009; KOHL et al. 2007). Während aus unbebautem Gelände in der Regel nur ein geringer Teil der Niederschlagsmenge oberflächlich abfließt und im Vorfluter abflusswirksam wird, tritt der Abfluss aus versiegelten Flächen verstärkt und beschleunigt auf, was neben der ungünstigen Beeinflussung des Gesamtwasserhaushaltes eine Verschärfung der Hochwassersituation mit sich bringen kann (SIEKER & SIEKER, 2003).
Die allgemeine Entwicklung einer zunehmenden Versiegelung der Landoberfläche tritt auch im Bundesland Tirol deutlich zutage. Aktuell wird hier täglich ein Hektar für Bau- und Verkehrsflächen verbraucht, der Anteil versiegelter Flächen hat sich zwischen 2001 und 2009 um 10% erhöht (Umweltbundesamt).
In Wildbacheinzugsgebieten ist grundsätzlich danach zu trachten, eine Verschärfung der kritischen Abflusssituation durch Versiegelungseffekte zu verhindern. Dabei ist das natürliche bzw. veränderte Prozessgeschehen zu analysieren, die negativen Einflüsse von Versiegelungen auf das Abflussgeschehen sind gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren. Ein bereits im oberösterreichischen Salzkammergut (KLEBINDER et al. 2007) entwickelter Ansatz zur Bewertung der Auswirkungen von Versiegelungen auf die Abflusssituation konnte im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Mittleres Inntal, erweitert und modifiziert werden.
Für den Bezirk Innsbruck Land sowie das Stadtgebiet Innsbruck wurde eine flächige Bewertungsgrundlage erstellt, welche das natürliche Abfluss- bzw. Verschlechterungspotential auf Basis von vorhandenen Datengrundlagen zum Geo-, Pedo- und Vegetationsinventars beschreibt. Ergänzend stehen dem Sachbearbeiter ein Bewertungshandbuch zum Abschätzen der aktuellen Abflusssituation vor Ort und ein Werkzeug zur quantitativen Berechnung der Auswirkungen vonFlächenversiegelungen zur Verfügung.

Literatur:

BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Hrg. (2009): Hochwasser Paznaun 2005. Wald-Abfluss-Potentiale. Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien.

KLEBINDER K., W. BITTERLICH, B. KOHL, M. SCHIFFER, H. PIRKL & G. MARKART (2007): Wege zur Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Abfluss bei konvektiven Starkregen für Siedlungsräume des oberösterreichischen Salzkammergutes. Wildbach- und Lawinenverbau - Zeitschrift für Wildbach-, Erosions- und Steinschlagschutz, Jg. 71, H. 156, S. 164 – 173.

KOHL B., B. SOTIER, K. KLEBINDER, A. JOCHEM & G. MARKART (2007): Hydrologie Finsing - Szenarienanalyse. Unveröffentlichter Projektbericht des BFW im Auftrag der Wildbach und Lawinenverbauung Sektion Tirol, Innsbruck.

SIEKER, F. & H. SIEKER (2003): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Expertverlag. Umweltbundesamt (o.J): http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/raumordnung/flaechenverbrauch/ (01.09.2010)

Potentielle Wassermangelsituationen in der Alpenregion im 21. Jahrhundert: Eine Fallstudie in Tirol, Österreich

Christoph Kormann, Gerd Bürger, Axel Bronstert

In dieser Studie werden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Dürresituationen im Alpenraum anhand des Fallbeispiels Ötztaler Alpen untersucht. In diesem Beitrag wird die Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Intensität von meteorologischen Dürren (Zeiträume, in denen die Niederschlagsmengen unter dem statistischen Durchschnitt liegen) anhand von Klimaprojektionen analysiert. Im weiteren Verlauf der Studie soll der Einfluss der Klimaänderung auf hydrologische Dürresituationen (Defizite in ober- und unterirdischem Wasserdargebot) prognostiziert werden.
Das Verfahren des „Expanded Downscaling (EDS)“ wurde angewandt, um regionalisierte Klimaszenarien für das Ötztal im 21. Jahrhundert abzuleiten. Das Verfahren stellt empirisch-statistische Beziehungen zwischen großräumigen Feldern von globalen Zirkulationsmodellen und lokal beobachteten Stationsdaten her. Die Besonderheit der EDS-Methode liegt in der Aufrechterhaltung der simulierten Kovarianz im Vergleich mit der beobachteten, was eine realistischere Klimavariabilität als bei vielen anderen Downscalingverfahren mit sich bringt.
Das EDS-Verfahren wurde auf Basis drei unterschiedlicher Arten großräumiger Informationen angewendet: Ergebnis der Kontrollläufe des ECHAM5-Modells für das „Ist-Klima“ (mehrere Realisationen); Ergebnisse der Projektionen des ECHAM5-Modells für künftige Klimabedingungen (Szenarien A1B- und A2), und NCEP Reanalyse-Daten.
Es zeigte sich, dass das EDS-Verfahren ermöglicht, lokale Lufttemperaturen robust, d.h. mit recht kleinen Unsicherheiten, zu simulieren. Ähnliche Ergebnisse konnten auch zumeist beim Niederschlag erzielt werden, allerdings waren an zwei Stationen die Differenzen der jeweiligen langfristigen Statistiken zwischen Kontrolllauf, Reanalysedaten und beobachtetem Niederschlag sehr hoch. Bei der Auswertung der Modellergebnisse bzgl. der Klimaprojektionen im Vergleich mit beobachteten Daten zeigte sich, dass die maximale Dauer der Zeiträume ohne Niederschläge im nächsten Jahrhundert zunehmen. Dieser Trend wird speziell gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich. Generell wurde projiziert, dass die Wahrscheinlichkeit von Tagen mit geringem oder gar keinem Niederschlag zunimmt. In mittleren und extremen Bereichen waren allerdings keine signifikanten Veränderungen feststellbar. Dennoch ist ein Wandel der hydrologischen Situation im Einzugsgebiet zu erwarten. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit der Verschiebung des jahreszeitlichen Wasserangebots bedingt durch fortschreitende Gletscherschmelze, saisonal frühere Schneeschmelze, geringerer Schneeanteil am Gesamtniederschlag, und erhöhte Verdunstungsraten.

Auswirkungen des Klimawandels auf das Hamburger Kanalnetz

Andreas Kuchenbecker, Gerrit Bischoff, Juliane Ziegler, Klaus Krieger,
Hans-Reinhard Verworn

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Quantifizierung der hydraulischen Auswirkungen des Klimawandels auf die innerstädtische Mischkanalisation der Stadt Hamburg. Die Niederschlagsdaten des regionalen Klimamodells REMO auf Basis des IPCC-Szenarios A1B wurden zunächst für einen Vergleichszeitraum mit gemessenen Niederschlagsdaten validiert und anschließend einer umfassenden Trendanalyse unterzogen. Gleiches geschah mit den Ergebnissen der Langzeitseriensimulation des Kanalnetzes bei Verwendung der REMO-Niederschlagsdaten. Auf der Niederschlagsseite für die ein- und zweijährlichen Bemessungsregen eine deutliche Steigerung der Niederschlagshöhen ermittelt, während die Bemessungsregen $T \geq 5$ a keine signifikante Niederschlagszunahme aufwiesen. Auf der Abflussseite zeigten die Simulationsergebnisse eine nachweislich klimainduzierte der Mischwasserüberlaufe. Eine signifikante Zunahme der Schachtüberstauungen konnte hingegen nicht festgestellt werden.

Wie ändert sich die Charakteristika von Hochwasserereignissen unter dem Klimawandel und mit welchen Unsicherheiten sind solche Aussagen behaftet?

J. Liebert, P. Berg, D. Düthmann, J. Ihringer, H. Kunstmann, B. Merz, G. Schädler, S. Wagner

In mehreren Studien wird für den prognostizierten Klimawandel von einer zunehmenden Variabilität von Niederschlag und Temperatur ausgegangen. Das könnte bedeutet, dass auch (extreme) Hochwasserereignisse wahrscheinlicher werden. Zur Beibehaltung unseres Sicherheitsstandart könnten somit weitreichende Anpassung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur notwendig werden, die u.a. sehr kosten- und zeitintensiv sind. Um eine Basis für diese wichtigen Fragestellungen zu geben, wird in dem CEDIM-Projekt „Hochwassergefahr durch Klimawandel“ untersucht, wie sich die Charakteristika von Starkniederschlägen und Hochwasserereignissen unter dem Klimawandel ändert und mit welchen Unsicherheiten solche Aussagen behaftet sind.

Hierzu wird mit einer Modellkette bestehend aus 2 globalen (GCM) und 2 regionalen Klimamodellen (RCMs) sowie 3 hydrologischen Modellen (HMs) für 3 repräsentative Einzugsgebiete ein Ensemble-Ansatz verfolgt. Zwei Einzugsgebiete haben Mittelgebirgscharakter und eines liegt im alpinen Bereich. Der Quantifizierung der Unsicherheitspanne der Ergebnisse, insbesondere aufgrund von unterschiedlichen Antriebsdaten, Regionalisierungsverfahren, Modellauflösung und Modelltypen kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Unter Berücksichtigung der Planungshorizonte wasserbaulicher Maßnahmen und Systeme, liegt der Fokus der Untersuchungen auf dem Zukunftszeitraum 2021-2050.

Wesentliches Ziel des Projekts ist zu quantifizieren und soweit möglich zu beurteilen, welche Variabilität bzw. Unsicherheiten infolge der verschiedenen Modellketten und Anwendungsgebiete vorhanden sind. Hieraus sollen eine Bewertung möglicher Veränderungen von Hochwasserereignissen unterschiedlicher Größenordnung bis hin zu Extremereignissen abgeleitet werden.

Neues Konzept zur Erfassung des Klimawandels in der Modellierung: Einbindung der Ergebnisse von Klimamodellen mit dem „climate change button“

Silvia Matz, Christian Pohl, Ralf Engels, Tobias Drückler

Wissenschaftler auf der ganzen Welt nutzen globale Zirkulationsmodelle (GCM) für die Erstellung von Szenarien für die Abschätzung von Veränderungen in Temperatur und Niederschlag. Um daraus die konkreten Folgen für die Wasserwirtschaft besser abschätzen zu können, werden Anpassungen an bestehenden hydrologischen und hydraulischen Modellen notwendig werden. Eine solche Anpassung wird im Folgenden beschrieben.

DHI hat sich der Herausforderung gestellt und ein Klimawandelmodul entwickelt, um aktuelle Fragestellungen unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien modellieren zu können. Fachleute sind damit bereits heute in der Lage die Infrastrukturplanung zukunftssicher zu gestalten.

Das Klimawandelmodul basiert auf den vom Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) entwickelten CO2-Emissionsszenarien. Die Ergebnisse dieser Modelle haben Eingang in das Klimawandelmodul (von DHI) gefunden. Das Resultat ist eine Datenbank mit einer Vielzahl wissenschaftlich belegter Informationen zu möglichen Veränderungen des Klimas bis zum Jahr 2100.

Besonders interessant für detaillierte lokale Studien ist, dass diese Klimadatenbank jederzeit um feingliedrige, lokale Klimamodelle wie z.B. KOSTRA Daten, erweitert und ergänzt werden kann. Damit sind Wasserfachleute in der Lage, schnell und nachvollziehbar Szenarien für einen möglichen Klimawandel zu modellieren und die Ergebnisse in eine nachhaltige Infrastrukturplanung einfließen zu lassen. Für die Erstellung eines Szenarios sind vier Schritte notwendig: (1) Ein bestehendes MIKE Modell als Grundlage für die Szenarien, (2) ein gewünschtes Emissionsszenario, (3) die globalen und/oder lokalen Zirkulationsmodelle, die als Basis für die Veränderung der Modellrandbedingungen dienen und zum Schluss (4) das Jahr zwischen 2010 und 2100, für das die Simulation durchgeführt werden soll. Anschließend werden neue Szenarien für das hydrodynamische Modell erstellt und berechnet. Die Ergebnisse können ausgewertet und mit dem Ist-Zustand verglichen werden. Eine Auswahl von Szenarien bietet dem Experten eine ideale Grundlage für die Planung langfristiger Infrastrukturmaßnahmen. Das Klimawandelmodul ist in den Softwareprodukten MIKE 11, MIKE 21,MIKE FLOOD, MIKE SHE und MIKE URBAN (by DHI) implementiert.

Unsicherheiten bei der Parametrisierung von Pedotransferfunktionen und deren Auswirkungen auf simulierte Wasserdefizitgrößen

Svetlana Pool, Heike Puhlmann, Yvonne Morgenstern

Laut des Bewertungsberichtes des IPCC 2007 ist als eine der Folgen des Klimawandels ein Rückgang der Bodenfeuchte in verschiedenen Regionen zu erwarten. Um zu beurteilen, in welchem Maße sich der hieraus resultierende Trockenstress für Bäume auf deren Vitalität und Wachstum auswirkt, müssen Modelle herangezogen und sinnvoll parametrisiert werden.
Für intensiv untersuchte Standorte mit langjährigen Messwerten ist die Kalibrierung der Modelle relativ unproblematisch. Anders verhält es sich bei unbekannten Standorten. Hier müssen die benötigten Parameter bestmöglich geschätzt werden. Eine Möglichkeit zur Schätzung von Mualem/van Genuchten-Parameter sind Pedotransferfunktionen. Diese setzen die hydraulischen Größen in statistische Beziehung zu Bodendaten wie Textur und Trockenrohdichte.
Anhand des Level II-Messplots Heidelberg zeigt das Poster Unsicherheiten auf, die sich aus der Parametrisierung von Pedotransferfunktionen für unbekannte Standorte in Wasserhaushaltssimulationen ergeben können. Für verschiedene Datengrundlagen – Profilansprache und forstliche Standortkartierung – werden zwei Fälle betrachtet: 1.) Unsicherheiten, die sich durch Generalisierung angesprochener Bodeneigenschaften ergeben, 2.) Unsicherheiten, die durch Fehlschätzungen von Bodengrößen entstehen können. Die Quantifizierung der Unsicherheiten erfolgt über den Vergleich der gemessenen Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen mit denen, die sich durch die verschiedenen Parametrisierungsansätze der Pedotransferfunktionen ergeben. Ebenso werden Wasserdefizitgrößen in verschiedenen Bodentiefen aus den Simulationen des kalibrierten Modells BROOK90-LWF für den Zeitraum 1996-2007 ermittelt und verglichen.

Entwicklung der Stickstoff- und Phosphoreinträge im Einzugsgebiet der oberen Stör

Cristiano Andre Pott, Britta Schmalz, Nicola Fohrer

Nährstoffeinträge in oberirdische Gewässer, hauptsächlich Stickstoff und Phosphor, spielen eine große Rolle für die Fließgewässer, besonders für das Verschmutzungspotenzial. Dieser Eintrag erfolgt über punktuelle oder diffuse Pfade. Die Landwirtschaft trägt überwiegend zum diffusen Nährstoffeintrag bei, während Abflüsse von Kläranlagen und sonstige Einleitungen für punktuelle Einträge sorgen.

Das Ziel dieser Studie ist die Bewertung der Veränderung der Wasserqualität im Einzugsgebiet der oberen Stör zwischen den Jahren 1991-1995 und 2009-2010, um die Wirksamkeit von Umweltschutzmaßnahmen der letzten 10 Jahren zu überprüfen. Die untersuchten Wasserqualitätsparameter sind: Gesamt-Phosphor (P-ges), Phosphat-löslich (PO4-P), Gesamt-Stickstoff (N-ges), Nitrat-Stickstoff (NO3-N), Ammonium-Stickstoff (NH4-N).

Das Einzugsgebiet der oberen Stör (462 km²) liegt in Schleswig-Holstein. Es gehört zur Flussgebietseinheit der Elbe und umfasst das Teileinzugsgebiet der oberen, tidefreien Stör von ihrem Quellgebiet bis zum Pegel Willenscharen. Zwischen 1991 und 1995 wurde im Stör-Projekt (Ripl et al., 1996) monatlich an 128 Punkten in den Fließgewässern die Wasserqualität gemessen. Derzeit untersucht die Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft des Instituts für Natur- und Ressourcenschutz der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel erneut dieses Einzugsgebiet. Neben 21 im Einzugsgebiet verteilten Wasserqualitätsmesspunkten in ist zusätzlich ein automatischer Probenehmer am Gebietsauslass der oberen Stör (Willenscharen) installiert, der 20 mal pro Tag eine Wasserprobe zu einer Tagesmischprobe vereint.

Zielsetzung dieser Studie ist ein Vergleich der beiden Untersuchungszeiträume um die Wirkung von Umweltmaßnahmen anhand der Entwicklung der Wasserqualität zu überprüfen. Der erste Datensatz enthält 44 monatliche Wasserqualitätsmessungen am Pegel Willenscharen (März 1991 bis März 1995), deren Wasserproben mit einem Schöpfbecher entnommen wurden. Die aktuellen Daten umfassen derzeit 400 tägliche Wasserqualitätsmessungen (08.08.2009 bis 02.10.2010), die mit einem automatischen Probenehmer entnommen wurden.

Zur Abschätzung der Wasserqualität der oberen Stör wurden die Daten im Rahmen der Vorgaben der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) eingeordnet. Güteklasse II (GK-II) repräsentiert dabei einen Wert, der als Zielvorgabe gilt. Dabei ergaben die Ergebnisse in Willenscharen, dass die früheren Messdaten zu 80, 0, 0 und 77% (P-ges, N-ges, NO3-N und NH4) in GK-II liegen. Die aktuellen Messwerte liegen mit 68, 100, 63, 63 und 96% (P-ges, PO4-P, N-ges, NO3-N und NH4) in GK-II.

Vergleich der Bedeutung des Eisschmelzanteils für den Abfluss eines zentralasiatischen mit einem mitteleuropäischen Einzugsgebiet

Monika Prasch, Markus Weber, Wolfram Mauser, Ludwig Braun

Gletscher stellen ein beachtliches Süßwasserreservoir in alpinen Kopfeinzugsgebieten dar und tragen mit ihrer Schmelzwasserspende zum Wasserhaushalt der Vorländer bei. Aufgrund des fast weltweiten Geltscherrückgangs während der letzten Dekaden stellt sich die Frage nach ihrer weiteren Entwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und den damit verbundenen Auswirkungen auf die künftige Schmelzwasserspende. Besonders in Zentralasien ist die (künftige) Bedeutung der Gletscherspende für den Wasserhaushalt außerhalb der Hochgebirgsregionen umstritten.

Um geeignete Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln, wurden im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsprojektes Brahmatwinn die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in Zentralasien untersucht. Dabei wurde das im Rahmen des Projektes GLOWA-Danube entwickelte und im Einzugsgebiet der Oberen Donau erfolgreich angewendete, prozessorientierte Gletschermodell SURGES (**Su**bscale **R**egional **G**lacier **E**xtension **S**imulator) auf das Einzugsgebiet des Lhasa River in Tibet übertragen. Die Implementierung in das Landoberflächenprozessmodell PROMET (**Pro**cesses of **M**ass and **E**nergy **T**ransfer) ermöglicht die Bestimmung des Einflusses der Eisschmelze auf den Abfluss alpiner Vorländer in meso- bis großskaligen Einzugsgebieten. Nach erfolgreicher Validierung des Modellansatzes wurden die Veränderungen für die IPCC Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 bis zum Jahr 2080 durch die Kopplung mit dem regionalen Klimamodell CLM untersucht.

Der Beitrag der Eisschmelze am Abfluss wird in seiner räumlichen und zeitlichen Entwicklung sowohl unter vergangen als auch künftigen Klimabedingungen für das Einzugsgebiet des Lhasa River in Tibet präsentiert. Seine Bedeutung für den Abfluss wird im Verhältnis zu den weiteren Wasserhaushaltsgrößen wie z.B. der Niederschlagssumme oder der Schneeschmelze analysiert. Schließlich wird der Einfluss der Eisschmelze für den Abfluss im zentralasiatischen, vom Monsun geprägten Gebiet des Lhasa River mit dem im mitteleuropäischen Einzugsgebiet der Oberen Donau verglichen.

Reaktion von aquatischen Ökosystemen auf Landnutzungs- und Klimaänderungen im chinesischen Poyang-Gebiet - DPSI-Konzept einer integrierten Modellierung

Britta Schmalz, Nicola Fohrer, Sonja Jähnig, Qinghua Cai

Einzugsgebietseigenschaften, Prozesse im Fließgewässer und ihre Auswirkung auf aquatische Organismen sind eng gekoppelt. Die Interaktionen zwischen den treibenden Kräften, den assoziierten Prozessen und den möglichen Rückkopplungsmechanismen sind allerdings bisher noch nicht vollständig verstanden. Die Entwicklung einer integrierten Modellierungsmethode zur Bewertung der Auswirkung von schnellen Umweltveränderungen auf aquatische Ökosysteme soll diese Wissenslücken schließen. Dieses Ziel soll im Rahmen eines DFG-/NSFC-Projektes am Beispiel-Einzugsgebiet des Changjiang im Bereich des Poyang-Sees (China) erreicht werden.

Gemeinsame Mess- und Probenahmekampagnen sind die Basis für die Integration von drei Modellsystemen: Um ein dynamisches DPSI (R)-System zu modellieren, werden die Modelle SWAT (Einzugsgebietsprozesse), HEC-RAS (Prozesse im Fließgewässer) und MAXENT/ BIOMOD (Artenverteilung) gekoppelt. Einflussfaktoren wie Klima, Flächennutzung und Gerinneveränderungen sind Modell-Eingangsdaten, während die Hauptbelastungen auf das Ökosystem (Wasserhaushalt, Nährstoffe, Sedimentation) in den Modellalgorithmen definiert und dargestellt werden. Basierend auf diesen Belastungen sollen die Änderungen des Zustandes der Habitatparameter (z.B. Abfluss, Tiefe, Substrat) in der Modellausgabe dynamisch bewertet werden. Schließlich wird die Auswirkung des Zustandes auf die aquatischen Ökosysteme ausgewertet, indem die Verschiebung der modellierten Verbreitungsgebiete sowie Änderungen in der Biodiversität oder den Ökosystemindikatoren von benthischen Invertebraten analysiert werden. Gemeinsame Szenarienläufe unter Berücksichtigung von Klima- oder Flächennutzungsänderungen verbessern das Verständnis, (1) wie Landschaftsprozesse und Nährstoffzyklen mit den ökohydrologischen und aquatischen Eigenschaften zusammenwirken und (2) wie die Auswirkung von Flächennutzungs-, Klima- und hydromorphologischen Änderungen auf aquatische Ökosystemeigenschaften bewertet werden können.

Als Posterpräsentation möchten wir gerne das Konzept dieses DFG-/NSFC-Projektes näher vorstellen. Zudem werden die ersten Ergebnisse aus Messkampagnen und einer SWATModellierung gezeigt.

Entstehung neuer Gletscherseen in den Hohen Tauern als Folge des Klimawandels - Erfassung, Analyse und mögliche zukünftige Entwicklungen

Heinz Slupetzky, Hans Wiesenegger, Georg Kum, Martin Geilhausen

Eine der auffälligsten Veränderungen in der alpinen Hochgebirgslandschaft sind Veränderungen der Gletscher, die in den Hohen Tauern als Folge der Klimaerwärmung in allen drei Dimensionen deutlich kleiner geworden sind.
Der mit nur kurzen Unterbrechungen seit 1850 anhaltende Gletscherrückgang hat die Oberflächentopographie von ehemals eisbedecktem Gelände deutlich verändert. Speziell im Salzburger Stubach- und Obersulzbachtal sind im Nahbereich von Gletschern, die sich in Geländevertiefungen zurückziehen, mehrere neue (Eisrand-) Seen entstanden (SEITLINGER et al. 2006; WIESENEGGER & SLUPETZKY 2009). Diese können sich je nach Geländebedingungen zu unterschiedlichen Seentypen entwickeln - permanente Seen wie z.B. der "Untere Eisbodensee" im Nahbereich des Stubacher Sonnblickkeeses oder temporäre Seen wie der höchstgelegene See im Nationalpark Hohe Tauern, der "Fillecksee".
Der Entwicklungsprozess beginnt mit Einsenkungen in der Eisoberfläche mit bogenförmigen Spaltenkonfigurationen. Dann kommt es zum Einbrechen eines subglazialen Gewölbes, wobei sich erstmals am Grund des Einsturztrichters eine Wasseroberfläche zeigt. Als Zwischenstadium bildet sich ein subglazialer Wasserkörper, bis schließlich ein Eisrandsee entsteht. In manchen Fällen kommt es zu einer Verlagerung des Seeausflusses, bevor das Endstadium, ein "fertiger" (permanenter) See, erreicht ist. Dieser wirkt meist dämpfend auf das Abflussregime, zeigt an heißen Sommertagen rhythmische Abfluss- und Temperaturschwankungen und kann in weiterer Folge auch verlanden.
Es wurden zahlreiche Beobachtungen und Messungen (terrestrische Laserscans, Echolot, Abflussmessungen usw.) initiiert, um die Genese dieser Seen und die damit verbundenen dynamischen Prozesse interdisziplinär zu erforschen, zu dokumentieren und mögliche zukünftige Entwicklungen abzuschätzen (SLUPETZKY, 1997, 1998, 2007).

Trockenheit im Kontext des Klimawandels: Ergebnisse einer sektorübergreifenden Umfrage

Michael Stölzle, Kerstin Stahl

Die Befragung von Akteuren hilft, die Auswirkungen des Klimawandels genauer zu identifizieren und die Sicht der Betroffenen in die Klimafolgenforschung einzubinden. Das Ziel einer Umfrage unter verschiedenen Akteursgruppen in Baden-Württemberg war es, eine spezifische Vulnerabilität gegenüber Trockenheitsmerkmalen und deren zeitliche Variabilität im Jahresverlauf zu detektieren. Die Ausprägungen und Relevanz von Trockenheit in Baden-Württemberg wurde über Leitfragen ermittelt: Welche Sensitivität gegenüber einer bestimmten Form des Wassermangels (z.B. geringe Bodenfeuchte, Niedrigwasser, u.a.) ist seites der Akteure erkennbar? Welches Gefährdungspotential haben Trockenperioden für Sektoren wie Wasserwirtschaft, Forst- und Agrarwirtschaft oder den Tourismus? Welche Relevanz haben unterschiedliche Trockenheitsmerkmale (z.B. ausbleibender Niederschlag, geringe Abflussmengen) innerhalb der vielfältigen Naturräume Baden-Württembergs bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen?

Die Umfrageergebnisse zeigen, dass sich Vulnerabilität gegenüber Trockenheit stärker sektoral als regional differenzieren lässt. Dabei werden Niederschlag, Grundwasser und Bodenfeuchte als wichtige hydrologische Variablen und die Vegetationsperiode als relevanter Zeitraum eingestuft. Innerhalb der Sektoren ist eine spezifische Vulnerabilität gegenüber Trockenheitsmerkmalen quantifizierbar, welche wiederum eine zeitliche Variabilität im Jahresverlauf aufweist. Vergangene Extremereignisse wie die Hitzewelle und Trockenperiode des Sommers 2003 haben das Bewusstsein der Akteure gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels deutlich verstärkt. Anpassungsstrategien infolge der Extremereignisse können hingegen nur qualitativ skizziert werden. Der Wunsch nach einer langfristigen Prognose von Klimaänderungen überwiegt gegenüber einer saisonalen Vorhersage von Trockenheit, jedoch mit sektoralen Besonderheiten. Die Befragung der Akteure gibt überdies Hinweise darauf, dass sich die innerjährlichen akteursspezifischen Sensitivitäten gegenüber Trockenheit verschieben werden. Daher sollte Vulnerabilität gegenüber Trockenheit zukünftig im Kontext der prognostizierten Veränderungen von Klimavariablen interpretiert werden.

Wasserbilanz des Feuchtgebiets Nabajjuzi in Uganda

Astrid Unterberger

Das Papyrusfeuchtgebiet Nabajjuzi in Uganda, Westafrika, gehört zu den „Wetlands of International Importance“ laut Ramsar Konvention. Es beherbergt zahlreiche Arten, die vom Aussterben bedroht sind sowie auch einige Endemite. Außerdem dient es als Wasserressource für die Bevölkerung der anliegenden Stadt Massaka und für die Bauern der Umgebung.
Potentiell ist dieses Gebiet nun durch den Klimawandel und die rasch ansteigenden Bevölkerungszahlen in seiner Existenz bedroht.
In dieser Arbeit wird der Wasserhaushalt eines bestimmten Abschnittes des Feuchtgebiets analysiert. In diesem Abschnitt findet Wasserentnahme durch die Bevölkerung der Stadt Massaka statt.
Anhand von bestehenden Bevölkerungswachstums- und Klimaprognosen werden Wasserbilanzen für die nächsten 40 Jahre simuliert. Das Ergebnis der Bevölkerungswachstumsprognose von Omar Aslam et.al. stellt sich in Form einer Simulation des Wasserverbrauchs der Stadt Massaka bis 2050 dar. Die Klimaprognosen bestehen auf Basis zweier unterschiedlicher Modelle (cclm und remo), geben also zwei von vielen Möglichkeiten der Klimaentwicklungen wieder.
Die eigentliche Simulation wird auf Basis des mathematischen Modells „Linearer Speicher“ durchgeführt, mit den Eingangsdaten Zufluss, Abfluss, Wasserstand und Wasserverlust (durch Entnahme und Evapotranspiration).
Das Modell wurde anhand von Messungen der Water and Seweage Corporation Uganda über April-Mai 2010 und selbst durchgeführten Messungen kalibriert. Weitere Daten zur Aussage über die Änderung des Wasservolumens im Speicher wurden aus dem Digitalen Höhenmodell im Arc-GIS ausgelesen.
Die Simulationen, durchgeführt bis ins Jahr 2050, ergeben einen starken Abfall des Abflusses durch die steigenden Wasserentnahmen (+400%) und sinkende Zuflüsse. Es kann angenommen werden, dass die Wasserqualität für Trinkwasser und die Quantität zur Erhaltung des Feuchtgebietes über längeren Zeitraum nicht mehr gegeben sein wird.

Changing intercatchment flow in a binary karst system – The Lurbach system, Austria

Thomas Wagner, Cyril Mayaud, Kim Maren Lompe, Thomas Reimann, Ralf Benischke, Stefan Hergarten, Gerfried Winkler, Steffen Birk

The Central Styrian Karst located in the Paleozoic of Graz contains a great number of caves. Along the Mur River, the longest accessible cave system is the Lurgrotte. It is one part of a complex binary karst system. A surface stream, the Lurbach, drains a basin of ~14.5 km² of low permeable schists before it enters the Tanneben karst massif and vanishes as a sinking stream. This limestone block has an areal extent of about 8.3 km² and is characterized morphologically by numerous sinkholes, dry valleys and (mostly plugged) shafts. Two important springs, the Hammerbach (HB) and the Schmelzbach (SB), drain the whole region. The SB forms the lowest accessible and water active part of the Lurgrotte cave system. Hydrograph and physico-chemical analyses as well as numerous tracer experiments were used to improve the understanding of the non-accessible parts of the karst aquifer system. But much remained unanswered, especially the actual flow path and flow conditions from the sinking Lurbach to its reappearance at the HB spring. Hydrograph analyses point toward diffuse flow, whereas tracer experiments indicate more channelized flow. Even open channel flow in some sections cannot be ruled out. Unfortunately, no observation wells are available to observe changes in the groundwater level. However, accessible parts of this multi-level karst aquifer system allow to somewhat compensate this drawback.

Interestingly, tracer tests suggest that the two springs are separated at low flow conditions. The HB spring drains parts of the karst plateau and the whole allogenic input from the Lurbach, whereas the SB drains only autogenic parts of the karst massif. At medium flow conditions and higher, the spring catchments seem to interact. Intercatchment flow from the HB system to the SB system is observed. During flood conditions, the Lurgrotte cave itself operates as the plumping system and water is drained directly through it. Under such conditions, redistribution of cave sediments becomes apparent, and sinkholes in the system may get plugged and passages flooded.

Hydrograph and especially recession curve analyses show a change of the system behavior after a flood event recorded in August 2005. Since then, HB peak flows are reduced, but base flows increased. In addition, the threshold level to achieve overflow into the SB system seems to have lowered. If this change can be related to changes in climate or the plumping system is discussed here, although hampered by the fact that the period under consideration after this flooding event is rather short. Conceptual understanding of the karst system is used to apply distributed and (physically based) lumped parameter models. First results indicate that plugging of sinkholes and conduits might play an important role. In addition the influence of a retention basin and a sewage plant upstream of the major sinkhole of the Lurbach deserves further consideration. In contrast, the observed changes do not appear to be related to climate changes.

Posterbeiträge zum Thema 3:
Ressource Wasser: Analyse und Bewirtschaftung

Skalenseparation von Transpirationseffekten auf Niederwasserbereiche

Martine Broer, Alexander Eder, Peter Strauss, Günter Blöschl

In einem 64 ha großen Einzugsgebiet in Niederösterreich wurden tägliche Abflussschwankungen im Niederwasserbereich, die durch Transpiration hervorgerufen werden, analysiert. Die Daten deuten darauf hin, dass unterschiedliche Skalen im Zeitbereich existieren, da eine schnell reagierende (tägliche) Komponente und eine langsam reagierende (saisonale) Komponente unterschieden werden können und wenig Variabilität dazwischen auftritt. Es wird angenommen, dass ein Wald entlang der Uferzone, der in das Grundwasser wurzelt, die täglichen Schwankungen verursacht, während die Vegetation das gesamte Einzugsgebietes, die vom Grundwasser durch die ungesättigte Bodenzone getrennt ist die saisonalen Schwankungen hervorruft.

Die zeitliche Verzögerung in den Abflussdaten auf beiden Skalen wurde mit einem eigens entwickelten Modell genauer analysiert und deren Entwicklung im Jahresverlauf bestimmt. Das Modell kann die täglichen Schwankungen im Niederwasserbereich sehr gut wiedergeben. Eine Ausnahme stellt die Wintersaison dar, da zu dieser Jahreszeit kleinere Schwankungen im Abflusssignal auftreten. Man kann eine deutliche Änderung der Prozesse im Frühjahr und im Herbst bei Frostbeginn beobachten. Die zeitliche Verzögerung zwischen der Globalstrahlung und den Schwankungen in Niederwasserbereich steigen von 6 Stunden in Frühjahr auf 13 Stunden im Herbst, da die Bodenfeuchte im Herbst niedriger ist. Diese Zeitverzögerung ist der Uferzone zuzuordnen. Der Zeitparameter (k) der Rezessionskurve nimmt von 40 Tage im Frühjahr auf 100 Tage im Herbst zu. Auch hier wird die Änderung von der im Herbst geringeren Bodenfeuchte verursacht, allerdings auf Einzugsgebietskala. Die Auswirkung dieser Ergebnisse auf die Modellierung von Einzugsgebieten auf verschiedenen Skalen wird diskutiert.

Modellierung des Herbizid-Eintragspotentials in Fließgewässer des Norddeutschen Tieflandes

Antje Dietrich, Fred Schulz, Nicola Fohrer

Pflanzenschutzmittelwirkstoffe (PSM) sind mit saisonal unterschiedlicher Verteilung in messbaren Konzentrationen im Oberflächen- und Grundwasser nachweisbar (u.a. FISCHER 1996, HUBER 1998, BACH ET AL. 2001, ACCINELLI ET AL. 2002, BROWN ET AL. 2004) und können neben Nährstoffeinträgen zu Belastungen und negativen Auswirkungen auf das aquatische Ökosystem führen (u.a. SCHULZ 2004, AKKAN ET AL. 2003, WINKLER 1999).
Mit Umsetzung der EG-WRRL zum Erreichen der Umweltziele bis 2015 nach Art. 4 EGWRRL sind Handlungsstrategien zur Verringerung der PSM-Einträge in die Gewässer erforderlich und sollen in der Beratungspraxis für die Landwirtschaft berücksichtigt werden. Kenntnisse über Anteile und Bedeutung der wichtigsten PSMEintragspfade sind zur Verringerung der Belastung notwendig. Während Einträge aus punktuellen Einleitern (Kläranlagen, Direkteinleitungen von Hofabläufen) vergleichsweise gut lokalisiert und quantifiziert werden können, stellen diffuse Quellen (u.a. Oberflächenabfluss und -abtrag, Abdrift, Drän-, Zwischenabfluss und grundwasserbürtiger Anteil) eine schwer bestimmbare, jedoch bedeutende Eintragsquelle für Pflanzenschutzmittelwirkstoffe dar.
Das Modellsystem wird in einem etwa 50 km² großen, landwirtschaftlich geprägten, Flusseinzugsgebiet des Norddeutschen Tieflandes mit dem ökohydrologischen Modell SWAT (Soil and Water Assessment Tool; ARNOLD ET AL. 1998) getestet und einer Analyse der PSMTransportpfade auf Flusseinzugsgebietsebene unterzogen. Unter Berücksichtigung der regionalen Randbedingungen, sollen mögliche Probleme im Bearbeitungsgebiet identifiziert und in Szenarienrechnungen geeignete gewässerschonende Maßnahmenvorschläge zur PSMReduktion mit dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) erarbeitet und später hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf die Bewirtschaftungsziele nach EG-WRRL modellgestützt untersucht und bewertet werden.

Großskalige Modellierung der Verdunstung für die Moorstandorte Deutschlands im Rahmen des Verbundprojektes „Organische Böden“

Enrico Frahm, Susanne Liske, Annette Freibauer

Die vorgestellte Untersuchung ist in das im Januar 2009 gestartete Verbundprojekt „Organische Böden“ eingegliedert. Das Projekt verfolgt das Ziel, die Klimaberichterstattung für die „Organischen Böden Deutschlands“ gemäß IPCC-Guidelines und die dafür erforderlichen Aktivitätsdaten, Emissionsfaktoren und Verfahren zu vervollständigen und auf eine konsistente Basis zu stellen. Im Zentrum der Untersuchungen steht die experimentelle Ermittlung standortbezogener Emissionsfaktoren für CO_2, CH_4 und N_2O in Abhängigkeit von Wasserstandsdynamik, Bodeneigenschaften und Landnutzung.

Auf Moorstandorten spielt für die Freisetzung dieser klimarelevanten Gase der Grundwasserflurabstand eine zentrale Rolle. Vor diesem Hintergrund befasst sich ein Teilprojekt mit der hydrologischen Charakterisierung der 16 projekteigenen Testgebiete und dem Aufbau eines deutschlandweiten hydrologischen Modells für organische Böden. Ziel ist die Erstellung eines zuverlässigen Prognosewerkzeugs mit dessen Hilfe sich Grundwasserstände unter variierenden Randbedingungen, z.B. Bewirtschaftungs- und Wassermanagement, vorhersagen lassen.

Die Verdunstung stellt gerade in der Vegetationsperiode eine entscheidende Größe für die Ausbildung des Grundwasserflurabstandes dar. D.h. in dem zu erstellenden hydrologischen Modell spielt die Implementierung eines entsprechenden Verdunstungsmoduls eine zentrale Rolle. Für die hier vorgestellte Untersuchung besteht das wesentliche Ziel darin, ein Modul zu entwickeln, dass flächendeckend Verdunstungswerte auf großskaliger Ebene für die Moorstandorte in Deutschland bereitstellen kann. Die Basis hierfür bildet das Verschneiden einer Karte der organischen Böden Deutschlands mit Daten über Nutzung, Vegetation und Klima. Eine Verifikation der Modellergebnisse erfolgt anhand der parallel durchgeführten lokalen Standortmodellierungen zur Verdunstung in den 16 Projekttestgebieten.

An dieser Stelle werden das Konzept zur Verdunstungsmodellierung vorgestellt und erste Ergebnisse präsentiert. Neben der Erläuterung der Modellstruktur wird dabei schwerpunktmäßig auf die Methodendiskussion und Parameteridentifikation eingegangen.

Zeiteffiziente Nachbildung numerischer Berechnungen von Teilprozessen des Bodenwasserhaushalts mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze

Marlene Gelleszun, Phillip Kreye

In der Wasserhaushaltsmodellierung sind Langzeitberechnungen von wichtiger Bedeutung. Sollen Niederschlag-Abfluss-Prozesse hierbei großskalig zeitlich und auch räumlich differenziert berechnet werden, resultiert dies in vielen Fällen in langen Simulationszeiten. Die Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig entwickelt derzeitig, in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Prof. Hartung und Partner, ein deterministisches Modellsystem, mit der Bezeichnung Panta Rhei, für die Vorhersage von Hochwässern sowie für die langfristige Modellierung des Wasserhaushalts. Darin ist der physikalisch basierte Infiltrationsansatz nach Philip implementiert, für dessen Infiltration die numerische Berechnung der Sorptivität erforderlich ist. Methodisch wurde mit verschiedenen Modellansätzen und umfangreichen Untersuchungen aus dem Bereich der künstlichen neuronalen Netze gezeigt, dass diese rechenintensiven bodenphysikalischen Teilberechnungen durch Multilayer-Feed-Forward Netze mit multipler Eingabe zeiteffizient nachgebildet werden können. Untersucht wurden exemplarisch Hydrotope mit den Bodenarten Schluff, Ton und Sand.

Als Alternative zu den künstlichen neuronalen Netzen wurde die numerisch aufwändige Berechnung der Sorptivität durch eine einfache approximative Funktion des Bodenwassergehalts ersetzt. Mit der daraus berechneten Infiltration wurden Abweichungen zu den numerisch berechneten Infiltrationswerten von weniger als 1% in der Massenbilanzierung über fünf Jahre erzielt.

Es konnte gezeigt werden, dass das Philip-Infiltrations-Modul plausibel konzipiert ist und Überschätzungen der Infiltration bei den oben genannten Methoden keine langfristigen Folgen auf den Wassergehalt des Bodenspeichers haben.

Weitere Einsatzmöglichkeiten künstlicher neuronaler Netze in der Hydrologie wurden untersucht. So konnte gezeigt werden, dass die instationäre Lösung der allgemeinen Konvektions- Dispersionsgleichung mit Time-Delay Netzen herausragend gut, bei gleichzeitig sehr geringem rechnerischen Aufwand, nachgebildet werden kann.

Einbindung von Landsat-7 (TIR) Sensordaten zur Verbesserung der Schneeschmelzmodellierung mit dem Temperatur-Index-Verfahren in alpinen Einzugsgebieten

Ulrich Haberl, Hans-Peter Nachtnebel

Bei der wasserwirtschaftlichen Modellierung von alpinen Einzugsgebieten bildet die Schneeschmelze eine entscheidende Abflusskomponente. Das einfachste Verfahren zur Berechnung der Schneeschmelze ist das Temperatur-Index-Verfahren, welches einen linearen Zusammenhang zwischen positiver Lufttemperatur und Schmelzenergie annimmt. Bei der Anwendung des Temperatur-Index-Verfahren in den österreichischen Zentralalpen mit hoch aufgelösten Lufttemperaturdaten des nationalen Wetterdienst (ZAMG) ist generell eine starke Schneeakkumulation in Seehöhen über 2000 m zu beobachten. Diese Akkumulation ist nicht allein über die gewählten Schmelzfaktoren (Modellparameter) oder durch Fehler in den Lufttemperaturen (Modellinput) zu erklären. Vielmehr ist die im Temperatur-Index Verfahren verwendete Annahme in diesen Höhenlagen nicht mehr zutreffend. Um das Temperatur-Index-Modell auch in diesen Bereichen einsetzen zu können wurden normierte Sensordaten des Landsat-7 Satelliten im thermischen Infrarotbereich (TIR) mit den normierten Input- Lufttemperaturdaten verglichen. Die von einer Oberfläche emittierte thermische Infrarot- Strahlung steht in physikalischem Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur. Der Vergleich der normierten Datensätze ergibt einen räumlich verteilten relativen Differenzwert zwischen der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur. Die Oberflächentemperatur ist hauptsächlich von der Globalstrahlung beeinflusst, weshalb die gefundenen relativen Differenzen zwischen Lufttemperatur und Oberflächentemperatur als die in der Lufttemperatur fehlende strahlungsabhängige Schmelzenergie interpretiert werden kann. Da nur die normierten Landsat-7 TIR Sensordaten für diesen Vergleich herangezogen wurden, und keine absoluten Oberflächentemperaturen Verwendung fanden, wurde ein Vergleich zwischen MODIS Oberflächentemperaturen und Landsat-7 TIR-Sensordaten durchgeführt. Dieser Vergleich zeigte, dass die räumliche Verteilung der relativen Oberflächentemperatur allein durch die Landsat-7 Sensordaten ohne weitergehende Bearbeitung eine gute Näherung an die Verteilung der absoluten Oberflächentemperatur darstellt. Die Differenzenbildung zwischen normierten Lufttemperaturen und normierten Landsat-7 TIR-Sensordaten wurde für 40 Landsat-7 Szenen zwischen 2003 und 2009 für das Salzach-Einzugsgebiet durchgeführt. Für Höhenzonen zwischen 1400m und 3000m zeigten sich deutlich höhere Oberflächentemperaturen als Lufttemperaturen in den Sommermonaten Juni bis September. Im Winter ergaben sich keine systematischen Unterschiede. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Strahlungseinfluss in den hohen alpinen Einzugsgebieten nicht ausschließlich mit der Lufttemperatur beschrieben werden kann. Korrigiert man die Input-Lufttemperaturen im Temperatur-Index-Modell mit den gefundenen Differenzen unter Berücksichtigung des Bewölkungsgrades, so kommt es zu keiner Schneeakkumulation in hohen Lagen. Weiters zeigt eine Validierung der Modellergebnisse mit MODIS Schneebedeckungskarten eine Verbesserung des zeitlichen Verlaufs der Ausaperung im Modell. Die vorgestellte Methode hat neben den verbesserten Modellergebnissen den Vorteil, dass keine weiteren Modellparameter eingeführt werden und gemessene einzugsgebietsspezifische Eigenschaften in das Modell Eingang finden.

Berücksichtigung von Klimaszenarien bei der Anpassung von Steuerungsregeln für große Talsperren: Ein transnationaler Ansatz für das Maas-Einzugsgebiet

N.P. Huber, M. Kufeld, B. Sinaba, H. Schüttrumpf, B. Hausmann, R. Breuer, H. Nacken, C. Homann, T. Rose, G. Demny, J. Lange, C. Rabisch, B. Dewals, S. Detrembleur, J. Ernst, P. Archambeau, S. Erpicum

Insbesondere große Talsperren eröffnen die einzigartige Möglichkeit, die Auswirkungen des Klimawandels zu mindern. Das gegenwärtige Wissen über Klimaszenarien kann bei der Erstellung neuer Steuerungsregeln verwendet werden, um neue Ziele beim Hochwasserschutz und bei der Bewirtschaftung in Niedrigwasserphasen zu erreichen.
Im Rahmen des Interreg IVB-Projektes AMICE, an dem 17 europäische Institutionen beteiligt sind, werden derartige Studien auf der Ebene des Maas-Einzugsgebiets unternommen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen dabei die beiden Vesdre-Talsperren in Belgien mit einem Gesamtspeichervolumen von ca. 50 Mio. m^3 sowie die Talsperren der Nordeifel in Deutschland mit einem Gesamtspeichervolumen von ca. 300 Mio. m^3. Ihr Einfluss erstreckt sich auf weite Teile des stromabwärts gelegenen Gebietes und damit auch auf Teile der unteren Maas in den Niederlanden. Alle genannten Talsperren dienen mehreren Zwecken, u.a. der Wasserversorgung sowie dem Hoch- und Niedrigwasserschutz.
Um die Steuerungsregeln anzupassen, wurde ein integrierter Ansatz entwickelt. Das in Deutschland vorhandene Simulationsmodell besteht aus hydrologischen Modellen, einem Modul für die im Verbund betriebenen Talsperren sowie einem gekoppelten 1d-2d hydraulischen Modell zur Bestimmung von Überflutungsflächen. In Belgien werden die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung einem Modul zur Simulation der Talsperren sowie einem 2d-Modell zur Berechnung von Überflutungsflächen übergeben.
In früheren Arbeitspaketen des AMICE-Projektes erstellte Klimaszenarien stellen dabei die Schlüssel-Eingabegrößen bei der Bewertung dar. Diese wurden aus bestehenden regionalen und nationalen Ergebnissen abgeleitet und beinhalten transnationale Szenarien sowohl für Hochwässer als auch für Niedrigwasserereignisse. Die Szenarien wurden für die Zeithorizonte 2021-2050 und 2071-2100 aufgestellt.
Im Rahmen des Vortrags werden Details zur Steuerstrategie, zu sozio-ökonomischen Implikationen und Ergebnisse der Gefährdungs- und Risikoanalyse vorgestellt.

Wasserbilanzkomponente Verdunstung: Schätzung der vernachlässigten Größe mittels Verwendung hochaufgelöster meteorologischer Inputdaten für Österreich

Mathew Herrnegger, Hans-Peter Nachtnebel

Ziel dieser Studie ist die Schätzung der aktuellen Evapotranspiration in räumlich verteilten Abflussmodellen in Abhängigkeit von verschiedenen Methoden zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. Die Ergebnisse der potentiellen Evapotranspirationsberechnungen zeigen beträchtliche Unterschiede zwischen ASCEPenman- Monteith und den temperaturbasierten Methoden nach Hargreaves bzw. Thornthwaite, wobei die Differenzen erwartungsgemäß mit der Höhe zunehmen. Je nach Berechnungsansatz ergeben sich in alpinen Lagen über 2000 m ü.a. Unterschiede von 170 - 400 mm/a.

Da sehr wenige Messungen der aktuellen Evapotranspiration existieren, ist man bei der Schätzung dieser Wasserbilanzkomponente auf Bodenfeuchte limitierte hydrologische Modelle angewiesen. Dazu benötigen hydrologische Modelle als Inputgröße Zeitreihen der potentiellen Evapotranspiration, um in Abhängigkeit von Modellsystemzuständen wie Bodenfeuchte die aktuelle Evapotranspiration zu berechnen. Für die Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration kommen unterschiedliche Ansätze zur Anwendung, die sich - neben den methodischen Grundlagen - im Wesentlichen durch die benötigten meteorologischen Inputparameter unterscheiden.

Im Rahmen dieser Studie werden Modelloutputs des INCA-Systems in einer hohen räumlichen (1 km²) und einer zeitlichen Auflösung von 60-min verwendet, um die potentielle Evapotranspiration für Österreich zu berechnen. In weiterer Folge werden diese berechneten Felder als Input für ein kontinuierliches, konzeptionelles Niederschlags-Abfluss Model verwendet, um die aktuelle Evapotranspiration zu berechnen. Für das gesamte österreichische Bundesgebiet ergibt sich für die Simulationsperiode 2007 - 2009 eine mittlere aktuelle Verdunstung von 511 mm nach ASCE-Penman-Monteith, 489 mm nach Hargreaves und 465 mm nach Thornthwaite. Im Vergleich zu den Ergebnissen der potentiellen Evapotranspiration sind die Unterschiede bei der aktuellen Evapotranspiration weniger stark ausgeprägt. Lokal und vor allem im alpinen Raum ergeben sich jedoch auch hier Differenzen zwischen ASCE-Penman-Monteith und Hargreaves bzw. Thornthwaite von 100 - 150 mm / Jahr.

Grundwasserneubildung im nordchinesischen Hai River Einzugsgebiet – Bodenhydrologische Messungen und datenbasierte Modellierungen auf verschiedenen Raumskalen

Tobias L. Hohenbrink, Uwe Schindler, Xiaoxin Li, Chuncheng Hu, Yuming Zhang, Gunnar Lischeid

Der Ackerbau im Einzugsgebiet des Hai River auf der Nordchinesischen Ebene trägt wesentlich zur Nahrungsmittelversorgung der wachsenden chinesischen Bevölkerung bei. In dem semiariden Gebiet werden unter Überstaubewässerung sehr hohe Winterweizen- und Maiserträge erzielt. Die intensive Grundwasserfördeung und Düngung hat in den letzten 35 Jahren in der Piedmont Plain Region zur Absenkung des Grundwasserspiegels von ca. 30 m und zu erhöhten Nitratkonzentrationen in den Aquiferen geführt. Im Rahmen eines länderübergreifenden Gemeinschaftsprojektes (NSCF und der DFG) sollen ressourcenschonende Bewirtschaftungsstrategien erarbeitet werden. Hierzu werden die Sickerwasserflüsse in tiefen Bodenschichten sowie die daran gekoppelte Verlagerung von Nitrat und weiteren Stoffen auf verschiedenen Raumskalen analysiert und modelliert.

Im Sommer und Herbst 2010 wurden auf der Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station sechs bodenhydrologische Messplots zur Erhebung von Langzeitdatenreihen der volumetrischen Bodenwassergehalte (FDR-Sonden) und Matrixpotenziale (Tensiometer) bis in eine Tiefe von 5 m eingerichtet. Des Weiteren wurden Saugkerzen installiert, um regelmäßig die Nitratkonzentrationen der Bodenlösungen bestimmen zu können. Zusätzlich zu den in situ Messungen werden im Labor anhand von ungestörten Bodenproben die bodenhydraulischen Eigenschaften der vorherrschenden Substrate bestimmt. Hierfür kommt ein Verdunstungsverfahren (HYPROP) mit erweitertem Messbereich (6500 hPa) zum Einsatz.

Aus den Messdaten der Bodenwassergehalte und Matrixpotenziale werden die transienten Sickerwasserflüsse auf der Plotskala mit einer simplen Darcy-Fluss Methode sowie einer inversen Modellierung auf Basis der Richardsgleichung abgeleitet. Mittels Zeitreihenanalyse (PCA) der Bodenwassergehalte und Sickerwasserraten werden strukturelle und funktionale Heterogenitäten auf der Feldskala quantifiziert. Auf Grundlage der so gewonnenen Informationen wird die Grundwasserneubildungsrate auf der Feldskala abgeschätzt.

Der Einfluss von Grundwasser bei der Regenwasserversickerung in der Siedlungsentwässerung

Nicole Jackisch, Markus Weiler

Die stetig zunehmende Versiegelung natürlicher Flächen durch Siedlungen und Infrastruktur verursacht vermehrten Oberflächenabfluss und reduziert die Grundwasserneubildung. Neben dem Entsorgungsproblem sollte der entstehende Oberflächenabfluss im Sinne einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Wasserbewirtschaftung möglichst ortsnah dem natürlichen Wasserkreislauf wieder zugeführt werden. Bei Neuerschließungen ist deshalb das Trennsystem mit Versickerung von Regenwasser mittlerweile Standard in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Neben einer Vielzahl von erhältlichen Systemen werden bei relativ schlecht durchlässigem Untergrund vor allem Mulden-Rigolen gebaut, welche das infiltrierende Wasser zunächst zwischenspeichern und allmählich an das Grundwasser abgeben. Dieses sollte laut DWA-A 138 mindestens 1m Abstand zur Versickerungsanlage haben. In der Realität sind jedoch oft stark schwankende Grundwasserspiegel anzutreffen. Zusammen mit häufig geringen Flurabständen, kann zumindest von einer temporären, direkten Interaktion von Grundwasser und Versickerungsanlagen (Rigoleneinstau) ausgegangen werden. Dies hat einerseits Auswirkungen auf die Sickerleistung der Anlage und andererseits kann dadurch die Grundwasserqualität beeinträchtigt werden, indem es zu einer Mobilisierung von bodengebundenen Schadstoffen kommt.

Unsere Studie analysiert die Interaktion zwischen Grundwasser und versickerndem Niederschlagswasser anhand hochaufgelöster Datenreihen im Stadtteil Vauban in Freiburg. Eine Fläche von ca. 16 ha wird seit Mitte der 90er Jahre über ein modifiziertes Trennsystem mit Regenwasserversickerung entwässert, welches aus einem System von Mulden-Rigolen mit Überlauf in den Vorfluter besteht. Die Grundwasser-Flurabstände sind gering und die Deckschichten nahezu undurchlässig. Über mehrere Monate wurden Grundwasserstände und Mulden- und Rigolenwasserstände mit bis zu 1-minütiger Auflösung innerhalb eines Messnetzes erfasst und ausgewertet. Diese Daten zeigen insbesondere die Relevanz von Grundwasserständen bei der Siedlungsentwässerung.

Durch zusätzliche Niederschlags- und Bodenfeuchtemessungen sind Aussagen zu den Bedingungen möglich, unter denen es zu einer direkten Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Mulden-Rigolen kommt, wodurch sich für die Praxis zukünftige Optimierungsmöglichkeiten für die Regenwasserversickerung ableiten lassen. Aber auch prinzipielle Aussagen sind möglich, z.B. inwieweit durch Versickerungsanlagen eine Gewährleistung der Qualität der natürlichen Ressource Grundwasser sichergestellt werden kann und unter welchen Bedingungen diese Systeme verbessert werden könnten.

Konservierung der Wasser- und Bodenressourcen in den Einzugsgebieten des Chetillano und Ronquillo in der nördlichen Sierra Perus

J. Krois, A. Schulte

Die nördliche Sierra Perus besitzt den Charakter eines tropischen Hochgebirges. Das Untersuchungsgebiet besteht aus dem Flusseinzugsgebiet des Chetillano (181 km²), welches das Andenhochland westwärts in den Pazifik entwässert und dem Flusseinzugsgebiet des Ronquillo (50 km²), welches in östliche Richtung über den Rio Marañón und den Amazonas in den Atlantik entwässert. Die beiden Einzugsgebiete grenzen in über 4.000 m.ü.M and der kontinentalen Wasserscheide Südamerikas aneinander.

Die in der Region stark saisonal ausgeprägten Niederschlagsverhältnisse und die ungesteuerte Landnutzung verursachen zahlreiche ökologisch-ökonomische Probleme. Die ausreichend zur Verfügung stehenden Wassermengen konzentrieren sich auf wenige Monate, wobei ein bedeutender Teil des Niederschlags ungehindert abfließt. Der hohe Anteil an Direktabfluss führt zu erheblicher Bodenerosion, die in unterschiedlicher Form und Dimension, von flächenhafter Erosion bis hin zu linearen Strukturen wie Rillen bis Gullies ein weit verbreitetes Landschaftselement darstellt. Die positive Rückkoppelung von Bodenerosion und dem gleichzeitigen Verlust der hydrologischen Speicherfunktion des Bodens stellt ein eklatantes Problem für die ökonomisch nachhaltige Entwicklung der ansässigen bäuerlich geprägten Bevölkerung dar, sowohl hinsichtlich der gesamtjährigen Wasserverfügbarkeit als auch hinsichtlich der landwirtschaftlichen Erträge.

Um der fortschreitenden Degradation des Landschaftsraumes entgegenzuwirken, wurden im Rahmen des von der Hans-Sauer-Stiftung geförderten Forschungsprojektes Conservación del Agua y del Suelo en las CUencas de Chetillano y Ronquillo en la Sierra norte del Perú (CASCUS) Maßnahmen zum dezentralen Wasserrückhalt und Bodenschutz wie z.B. Landnutzungsänderungen oder die Implementierung von Water-Harvesting-Systemen (WHS) und deren Einfluss auf der hydrologische Prozessgeschehen untersucht. Ziel ist es, Handlungsanweisungen und Handlungskonzepte zu formulieren und deren hydrologische Wirkung auf das gesamte Flusseinzugsgebiet zu quantifizieren.

Hierfür wurden unter Verwendung einer computergestützten Niederschlag-Abfluss- Simulation Teilflächen mit hohem Oberflächenabfluss identifiziert und bausteinartig Maßnahmen zum dezentralen Wasserrückhalt und Bodenschutz in das Modell implementiert, so dass verschiedene Szenarien mit modular zu kombinierenden Maßnahmenpaketen in ihrer Wirkung quantifiziert werden konnten.

Die Water Science Alliance als Instrument zur Bündelung und Stärkung der deutschen Wasserforschung

Elisabeth Krüger

Das Thema *Wasser* steht im Mittelpunkt zahlreicher wichtiger Forschungsfragen in der Umweltforschung. In Deutschland und Europa existiert eine breite wissenschaftliche Expertise auf sehr vielen Gebieten der Wasserforschung mit einem entsprechend breiten Ausbildungsangebot. Eine Online-Analyse der deutschen Wasserforschungslandschaft gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat ergeben, dass die öffentliche Finanzierung der Wasserforschung in insgesamt ca. 150 unabhängig agierende Forschungseinrichtungen (Universitäten und außeruniversitäre Einrichtungen) fließt. Die Ergebnisse dieser Studie werden online unter www.watersciencealliance.org/online-portal verfügbar gemacht.

Die Fragmentierung der Wasserforschungslandschaft führt dazu, dass die entwickelten Lösungen disziplinär geprägt sind. Dabei steht die Wissenschaft einem sich immer schneller wandelnden Gesellschafts- und Umweltsystem gegenüber, das eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen der Wasserforschung erfordert.

Die ***Water Science Alliance*** hat zum Ziel, existierende Kompetenzen in unterschiedlichen Institutionen und Disziplinen zu bündeln und dadurch die deutsche Wasserforschung im nationalen wie im internationalen Kontext zu stärken und besser zu positionieren. Durch die gezielte Förderung der Forschungsaktivitäten, die verschiedene Disziplinen und Forschungskonzepte miteinander verknüpft, schafft die Water Science Alliance Synergien zwischen den unterschiedlichen Kompetenzen verschiedener Forschergruppen. Darüber hinaus verfolgt die Water Science Alliance folgende Ziele:

- Schaffung eines langfristigen Rahmens und effizienter Strukturen für integrierte Forschung
- Schaffung kritischer Masse zur Bearbeitung komplexer Probleme
- Förderung von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Technologietransfer (national und international)
- Plattform für strategische Kooperationen mit führenden nationalen und internationalen Partnern

Grundlage zur Erreichung dieser Ziele ist die thematische Bündelung der Kompetenzen der Wasserforschung. Dazu wurde 2010 im Rahmen eines Agendaprozesses und der 1st Water Research Horizon Conference das *White Paper* der Water Science Alliance entwickelt. In diesem Papier haben sich über 200 Akteure der deutschen Wasserforschungslandschaft (dazu gehört eine Bandbreite von Forschungseinrichtungen und Wissensgesellschaften sowie BMBF, BMU, DFG, UBA, BGR, BfG) über prioritäre Themenbereiche abgestimmt, die aus Sicht der Wissenschaft als die großen Herausforderungen angesehen werden (Download des White Papers und weitere Informationen zur Water Science Alliance unter: www.watersciencealliance.de).

Experimentell gestützte Verdunstungsmodellierung auf Moor-standorten im Rahmen des deutschlandweiten Verbundprojektes „Organische Böden“

Susanne Liske, Enrico Frahm, Annette Freibauer

Innerhalb des deutschen Inventars der Treibhausgasemissionen stellen gedränte Moore mit einem Anteil von 2-5% die größte Einzelquelle außerhalb des Energiesektors dar. Um die erhöhten Anforderungen für die Klimaberichterstattung gemäß IPCC-Guidelines erfüllen zu können wurde im Januar 2009 das Verbundprojekt „organische Böden“ gestartet, das die Ermittlung aller für eine vollständige und konsistente Klimaberichterstattung erforderlichen Aktivitätsdaten, Emissionsfaktoren und Verfahren zum Ziel hat. An deutschlandweit 16 Testgebieten mit über 60 Standortvarianten steht die experimentelle Ermittlung standortbezogener Emissionsfaktoren für die Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O im Fokus der Untersuchungen. Für Böden organischen Ursprungs ist in diesem Zusammenhang die Dynamik des Grundwasserflurabstands eine der zentralen Steuergrößen, welche ihrerseits maßgeblich durch die Verdunstung beeinflusst wird. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich ein Teilprojekt mit der experimentell gestützten Modellierung der standortspezifischen Verdunstung. Ziel der Untersuchung ist eine Einschätzung bestehender Verfahren und Modellansätze hinsichtlich ihrer Eignung und Anwendbarkeit auf Feuchtgebietsstandorte.

Die Grundlage der Untersuchung bildet ein in allen Testgebieten durchgeführtes intensives hydrometeorologisches Monitoring. Seit dem Frühjahr 2010 werden basierend auf einem einheitlichen Messkonzept langfristig hochaufgelöste Daten erfasst. Dazu gehört ein dichtes Netz an Grundwasserbeobachtungsstellen, das durch den Einsatz weiterer Messgeräte wie TDR-Sonden, Tensiometer und standorteigene Klimastationen ergänzt wird. Darüber hinaus werden für ausgewählte Testgebiete Eddy-Kovarianz-Messungen durchgeführt. Das Projekt zeichnet sich damit durch eine einzigartige Verfügbarkeit an hydrometeorologischen Informationen für Hoch- und Niedermoorstandorte aus.

An dieser Stelle wird das Mess- und Modellierungskonzept vorgestellt. Dabei stehen Methoden basierend auf den täglichen Schwankungen des Grundwasserflurabstands sowie dem Penman-Monteith-Ansatz im Vordergrund. Eine Validierung erfolgt anhand der zur Verfügung stehenden Eddy-Kovarianz-Messungen.

Sensitivität der Wasserverfügbarkeit in Zentralasien hinsichtlich der Nutzung verschiedener Klimadatensätze insbesondere der Eingangskomponente Niederschlag

Marcus Malsy, Frank Voß, Tim aus der Beek

Klimamodelle zeigen eine erhebliche globale Veränderung des Niederschlags auf. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Variabilität als auch auf die Quantität. Damit verbunden sind große Auswirkun-gen auf den terrestrischen Wasserkreislauf zu erwarten. Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die Unsicherheiten der Eingangsgröße Niederschlag in Bezug auf den Wasserkreislauf aufzuzeigen und die Auswirkungen in den Ergebnissen globaler hydrologischer Modelle darzustellen. Hierfür wurde Zentralasien als Untersuchungsgebiet ausgewählt, da aride und semiaride Gebiete mit geringen mittleren jährlichen Niederschlägen eine hohe Sensitivität gegenüber Änderungen des Niederschlags besitzen. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde zur Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs das globale, integrierte, hydrologische Modell WaterGAP 3 (Water-Global Assessment and Prognosis) eingesetzt.

Als Input stehen verschiedene globale und regionale Klimadatensätze zur Verfügung. Hierbei dient der regionale Aphrodite Datensatz als Referenz, der tägliche Werte für Asien in einer Auflösung von 0,25° liefert. Verglichen wird dieser mit den globalen Datensätzen der Climate Research Unit (CRU), des Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) sowie des Water and Global Change Projects (WATCH). Zusätzlich wird außerdem der Datensatz des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) verwendet. Dieser basiert jedoch im Gegensatz zu den anderen nicht auf gemessenen Werten, sondern beinhaltet modellierte Werte aus Vorhersagemodellen. Die räumliche Auflösung der globalen Datensätze beträgt 0,5°und wird auf die Modellauflösung von 5 Bogenminuten reskaliert.

In einem ersten Schritt wird unter Zuhilfenahme der Referenzzeitreihe 1971-2000 der Niederschlag aus Aphrodite in Zentralasien dargestellt und den Zeitreihen der globalen Datensätzen gegenübergestellt. Im Anschluss werden die Effekte der unterschiedlichen Niederschlagsdatensätze auf die Hydrologie untersucht. Es kann gezeigt werden, dass die Wahl des Klimadatensatzes eine wichtige Unsicherheitsquelle hinsichtlich der regionalen Wasserverfügbarkeit in Zentralasien darstellt. Deutliche Unterschiede lassen sich hierbei im Besonderen zwischen den gemessenen Daten und dem aus der Wettervorhersage stammenden ECMWF-Datensatz feststellen, der die Wasserver-fügbarkeit überschätzt.

Die Wasserbeschaffenheit der Elbe bei extremem Hochwasser - eine Zeitreise

Daniel Schwandt, Gerd Hübner, Evelyn Claus

Seit Ende des 19. Jahrhunderts existieren Messreihen bzw. Messprogramme zur Wasserbeschaffenheit der Elbe, deren Ergebnisse auch Aussagen zur Wasserbeschaffenheit bei extremen Hochwasserereignissen zulassen. Für ausgewählte Ereignisse werden Veranlassung, Hintergrund und Methoden der Untersuchung dargestellt.
Im Laufe der Zeit wurden immer wieder neue Stoffe bzw. Stoffgruppen in die Messprogramme aufgenommen. Anhand einiger auch heute noch gemessener chemischphysikalischer Parameter ist ein langfristiger Vergleich der Wasserbeschaffenheit bei extremen Hochwasserereignissen möglich. Dieser Vergleich muss vor dem Hintergrund der jeweiligen Grundbelastung interpretiert werden und erfolgt exemplarisch für ausgewählte Abschnitte der Elbe.
Aufbauend auf Erfahrungen aus vergangenen Hoch- und Niedrigwasserereignissen wurde im Rahmen der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) ein Messprogramm für hydrologische Extremereignisse (Hochwasser / Niedrigwasser) aufgestellt. Es beruht auf einer zwischen den Partnern abgestimmten, nach einheitlichen Grundsätzen durchzuführenden Beprobung, Auswertung und Präsentation der Ergebnisse. Die Probenahme bei Hochwasserereignissen orientiert sich an den Phasen einer Hochwasserwelle (ansteigend, Scheitel, fallend), die in unterschiedlichen Zeitintervallen an ausgewählten Messstellen beprobt werden. Grundzüge des Messprogramms und erste Erfahrungen mit der Probenahmestrategie werden mitgeteilt.

Der Einsatz horizontaler Doppler Strömungsmessgeräte für die kontinuierliche Ermittlung bewirtschaftungsrelevanter Durchflüsse in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

Stefan Siedschlag, Cornelia Lauschke

Eine effiziente Bewirtschaftung der verfügbaren Wasserressourcen ist ohne die Bereitstellung zeitnaher und qualitativ hochwertiger Messdaten nicht möglich. Es gilt der Grundsatz, was man nicht misst das kann man nicht bewirtschaften. Die zur Durchflussmessung verfügbare Gerätetechnik erstreckt sich vom traditionellen mechanischen Messflügel bis hin zu modernen akustischen Doppler-Sensoren. Neben den mobilen Geräten zur Durchführung von Spotmessungen (z.B. ADCP/ADC) werden zunehmend auch kontinuierlich messende Sensoren eingesetzt, um den Durchfluss in Flüssen und Kanälen online zu überwachen und bewirtschaftungsrelevante Entscheidungen auf der Basis gemessener Daten zu fällen.
An einer Uferseite montiert senden akustische Doppler Ultraschallsignale horizontal ins Gewässer aus und gewinnen die Geschwindigkeitsinformation aus der Frequenzverschiebung der von den Partikeln in der Strömung erzeugten Echosignale. Dabei können je nach verwendeter Wandlerfrequenz unterschiedliche Reichweiten erzielt werden. Auf der Basis des Geschwindigkeits-Index-Verfahrens werden anschließend die Durchflüsse berechnet, gespeichert und übertragen.
Der Anwendungsbereich von horizontalen Doppler-Strömungssensoren erstreckt sich von der klassischen hydrologischen Messstation bis hin zum Online Durchflussmonitoring in Betriebskanälen von Kraftwerken. Die Geräte ergänzen in idealer Weise die industriell seit Jahrzehnten verwendeten klassischen Ultraschall-Laufzeit-Systeme und überzeugen diesen gegenüber durch:

- außerordentlich geringen und kosteneffizienten Installationsaufwand
- einfache Planung und Montage
- sicheren und wartungsarmen Messbetrieb
- zuverlässige Geschwindigkeitsmessung auch unter erschwerten Messbedingungen (z.B. im Hochwasserfall, bei hohem Schwebstoffanteil, bei stark schwankenden Abflüssen)

Erfahrungen mit dem Betrieb von horizontalen Doppler Durchflussmessanlagen und die Verwendung der Messdaten für Bewirtschaftungszwecke in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung werden am Beispiel ausgewählter Messstationen in Brandenburger Gewässern vorgestellt.

Wasserwirtschaftliche Anpassungsmöglichkeiten zur Minderung von Wassermangelsituationen in kleinen Einzugsgebieten

Björn Thomas, Jörg Steidl, Ottfried Dietrich, Gunnar Lischeid

Als Folge einer projizierten Klimaänderung, mit ganzjährig erhöhten Mitteltemperaturen und Umverteilung der Niederschläge von den Sommer- in die Wintermonate, sowie Änderungen der Intensivierung der anthropogenen Wassernutzung ist in vielen kleinen Einzugsgebieten zunehmend mit Wassermangelsituationen zu rechnen. Besonders wird der Nordosten Deutschlands davon betroffen sein. Dort sind schon heute die Sommerabflüsse und die Grundwasserneubildung gering. Selbst kleine Änderungen im Niederschlag und der Verdunstung können daher erhebliche Auswirkung auf die hydrologischen Verhältnisse haben. Um Wassernutzungskonflikte abwenden zu können, ist die Entwicklung und Erprobung von Wasserrückhaltemaßnahmen und Wassermanagementoptionen ein Kernpunkt der hydrologischen Klimaanpassungsforschung.

Ergebnisse einer Literaturrecherche zeigen eine Vielzahl möglicher Anpassungsstrategien zur Erhöhung von Niedrigwasserabflüssen, ergaben aber auch einen erheblichen Forschungsbedarf beim Transfer solcher Maßnahmen auf die Skala kleiner Einzugsgebiete Deutschlands. Im Ergebnis der Recherche ließen sich ebenso mögliche Effekte einzelner Strategien und Maßnahmen bewerten. Diese Ergebnisse werden präsentiert und dienen als Grundlage der Entwicklung eines Konzeptes, um den möglichen Einfluss geeigneter Wasserspeicherelemente auf den künftigen Wasserhaushalt kleinerer Einzugsgebiete Brandenburgs abzuschätzen zu können. Einige erste Messungen und Auswertungen von Wasserbilanzgrößen an ausgewählten Wasserspeicherelementen in Brandenburg belegen bereits die Machbarkeit einer kurzfristigen Wasserspeicherung in kleinen Einzugsgebieten.

Mit Hilfe des konzeptionellen Modells HBV sollen verfügbare Abflussdaten kleiner Einzugsgebiete Brandenburgs in die Zukunft projiziert werden, um Wassermangelsituationen definieren zu können. Unter Berücksichtigung der Wasserbilanzen an den Monitoringstandorten und den generierten Abflusszeitreihen sollen verallgemeinerte Planungsgrundlagen für die Praxis abgeleitet werden. Erste Modellierungsergebnisse werden vorgestellt und die Anwendbarkeit von einfachen konzeptionellen Modellen für die Klimaanpassungsforschung wird diskutiert.

Feststoffkennwerte als harmonisierungsbedürftige Umweltqualitätsnormen mineralischer Feinböden und -sedimente nach ausgewählten nationalen Fachrechtsnormen

Hans-Jürgen Ulonska

Auf der Basis europarechtlicher Vorgaben wird auf europäischer Ebene für Feststoffkennwerte als harmonisierungsbedürftige Umweltqualitätsnormen Prüfungsbedarf beim Vollzug des Boden- und Wasserrechtes geltend gemacht. Zu den wesentlichen Prüfungsgrundlagen, insbesondere für feststoffbezogene Bodenqualitätsnormen (z.B. Werte für Schwermetallund Nährstoffgehalte) in mineralischen Feinböden und -sedimenten zählt zweifelsfrei die Textur. Daraus hervorgehende justitiable Bodenarten (Texturklassen), die als eindeutige Kriterien mit ausgewählten Partikeldichten, pH- Werten und Humusgehalten korrespondieren, sind Grundvoraussetzung für statistisch belastbare Ermittlungen bestimmter Zielgrößen.
Partikelfraktionierungen haben Einfluß auf die Zielgröße feststoffbezogener Schwermetallgehalte mineralischer Feinböden und -sedimente. In Beziehung zu bodenfunktions-, fachrechtsund nutzungsartenübergreifenden Texturklassen werden auf dieser Basis vollzugsfreundliche Lösungsvorschläge für ausgewählte Bodenqualitätsnormen unterbreitet. In Abhängigkeit von Spannbreiten annähernd normal verteilter Korngrößenfraktionsanteile wird als Rahmenvorgabe vorgeschlagen, Bodenqualitätsnormen Wertebereiche statt Einzelwerte nach bestimmten Texturklassen zuzuordnen.
Der Bedarf einer Bestandsaufnahme ausgewählter validierter Primärparameter für statistische Ableitungen besteht. Daraus sind justitiable Texturklassen ableitbar, um zukünftig auf dieser Basis z.B. belastbare Aussagen zu ökotoxikologischen Risiken bestimmter Feststoffgehalte von Schwermetallen im Verlauf ökologischen Katastrophenfälle (2000 in Rumänien und 2010 in Ungarn) treffen zu können.

Bestimmung von Rauigkeitsparametern für 2D hydrodynamische Simulationen auf Basis von Airborne Laser Scanning Daten

Michael Vetter, Christine Gschöpf, Günter Blöschl, Wolfgang Wagner

Zwei-dimensionale hydraulische Modelle sind ein wichtiges Werkzeug zur Beschreibung von hydrodynamischen Prozessen von Oberflächengewässern und Überflutungsflächen. Die numerischen Modelle dienen dabei der flächendetaillierten Simulation von Wasserspiegellagen, Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen. Die Modellrechnungen finden vielfältige Anwendung bei der Untersuchung und Planung von wasserbaulichen Maßnahmen sowie beim Flussgebietsmanagement. Sie können aber auch zum besseren Verständnis ökologischer Prozesse in Fließgewässern und Augebieten genutzt werden. Wichtige Datengrundlagen bilden unter anderem Geländemodelle und Vegetations- und Landnutzungskarten, die zur Abschätzung von Geländerauigkeiten herangezogen werden. Die Geländemodelle beruhen bereits vermehrt auf hochauflösenden Airborne Laser Scanning (ALS) Daten, während bei der Bestimmung von Rauigkeitsparametern vorwiegend auf herkömmliche Methoden, wie beispielsweise Feldbegehungen und die Analyse von Luftbildern, zurückgegriffen wird.

In der vorliegenden Studie wird ein Ansatz zur direkten Ableitung von Rauigkeitsparametern aus der ALS Punktwolke vorgestellt. Die Vorteile dieser Methode werden anhand von Sensitivitätsanalysen zwei-dimensionaler hydraulischer Simulationen diskutiert. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen bereits bestehender Modelle verglichen, die auf herkömmlich abgeleiteten Rauigkeitsparametern beruhen.

Die vorgestellte Methode basiert auf der Analyse von ALS Punktwolken Parametern. Wobei verschiedene Parameter, unter anderem Punktdichte, vertikale Struktur der Punkte, Echobreite und Intensität, berechnet und analysiert werden. Durch verschiedene Analysen werden aussagekräftigste Attribute für eine Rauigkeitsbestimmung bestimmt und in eine regelbasierte Klassifikation übertragen. Anhand der wichtigsten Parametern werden direkt aus der ALS Punktwolke Rauigkeitsparameter errechnet, die dann in die hydraulischen Modelle Eingang finden. Ein Vergleich der Modellergebnisse, basierend auf traditionell erstellten und ALS basierten Rauigkeitsparameteren, soll den Mehrwert dieser Methode unterstreichen.

Gekoppelte statistische Hochwasseranalyse im regionalen Verbund am Beispiel von Sachsens Flüssen

Michael Wagner, Robert Schwarze

Für Bemessungsaufgaben sind statistische Angaben zum Hochwasserregime von Fließgewässern unabdingbar. Meistens wird das Hochwasserregime lokal an einzelnen Standorten im Flusssystem ausgewertet. Diese Ergebnisse lassen dann häufig eine genügende genetische und regionale Plausibilität vermissen. Es wird hier eine Methodologie vorgestellt, wie die Vielzahl von verfügbaren quantifizierbaren aber auch nicht quantifizierbaren Informationen (neben beobachtetem Niederschlag und Durchfluss u.a. Angaben zu Hochwasserereignissen aus Archiven sowie Klassifikationen der Wetterlage) integral zur statistischen Analyse genutzt werden kann. In der einschlägigen Literatur wird die Einbeziehung kausaler, zeitlicher und räumlicher Zusatzinformationen propagiert. Die kausale Informationserweiterung wird durch tägliche Niederschlagsdaten sowie maximierte Gebietsniederschläge (MGN) gewährleistet. Historische Hochwasser und Niederschlagsdaten können der zeitlichen Informationserweiterung zugeordnet werden. Die regionale Informationsausschöpfung umfasst kleinräumige archivarisch ermittelte Ereignisse, welche häufig nicht an Pegeln registriert wurden, sowie die Regionalisierung der vorhandenen Daten, sofern das möglich ist. Die Auswertung der Daten erfolgt nicht nur pegelbezogen sondern im regionalen Verbund durch Festlegung regionaler Referenzpegel und die stochastische Übertragung von Merkmalen ihrer Hochwasserereignisse auf unbeobachtete benachbarte Einzugsgebiete. Gerade dieser Aspekt gewährleistet die integrale Betrachtung aller Zusatzinformationen.

Ausgehend von den Ansätzen der gekoppelten Niederschlag-Abfluss-Statistik GRADEX und AGREGEE wurde ein neues, erweitertes Verfahren entwickelt. Dieses basiert auf der differentiellen Approximation des Scheitelabflussbeiwertes an den maximalen lokalen Scheitelabflussbeiwert. Durch die Nutzung einer Verteilungsfunktion des Niederschlages mit oberem Grenzwert (bis zum MGN) ist es möglich, eine plausiblere Darstellung von Hochwasserdurchflüssen bis hin zum BHQ_2 (HQ_{10000}) für Stauanlagen zu erreichen. Durch die regionale Anwendung des Verfahrens wird ein größtmögliches Maß an Plausibilität erreicht. Es können einerseits lokale Charakteristiken begründet, andererseits aber auch lokale Fehler, wie sie z.B. aus fehlerhaften Durchflussmesswerten herrühren, identifiziert werden.

Die vorgestellte Methodologie wird am Beispiel der Flüsse in Sachsen dargestellt. Deren einzelne Bestandteile werden anhand von Beispielen erläutert sowie regionale und lokale Aspekte beleuchtet. Als Ergebnis liegen stochastisch regionalisierte Scheiteldurchflüsse verschiedener Wahrscheinlichkeiten nahezu flächendeckend für Sachsen vor. Im zweiten Schritt wird das stochastische Verfahren mit einer deterministischen Niederschlag-Abfluss- Modellierung gekoppelt. Diese Erweiterung befindet sich für Teile Sachsens in der Umsetzung.

Lagestabiles Totholz als Instrument des dezentralen Hochwasser-rückhaltes - Ergebnisse von Freilanduntersuchungen im Erzgebirge

Robert Wenzel, Achim Schulte, Jens Bölscher, Christian Reinhardt

Totholz ist ein natürlicher Bestandteil von Fließgewässern. Zur Vorbeugung von Hochwasserschäden durch verdriftendes Totholz wird dieses im Rahmen der Unterhaltungsmaßnahmen aus den Fließgewässern beräumt. Eine Beschleunigung der Fließvorgänge und dadurch verstärkte Erosion sind die Folge. Die Auswirkungen von im Gerinne belassenem Totholz auf den Ablauf von Hochwasserwellen sind hingegen nicht hinreichend bekannt. Das vorgestellte Projekt zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen, die die Rolle von Totholz als Widerstandselement im Gerinne betrachten.

Zur Versuchsdurchführung wurden künstlich erzeugte Hochwasser durch eine 282 m lange Teststrecke geleitet. Die Versuchsstrecke, ein Bachabschnitt des Ullersdorfer Teichbächels im mittleren Erzgebirge, wurde mit verschiedenen Setups von Totholzinstallationen ausgestattet und mit einem Abfluss von bis zu 180 l/s ($HQ_{3,5}$) beaufschlagt. Die Auswirkungen des Totholzes auf den Hochwasserabfluss in diesem Gewässer erster Ordnung wurden mittels zweier zeitlich hoch aufgelöst erfassender Messwehre ermittelt. So konnte weitgehend unabhängig von meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen eine Vielzahl von gleichartigen Versuchen mit und ohne Totholz durchgeführt werden, die eine ausgezeichnete Vergleichbarkeit der Abflussganglinien ermöglichte.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Fließgeschwindigkeit und eine ausgeprägte Verlagerung der Abflussfülle aus hohen in niedrige Abflusswerte. Gleichzeitig führt der Aufstau im Oberwasser der Tothölzer zu einer verstärkten Auffüllung des hyporheischen Interstitials. Dies bewirkt eine Aufhöhung des Trockenwetterabflusses. Totholz kann nach diesen Erkenntnissen als Baustein des dezentralen Hochwasserschutzes, insbesondere in Gewässerabschnitten, bei denen andere Maßnahmen nicht wirtschaftlich umsetzbar sind, einen Beitrag zum Wasser- und Hochwasserrückhalt leisten.

Distribution of phytoplankton in a German lowland river, in relation to environmental factors

Naicheng Wu, Britta Schmalz, Nicola Fohrer

The response of phytoplankton to abiotic factors in the surrounding environment has become a central topic of present researches, and identification of the main factors controlling phytoplankton in a particular water body is essential for choosing an appropriate management strategy for the maintenance of a desired ecosystem state.
However, the species composition and community structure of phytoplankton in lotic habitats are still poorly understood in comparison to lentic systems. We investigated the spatial and temporal dynamics of a phytoplankton community in a German lowland river- the Kielstau catchment, and the relationships with environmental variables. Among the 125 taxa observed, Desmodesmus communis, Pediastrum duplex and Discostella steligera were dominant species at lentic sites while Tabellaria flocculosa, Euglena sp., Planothidium lanceolatum, Cocconeis placentula and Fragilaria biceps dominated at lotic sites. Remarkable spatial and temporal variations of phytoplankton community were revealed by non-metric multidimensional scaling (NMDS). Canonical correspondence analysis (CCA) indicated that physical factors (e.g. hydrological variables) and major nutrients (e.g. total phosphorus, dissolved inorganic nitrogen) were of equal importance controlling the variation in structure of riverine phytoplankton assemblages. Weighted averaging regression (WA) and cross-calibration produced strong models for predicting DIN, WT and TSS, which enabled selection of algal taxa as potentially sensitive indicators: for DIN, Ulnaria ulna var. acus, Ulnaria ulna, Desmodesmus communis and Euglena sp.; for WT: Discostella steligera, Scenedesmus dimorphus, Desmodesmus communis and Euglena sp.; for TSS, Nitzschia sigmoidea, Desmodesmus communis and Oscillatoria sp.
The results from this relatively small survey indicate the need of further monitoring to gain a better understanding of riverine phytoplankton and capitalize on the environmental indicator capacity of phytoplankton community. Besides, our results may supply useful basic data for phytoplankton based bio-assessment in lowland areas (e.g. Q index, Chlorophyte-Index, Pennales-Index), which are not as well developed as those of benthic diatom, macroinvertebrate and fish.

Mesoskalige Modellierung der Bodenfeuchte im Raum Deutschland

Matthias Zink, Luis Samaniego, Sabine Attinger

Die Bodenfeuchte hat einen signifikanten Einfluss auf Wasserhaushaltprozesse sowie auf die Interaktion zwischen Atmosphäre und Biosphäre / Pedosphäre. Daher sind Bodenfeuchtedaten u.a. für die landwirtschaftliche Planung oder die Initialisierung von Klimamodellen von großer Bedeutung. Auch eine Validierung von Satellitendaten (z.B. SMOS - Soil Moisture and Ocean Salinity (ESA)) wäre mit hochauflösenden, flächendeckenden Bodenfeuchtedaten möglich. Eine Möglichkeit diese zu ermitteln stellt dabei die hydrologische Modellierung dar. Jedoch zeigen derzeit existierende hydrologische Modelle Defizite in der Parametrisierung und der Beachtung räumlicher Variabilitäten der physiographischen Eingangsgrößen auf.

Mit Hilfe des am Helmholtz Zentrum für Umweltforschung entwickelten mesoskaligen hydrologischen Modells mHM (SAMANIEGO et al. 2010) wurde eine Wasser-haushaltssimulation für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland BRD durchgeführt. Die im mHM eingeführte Technik der multiskaligen Parameterregionalisierung (Samaniego, 2010) gleicht die oben genannten Defizite aus und ermöglicht eine stabile Simulation von Wasserhaushaltsprozessen auf der Mesoskala. Für die Simulation wurden flächendeckend meteorologische Daten für das gesamte Bundesgebiet aufbereitet und interpoliert. Als meteorologische Modelleingangsdaten dienten Niederschlag, Maximum-, Minimum- sowie Durchschnittstemperatur mit einer räumlichen Auflösung von 4 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag innerhalb der Zeitspanne von 1950-2009. Weiterhin wurden morphologische Daten in einer räumlichen Auflösung von 100 m als Eingangsdaten verwendet. Für die Simulation erfolgte eine Aufteilung der BRD in die großen Flusseinzugsgebiete Rhein, Donau, Elbe, Weser, Ems und Oder.

Die Simulationsergebnisse zeigen zufriedenstellende Ergebnisse. Zum Beispiel ist die simulierte Bodenfeuchte signifikant mit der Landoberflächentemperatur von MODIS invers korreliert. Auch eine Übertragung der regionalisierten Modellparameter zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten ist möglich, wobei Nash-Sutcliffe Effizienzen zwischen 0,6 und 0,9 erreicht werden. Ein Vergleich der simulierten Bodenfeuchten mit verschiedenen Fernerkundungsdaten ist durchgeführt worden.

Literatur:

SAMANIEGO, L, R. KUMAR, S., ATTINGER (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. Water Resources Research. 2010;46(5):W05523.

Posterbeiträge zum Thema 4:
Flussgebietsmanagement: Konzepte und Umsetzung

Anpassung des Wassermanagements in der Nordseeküsten-Region an den Klimawandel: Von Pilotstudien zu Handlungsempfehlungen

Helge Bormann, Frank Ahlhorn, Ruben Akkermans, Yvonne Andersson-Sköld, Thomas Klenke

Im Rahmen des EU-Interreg VIb Projekts „Climate Proof Areas“ arbeiten seit 2008 Arbeitsgruppen aus fünf Nordseeländern (Niederlande, Großbritannien, Belgien, Schweden, Deutschland) an der Entwicklung von Anpassungsstrategien des Wassermanagements von Küstenregionen an den Klimawandel. Die Analysen haben ergeben, dass sich bestehende Probleme des Wassermanagements in Zukunft durch den Klimawandel noch verschärfen werden und dass es notwendig ist, Anpassungsstrategien zu entwickeln und umzusetzen. Anhand von regionalen Pilotstudien haben die Projektpartner zusammen mit regionalen Akteuren mögliche Anpassungsstrategien und Anpassungsmaßnahmen entwickelt und intensiv diskutiert. Von den Ergebnissen der Pilotstudien wurden in der Folge Empfehlungen für die Politik abgeleitet sowie ein Toolkit zusammengestellt, das hilfreiche Instrumente für einen Klimaanpassungsprozess enthält, beschreibt und deren jeweilige Vor- und Nachteile analysiert.

Dieser Beitrag fasst ausgewählte Ergebnisse der Pilotgebiete hinsichtlich des Entwicklungsprozesses einer Anpassungsstrategie sowie der regional spezifischen Anpassungsoptionen zusammen und stellt die zwei zentrale, im Rahmen des ‚*Climate Proof Areas*’ Projektes erarbeitete Produkte vor:

1. das ‚*Memorandum of Understanding*’, das die zentralen Politik-Empfehlungen hinsichtlich der Anpassung der Wasserwirtschaft im Nordseeraum an den Klimawandel enthält, sowie
2. das ‚*Toolkit*’, das für die verschiedenen Schritte des Problemlösungs-Zyklus (Problemdefinition, Impakt-Analyse, Identifizierung von Lösungsansätzen, Auswahl einer geeigneten Strategie, Implementierung, Monitoring) innovative und illustrative, teils klimafolgenspezifische Beispiele hilfreicher Instrumente für einen Klimaanpassungsprozess enthält.

Stakeholder participation in water resource management: categorisation and evaluation of approaches

Gemma Carr, Günter Blöschl, Daniel P. Loucks

The involvement of stakeholders and communities in water resource management is advocated for many reasons including ideological (democratic principles) and functional (harnesses social capital to identify problems and solutions, facilities implementation of strategies, and achieves compromises). This paper reviews cases in the literature where participation has been used as a mechanism to enhance water resource management. The approaches used to “do” participation have been categorised according to the extent to which they address one of three processes: information exchange, consensus building and active involvement. Categorisation according to process also results in groupings that broadly reflect the intensity of the approach. Intensity is used to describe the capacity of the approach to encourage participants to think about and question their positions, views, situations and objectives. Such processes have been described in the literature as essential for developing alternative resource management strategies. An evaluation of approaches has been conducted, based on the participation literature. This reveals that for cases where a clearly defined resource management challenge can be identified, a multi-approach strategy which incorporates a variety of approaches from each categorisation stage in a step-wise fashion, leads to “successful” participation. Successful participation, in this case, is defined as a positive response from the participants with regards to the programme and its outcomes.

Entwicklung eines hydrologischen Messnetzes als Grundlage zur Verbesserung der Wasserregulierung in einem Feuchtgebiet

Marcus Fahle, Ottfried Dietrich, Gunnar Lischeid

Die Wasserbewirtschaftung in landwirtschaftlich genutzten Niederungsgebieten ist durch eine Vielzahl interagierender Gräben in Verbindung mit sehr geringem Gefälle und hoher Komplexität gekennzeichnet. Die in den 1970er und 1980er Jahren komplexmeliorierten und anschließend zentral regulierten Feuchtgebiete in Ostdeutschland unterliegen heutzutage größtenteils einer auf minimalen Aufwand ausgerichteten Steuerung der wasserwirtschaftlichen Regulierungssysteme. Daraus resultieren zumindest temporale Probleme sowohl hinsichtlich Vernässung als auch der Wasserversorgung bei anhaltender Trockenheit in Teilflächen der Gebiete. Es wird angenommen, dass sich diese durch die Rezentralisierung der Regulierung unter Verwendung von Bewirtschaftungsmodellen vermindern lassen. Grundvoraussetzung für den Aufbau entsprechender Modelle ist gleichwohl die Erarbeitung eines Messkonzeptes, welches den Systemzustand des entsprechenden Gebietes in ausreichender Weise charakterisiert.

Das zu untersuchende Teilgebiet im südlichen Oberspreewald ist stark landwirtschaftlich geprägt, wobei drei Viertel der Fläche als Grünland genutzt werden, hinzukommen Ackerland und Waldflächen. Das Grabensystem verfügt neben einer Vielzahl von Regulierungsbauwerken über zwei Schöpfwerke. An Messdaten stehen bisher nur manuelle, im Abstand von mehreren Tagen durchgeführte Ablesungen von Fließgewässerpegeln zur Verfügung.

Für die Entwicklung des Messkonzeptes wird auf die Bestandsdaten der vorhandenen wasserwirtschaftlichen Anlagen, auf Boden- und Landnutzungskarten inklusive eines digitalen Geländemodells zurückgegriffen. Aus diesen wird abgeleitet, welche Gewässer für die Ent- und Bewässerung sowie die Wasserverteilung im Teilgebiet maßgebend sind und welche Bereiche hydrologisch gleich reagierende und einheitlich zu steuernde Flächen repräsentieren können. Es folgt eine Unterscheidung, wo eine hohe zeitliche Auflösung der Datenerfassung und Datenbereitstellung benötigt wird und wo stichpunkthafte Messungen genügen, beispielsweise um in Messkampagnen mit zeitwillig hoher Messfrequenz, Wirkungszusammenhänge zwischen Grabensystem und Grundwasser festzustellen. Auf dem Poster wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung des Messnetzes einschließlich des Konzeptes für die technische Gestaltung der Erfassung, Übertragung und Verarbeitung der Daten vorgestellt.

Hydrologische Erkundungen zur Wasserkraftnutzung in zwei Einzugsgebieten im Norden Pakistans

Martin Fuchs, Andreas Katzensteiner, Herbert Weilguni, Rudolf Faber

Das Einzugsgebiet des oberen Indus weist ein enormes Wasserkraftpotential auf, welches in den nächsten Jahrzehnten schrittweise erschlossen werden soll. Die Abgelegenheit vieler Indus-Zubringer, die extremen topographischen und klimatischen Verhältnisse sowie die zunehmenden politischen Spannungen in den Stammesgebieten des nördlichen Pakistans machen die hydrologischen Erkundung dieser Region allerdings zu einer schwierigen Aufgabe. Darüberhinaus variieren die regionalen hydrologischen Verhältnisse durch den wechselnden Einfluss von Westwindzone und Monsun sehr stark. Entsprechend groß sind die Unsicherheiten in den hydrologischen Bemessungswerten.

Neben einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung der hydrometeorologischen Situation kann der Einsatz moderner Messverfahren und numerischer Modelle sowie die Einbeziehung von Fernerkundungsdaten die Einschätzung der hydrologischen Situation deutlich erleichtern.

In der vorgestellten Arbeit wurden solche Verfahren im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für zwei Wasserkraftprojekte mit jeweils ca. 1000 MW eingesetzt, welche im Distrikt Kohistan an zwei Zubringern zum Indus geplant sind. Das Gebiet, das sich bis auf eine Seehöhe von 5000 m erstreckt, ist weitgehend unerschlossen und kann nur durch mehrtägige Fußmärsche erreicht werden. Im Zuge der Projektentwicklung wurden drei Pegelstationen gebaut und über mehrere Jahre betrieben. Die Datenbasis wurde durch Beobachtungen aus angrenzenden Gebieten und die Akquisition von Fernerkundungsdaten (zur Beurteilung der Schneeverhältnisse) ergänzt. Durch Einsatz verschiedener Regionalisierungsverfahren und hydrologischer Modellansätze war es schließlich möglich, die wesentlichen Bemessungsgrößen wie Zuflussganglinien und Höchsthochwasser mit ausreichender Genauigkeit abzuschätzen.

Der praktischen Umsetzung verschiedener theoretischer Verfahren sind in solchen Ingenieursprojekten, mit meist engen zeitlichen und budgetären Vorgaben, gewisse Grenzen gesetzt. Eine noch stärkere Begrenzung stellt allerdings die mangelhafte Datenverfügbarkeit und Datenqualität dar. Insbesondere der kritischen und sorgfältigen Prüfung der zur Verfügung stehenden Daten kommt daher große Bedeutung zu.

Spatial prediction on a river network: A comparison of Top-kriging and regional regression

Gregor Laaha, Jon Olav Skøien, Günter Blöschl

River networks exhibit a special tree-like structure that offers special challenges for regionalisation. Top-kriging is a method for estimating streamflow-related variables on a river network. Top-kriging treats these variables as emerging from a two-dimensional spatially continuous process in the landscape. The Top-kriging weights are estimated from catchment area (kriging support) accounting for the nested nature of the catchments. This assures that kriging weights are distributed to connected and unconnected sites of the stream network according to the data situation.

We test the Top-kriging method for a comprehensive Austrian dataset of low stream flows. We compare it with a regional regression model where the study domain is subdivided into eight regions. Leave-one-out cross-validation results indicate that Top-kriging outperforms the regional regression on average over the entire study domain. The coefficient of determination (cross-validation) of specific low stream flows is 0.75 and 0.68 for the Topkriging and regional regression methods, respectively. We performed a stratified analysis to assess the performance for locations with and without upstream data points. For locations without upstream data points the two methods are similar because of the external information used in the regression. For locations with upstream data points Top-kriging performs much better than the regression as it exploits the low flow information of the neighbouring locations.

We finally assess the distribution of kriging weights in two typical estimation problems on a river network. In the first situation a close-by site at the same river is available, while in the second situation a close-by site is situated at an adjacent, unconnected river system. The distribution of kriging weights of Top-kriging is more realistic than for kriging approaches based on Euclidean or stream distance metrics. We conclude that from the conceptualization of stream flow generation processes, the distribution of kriging weights, the predictive performance and the distribution of uncertainty along the stream network, Top-kriging appears notably well adapted for the stream network problem. Hence, Top-kriging should be used to perform spatial prediction on a river network.

Der Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in einem kleinen tropischen Einzugsgebiet in Tansania

Marco Natkhin, Ottfried Dietrich, Meike Schäfer, Gunnar Lischeid

In den letzten Jahrzehnten fand in vielen Regionen Tansanias ein gravierender Landnutzungswandel statt, bei dem die Siedlungs- und Ackerflächen ausgedehnt wurden. Diese Veränderungen wirkten sich auch auf den Wasserhaushalt vieler Einzugsgebiete aus, die Abflüsse in der Trockenzeit nahmen ab, viele Flüsse trocknen heute über längere Zeiträume aus als noch vor wenigen Jahrzehnten. Das Ziel dieser Studie ist es, die Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes abzuschätzen sowie landwirtschaftliche Anpassungsoptionen an den Klimawandel hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt zu bewerten. Die Studie ist Teil des Forschungsprojektes “Resilient agro-landscapes to Climate Change in Tanzania” (ReACCT), welches vom deutschen Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung gefördert wird.

In diesem Beitrag wird der Aufbau und die Bewertung eines mesoskaligen Einzugsgebietsmodells in einem wenig beobachteten Gebiet vorgestellt. Untersuchungsgebiet ist das 2780 km² große Ngerengere Einzugsgebiet, ein Teileinzugsgebiet des Ruvu (Tansania). Infolge starker Bevölkerungszunahme stieg der Anteil von landwirtschaftlich genutzten Flächen zwischen 1995 und 2000 von 16% auf 61% der Einzugsgebietsfläche. Nach Abschätzung der wesentlichen Prozesse für den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet, der Datenverfügbarkeit und einem Modellvergleich, wurde das Abflussmodell SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ausgewählt. Für die Parametrisierung des Modells wurde der vorhandene geringe Erkundungsstand durch eigene Messungen verbessert. Anhand von langjährigen beobachteten Abflussdaten mehrerer Pegel im Einzugsgebiet erfolgte eine Kalibrierung und Validierung. Im Folgenden sollen mit dem Modell Szenarioanalysen mit regionalisierten Klimaszenarien und Landnutzungswandelszenarien durchgeführt werden.

Evaluierung von Strategien zur Verminderung der Stickstoffbe-lastung aus der Landwirtschaft in dränierten Gebieten

Matthias Pfannerstill, Cindy Hugenschmidt, Michael Trepel, Nicola Fohrer

Diffuse Stickstoffeinträge aus Dränagen landwirtschaftlich genutzter Flächen tragen in Deutschland erheblich zur Nährstoffbelastung aquatischer Ökosysteme bei. Die Norddeutsche Tiefebene nimmt in diesem Kontext eine besondere Rolle ein, denn durch die großen Anteile gedränter Flächen ist hier der Stickstoffaustrag besonders hoch. Maßnahmen zur Verringerung der Stickstoffbelastung beruhen auf einer Anpassung der landwirtschaftlichen Praxis und der nachgeschalteten technischen Reinigung durch beispielsweise Reinigungsteiche und reaktive Grabensysteme. Für eine größtmögliche Verringerung der Stickstoffbelastung sind hierbei nicht Einzelmaßnahmen, sondern Maßnahmenkombinationen zielführend.

Die Zielsetzung des Projekts ist es, die Kombination einer angepassten landwirtschaftlichen Praxis und die potentielle Reinigung der Dränabflüsse durch technische Maßnahmen modellgestützt abzubilden. Dabei wird die Kombination der Maßnahmen einer Wirkungsanalyse unterzogen, um die potentielle Verminderung der Stickstoffbelastung für ein stark dränbeeinflusstes, mesoskaliges Einzugsgebiet der Norddeutschen Tiefebene zu quantifizieren. Die Praxistauglichkeit der Maßnahmenkombination und deren potentielle Umsetzung in der Realität werden sichergestellt, indem eine Kooperation mit einer repräsentativen Gruppe von Interessenvertretern angestrebt wird.

Das Modellsystem sieht vor, in dem Testeinzugsgebiet zunächst die Stickstoffbelastung in Abhängigkeit von der gegenwärtigen landwirtschaftlichen Praxis mit dem ökohydrologischen Modell Soil and Water Assessment Tool (SWAT) abzubilden. Mit Interessenvertretern werden GIS-gestützt prioritäre Maßnahmengebiete und eine darauf angepasste Landwirtschaft festgelegt, deren potentieller Beitrag zur Verminderung der Stickstoffbelastung mit SWAT quantifiziert wird. Mit Hilfe eines GIS-Algorithmus werden mögliche Lagen für Reinigungsanlagen lokalisiert. Die Retentionswirkung wird über Massenbilanzmodelle berechnet, deren Reinigungsleistung gegenwärtig in dem Testeinzugsgebiet untersucht wird. Nach der Anwendung der Massenbilanzgleichungen liegen die Gesamtauswirkungen der Maßnahmenkombinationen vor und den Interessenvertretern kann mit visualisierten Ergebnissen die Erfolgsaussicht und Verminderung der Stickstoffbelastung im Einzugsgebiet sowohl gebündelt als auch nach Einzelmaßnahmen flächendifferenziert aufgezeigt werden.

Panta Rhei – Hydrologisches Modellsystem für Forschung und Praxis in Niedersachsen

Gerhard Riedel, Günter Meon, Kristian Förster, Stephan Lange, Tim Lichtenberg, Markus Anhalt

Das hydrologische Modellsystem Panta Rhei entspringt einer Kooperation zwischen dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig und dem Ingenieurbüro Prof. Hartung+Partner unter enger Einbindung des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Mit dieser Kooperation werden die Kompetenzen von universitäter Forschung, Ingenieurpraxis und Wasser-wirtschaftsverwaltung optimal genutzt. Panta Rhei ist datenbankbasiert. Das Modell enthält eine integrierte Benutzeroberfläche für ein großes Spektrum hydrologischer Aufgaben von der Planung und Bemessung von Hochwasserschutzkonzepten, der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodellierung für die Klimafolgenforschung bis zur Hochwasservorhersage im operationellen Einsatz. Für alle drei Aufgaben werden Anwendungen vorgestellt.
Gemeinsam mit dem NLWKN wurde das Einzugsgebiet der Aller als Pilotgebiet ausgewählt. Mit 15.000 km² Fläche und über 4200 natürlichen Teileinzugsgebieten, die mittels eigener GIS-Prozeduren in ca. 40.000 homogene Hydrotope zu Berechnungszwecken feineingeteilt wurden, ca. 150 Pegeln, 5 Talsperren im Harz und zahlreichen Rückhaltebecken, Poldern, Verzweigungen, Ableitungen und Dükern unter den Mittelland- und Elbe-Seiten-Kanälen stellt das Allergebiet sehr hohe Ansprüche an die hydrologische Modellierung.
Seit 2007 wird das Modell der Aller für Bemessungsaufgaben, seit 2008 für die niedersächsische Klimafolgenforschung am LWI und seit Ende 2010 vom NLWKN selbst in der Hochwasser-Vorhersagezentrale erfolgreich eingesetzt. Hierfür hat der NLWKN mit dem Betriebsdateninformationssystem (BIS) eine landesweite zentrale Datenspeicherung für den Echtzeitbetrieb entwickelt, die die großräumige Hochwasservorhersage erst möglich macht.
Die Abflussvorhersage für das Gesamtgebiet mit einem Vorhersagezeitraum von 3 Tagen benötigt trotz hoher räumlicher und zeitlicher Detaillierung auf einem Windows-PC nur ca. eine Minute. Wertvolle Zeit für die eigentliche Warnung wird so gespart.
Mit dem Aller-Modell werden im Rahmen der niedersächsischen Klimafolgenprojekte KLIFF und KLIBIW Klimaszenarien von 50 und mehr Kalenderjahren kontinuierlich simuliert. Meteorologische Eingangsdaten sind neben Stationsdaten auch regionalisierte, aufgerasterte historische und prognostizierte Zeitreihen (REMO, WETTREG). Die Rechendauer beträgt bei einem Berechnungszeitschritt von einer Stunde nur etwa eine Stunde pro Kalenderjahr auf einem Windows-PC, so dass in vertretbarer Zeit viele Szenarien vergleichend abgearbeitet werden können. Zum Stand dieser Arbeiten werden ebenfalls Berechnungsergebnisse vorgestellt.

Anpassung der EDV - Struktur des hydrographischen Dienstes Steiermark an die Bedürfnisse einer modernen internationalen Hochwasserzentrale

Christophe Ruch, Robert Schatzl

Seit 2004 haben Joanneum Research und das Danish Hydrological Institute (DHI) im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung mehrere regionale und internationale Hochwasserprognosemodelle entwickelt. Mit der Fertigstellung des letzten derartigen Systems für die Raab bis März 2011 sind alle 3 Hauptflüsse in der Steiermark durch Prognosemodelle abgedeckt und Teil einer Hochwasserzentrale in Graz. In dieser Zentrale laufen folgende Systeme im operationellen Modus:

1. internationales Hochwasserprognosemodell für die Mur: Österreich und Slowenien (derzeit in Erweiterung auf Ungarn), entwickelt im Rahmen des InterregIIIb – Projektes Flussraumagenda Alpenraum
2. regionales Hochwasserprognosemodell für die Enns
3. internationales Hochwasserprognosemodell für die Raab (Steiermark, Burgenland und Ungarn), entwickelt im Rahmen des ETZ - Programms Österreich-Ungarn 2007-2013

Ein Hochwasserprognosemodell ist ein sensibles Gesamtsystem, in dem komplexe Berechnungsalgorithmen und moderne Kommunikationstechnologien kombiniert sind. Die in der Hochwasserzentrale implementierten Hochwasserprognosemodelle wurden auf Basis der Softwarepakete der Firma DHI entwickelt und bestehen aus drei Teilkomponenten:

1. numerisches Wettermodell (INCA-ALADIN-ECMWF): Dieses Modell liefert die benötigten Niederschlags- und Lufttemperaturprognosen, die als Input für das Prognosemodell dienen. Die Prognosen werden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Verfügung gestellt und über FTP-Verbindungen in eine Datenbank eingelesen und für das System vorbereitet.
2. Hydrologisches Modell (NAM): Das hydrologische Modell liefert über die Modellierung der Wasserkreislaufhauptkomponenten die Inputwerte (Durchflüsse) für das hydrodynamische Modell.
3. Hydrodynamisches Modell (MIKE 11): Dieses Wellenablauf Modell ermöglicht die Simulation von Wasserständen und Durchflüssen in den Hauptflüssen und in den wichtigen Zubringern. Als Hauptinformation für dieses Modell dienen die Lage, Höhe und Geometrie der Flussquerprofile sowie ihre Eigenschaften (natürliche oder künstliche Gerinne).

Alle drei erwähnten Prognosesysteme werden automatisch betrieben und liefern jede Stunde eine Prognose für die jeweiligen Einzugsgebiete. Zusätzlich werden bei den jeweiligen Projektpartnern so genannte lokale Systeme betrieben, mit denen eigenständige Szenarien berechnet werden können, wobei die Ergebnisse der automatischen Berechnung per ftp an die lokalen Systeme übermittelt werden. Dazu war es notwendig, die gesamte EDV-Struktur des hydrographischen Dienstes Steiermark an diese neuen Anforderungen anzupassen. Neben den Investitionen in die Software der Hochwasserprognosemodelle wurde auch eine Rasterdatenbank entwickelt, um meteorologische Prognose effizient speichern zu können. Zusätzlich war es auch notwendig, die Hardware komplett zu erneuern. In Summe stehen nun 4 leistungsfähige Rechner in der Hochwasserzentrale in Graz für die Modellierungsaufgaben und für die Datenspeicherung zur Verfügung.

Ein Fuzzy-Logic Ansatz zur szenariengestützten Modellierung der Speicherbewirtschaftung unter dem Einfluss des Klimawandels

Josef Schmid, Ralf Ludwig

Das Projekt Q-BIC³ (Quebec-Bavarian collaboration on climate change) untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf die operationelle Wasserwirtschaft in Bayern und Québec. Zentrale Forschungsfrage ist hierbei die Analyse kumulierter Unsicherheiten, die in einem Ensemble aus Klimamodelldaten und hydrologischer Modelle unterschiedlicher Komplexität entstehen. Aus der Analyse zahlreicher Simulationsläufe unter verschiedenen Randbedingungen wird erklärt, wie sich Daten- und Modellunsicherheiten auf mögliche Anpassungsstrategien in der Wasserwirtschaft auswirken.

Ein Prototyp eines integrativen Managementmodells wurde am Beispiel des mittelfränkischen Überleitungssystem Altmühl-Donau-Regnitz entwickelt, welches die wesentlichen Steuerungsmechanismen von multifunktionalen Speicher- und Transfersystemen realistisch abbilden und unter Verwendung von Szenarien veränderter klimatischer Randbedingungen dynamisch optimieren kann. Als geeignetes Konzept der modellhaften Beschreibung dieses Multifunktionssystems wird der Ansatz der unscharfen Logik (Fuzzy Logic) verwendet. Diese Methodik bietet beste Voraussetzungen, um den Bemessungsspielraum bei der Umsetzung wasserwirtschaftlicher Entscheidungen auszunutzen, konkurrierende Interessen (Wasserwirtschaft, Tourismus, Ökologie) zu bilanzieren und auf dieser Grundlage optimale Steuerungsziele modellhaft abzubilden. Zugehörigkeitsfunktionen (Membership-functions) werden erstellt, die den saisonal variablen Interessen und Stauzielen am besten Rechnung tragen können. Mittels geeigneter Regeln werden diese unscharfen Zustände kombiniert (fuzzifiziert), und anschließend über eine Übersetzungsfunktion defuzzifiziert. Die extrahierten Werte beschreiben die Reaktion auf die jeweilige Situation im Gebiet. In der konkreten modelltechnischen Umsetzung ist der Fuzzy- Ansatz als Modul implementiert, dass zu jedem Modellzeitschritt den aktuellen Systemzustand (d.h. Wasserstände und Durchflüsse an allen relevanten Steuerungspunkten im System) abgreift, anhand der Fuzzy-Regeln bewertet und so an das hydrologische Modell zurückgibt, dass im darauf folgenden Modellzeitschritt die jeweils höchstmöglichen Possibilities erreicht werden.

Erste Ergebnisse zeigen, dass das Fuzzy-System dazu in der Lage ist, die tatsächlichen wasserwirtschaftlichen Entscheidungsprozesse bei der Speicherbewirtschaftung im Referenzzeitraum in sehr guter Näherung abzubilden. Dadurch wird eine Anwendung unter verschiedenen Szenarien des Klimawandels und entsprechender Anpassungsstrategien möglich. Es kann gezeigt werden, unter welchen Randbedingungen die derzeitigen Bewirtschaftungsanlagen funktional bleiben bzw. ergänzt oder umgerüstet werden müssen.

Vergleichende Herbizidausträge in unterschiedlichen Größenskalen

Uta Ulrich, Cindy Hugenschmidt, Nicola Fohrer

Die Skalenproblematik in Bezug auf Pflanzenschutzmittelausträge von landwirtschaftlichen Flächen ist in den letzten Jahren zu einem immer relevanteren Thema geworden. Aufgrund dessen wird das Austragsverhalten von Pflanzenschutzmitteln (PSM) nicht mehr nur auf der Feldskala, sondern auch auf der Wassereinzugsgebietsskala untersucht. In dieser Größenordnung lassen sich komplexere Zusammenhänge, die erst in der Landschaft auftreten, erfassen. Dadurch kann es zu unterschiedlichen PSM-Austrägen/-mustern auf der Feld- und Einzugsgebietsskala kommen. Ziel des Projektes war es, den Einfluss von verschiedenen Größenskalen auf den Austrag von ausgewählten Herbiziden zu untersuchen und Austragsmuster zu identifizieren.

In dem 50 km² großen Wassereinzugsgebiet der Kielstau wurden die Herbizide Terbuthylazin, Metazachlor und Flufenacet, die in Mais-, Raps- und Wintergetreidekulturen eingesetzt werden, in verschiedenen Größenskalen (Plot, Feld, Teileinzugsgebiet, Einzugsgebiet) untersucht. Dazu wurden zum einen zehnwöchige Messkampagnen im Frühjahr 2008 (Terbuthylazin), Herbst 2008 (Metazachlor) und Herbst 2009 (Flufenacet) durchgeführt. Die Größe der einzelnen Skalen betrug 5,4 ha für das Drainfeld, 747 ha für das Teileinzugsgebiet und ca. 5000 ha für das Einzugsgebiet. Automatische Probensammler entnahmen tägliche Mischproben aus dem Drainagewasser des Drainagefeldes sowie dem Oberflächenwasser des Zuflusses Moorau und der Kielstau an ihren Auslässen. Zum anderen wurde in einem Laborversuch der Austrag der Herbizide mit dem Oberflächenabfluss auf einer Plot-Skala von 0,2 m² bei sechs intermittierenden Beregnungen aus einem Regensimulator mit je 13 mm Niederschlag untersucht. Die Bestimmung der Herbizidkonzentration erfolgte mittels HPLC mit Dioden-Array-Detektion. Ferner wurden die Abflüsse der Drainage, Moorau und Kielstau sowie die Niederschläge im Untersuchungsgebiet erfasst. Um das Austragspotential in den einzelnen Größenskalen abschätzen zu können, wurden zum einen die Landwirte Vorort zu ihren Applikationsdaten befragt und zum anderen im gesamten Wassereinzugsgebiet eine Landnutzungskartierung durchgeführt.

Die Verläufe der Herbizidkonzentrationen zeigen, dass die höchsten Herbizidkonzentrationen nach den ersten Niederschlagsereignissen nach den Applikationen detektiert wurden, die höchsten Tagesfrachten jedoch erst deutlich später. Im Kielstau-Einzugsgebiet ware diese bei Terbuthylazin 6 – 12 Tage, bei Metazachlor 32 – 71 Tage, und bei Flufenacet 50 – 53 Tage nach Applikation zu beobachten. Innerhalb der Beregnungsversuche traten die maximalen Frachten innerhalb der zweiten Beregnung für Metazachlor und Terbuthylazin auf, innerhalb der vierten Beregnung bei den Flufenacet behandelten Plots. Auf der Plot- und Feldskala konnten die Herbizidausträge eindeutig dem Oberflächenabfluss bzw. dem Drainagepfad zugeordnet sowie Austragsmuster in Abhängigkeit von Niederschlägen, Herbizideigenschaften und Transportmechanismen identifiziert werden. Auf der Teileinzugsund Einzugsgebietsskala wurden Mischsignale der Herbizidausträge von allen potentiellen Austragspfaden erfasst, so dass es nicht möglich war, einzelne Eintragspfade abzuschätzen. Austragsmuster konnten aufgrund von Verdünnungs-, Adsorptions- und Degradationseffekten, die auf diesen Skalen an Bedeutung gewinnen, nicht eindeutig identifiziert werden.

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21.März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen

Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen

Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen

Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen

Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR

Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

Heft 07.04 Niedrigwassermanagement
Beiträge zum Seminar am 11./12.November 2004 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler
172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-47-X vergriffen

Heft 08.05 Hochwasser-Gefahrenkarten
Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten
Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt
Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-48-8 vergriffen

Heft 03.05 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen

Heft 09.05 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-67-4 vergriffen

Heft 10.05 Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft –
von der Theorie zum Anwendungsfall
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen
Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartusseck, Hani Sewilam
314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-68-2 42 EUR, CD 29 EUR

Heft 11.05 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte
Beiträge zum Seminar am 2./3.Juni 2005 in Braunschweig
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-80-1 38 EUR, CD 29 EUR

Heft 12.05 Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie:
Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik
Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz
Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg
172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-90-9 38 EUR, CD 29 EUR

Heft 13.05 Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele
Herausgeber: Axel Bronstert
Monographie, 2005
148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-91-7 38 EUR, CD 29 EUR

Heft 14.06 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Aktualisierte Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
205 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-30-4
ISBN-13: 978-3-939057-30-7 38 EUR, CD 29 EUR

Heft 15.06 Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006
an der Universität der Bundeswehr München
Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch,
Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann
Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten
Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten beide Vortragsbände zusammen 50 EUR
Band 3 Poster, 280 Seiten Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR
ISBN-10: 3 939057-31-2
ISBN-13: 978-3-939057-31-4

Heft 16.06 Niederschlag-Abfluss-Modellierung
Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier
Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst
195 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-55-X
ISBN-13: 978-3-939057-55-0 45 EUR, CD 29 EUR

Heft 17.06 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
188 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-56-8
ISBN-13: 978-3-939057-56-7 45 EUR, CD 29 EUR

Heft 18.06 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzept
Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken
232 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-57-6 45 EUR, CD 29 EUR
ISBN-13: 978-3-939057-57-4

Heft 19.07 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
196 Seiten, Format A4
ISBN-13: 978-3-940173-03-4 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 20.07 Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007
an der Universität Rostock
Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-RoseTrübger, Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 276 Seiten
Band 2 Poster, 17 Seiten beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-04-1

Heft 21.07 Verdunstung
Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam
Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg
252 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-05-8 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 22.07 EU-Hochwasserrichtlinie
Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 19./10. November 2007 in Koblenz
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-44-7 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 23.08 Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung
– Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008
an der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier,
Max Billib, Hans-Reinhhard Verworn, Hans-B. Kleeberg
300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-96-6

Heft 24.08 Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
256 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-97-3 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 25.09 EU-Hochwasserrichtlinie
In drei Schritten zur Umsetzung
Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941089-53-2 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 26.09 Hydrologische Systeme im Wandel
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz,
Georg Hörmann, Katrin Bieger
196 Seiten, Format A4 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-941089-54-9

Heft 27.10 Auen und Hochwasser
Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010
in Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg
226 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-08-3 50 EUR, CD 29 EUR

Heft 28.10 Abflüsse aus extremen Niederschlägen
Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung
am 14./15. September 2009 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
245 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-22-9 50 EUR, CD 29 EUR

Heft 29.10 Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von
Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010
an der Technischen Universität Braunschweig
Herausgeber: Günter Meon
283 Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-941897-49-6 50 EUR, CD 29 EUR

Heft 30.11 Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011
an der Technischen Universität Wien
Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz
394 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-79-3 50 EUR, CD 29 EUR

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 20 %