

HEFT **31.12**



## Wasser ohne Grenzen

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012  
an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Markus Weiler (Herausgeber)



**Hydrologische Wissenschaften**

Fachgemeinschaft in der DWA

HEFT **31.12**

## Wasser ohne Grenzen

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012  
an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Markus Weiler (Herausgeber)

Veranstalter des Tages der Hydrologie 2012:

- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA,  
Aachen, Hennef
- ≈ Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- ≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA,  
Hennef

Mitveranstalter:

- ≈ Förderverein Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- ≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG)



**Hydrologische Wissenschaften**

Fachgemeinschaft in der DWA

Markus Weiler (Herausgeber):

Wasser ohne Grenzen

Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012  
22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 31.12

ISBN: 978-3-942964-38-8

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2012

#### 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](mailto:info@FgHW.de)  
[www.FgHW.de](http://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](mailto:vertrieb@dwa.de)  
[www.dwa.de](http://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:**

Rombach Druck-  
und Verlagshaus GmbH & Co. KG  
Freiburg / Breisgau

**Umschlaggestaltung:**

Dorit Steinberger, München

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2012

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 fordern eine integrative Betrachtungsweise und stoßen deshalb häufig an disziplinäre, methodische und administrative Grenzen. Deshalb hat die Inter- und Transdisziplinarität sowohl in der hydrologischen Forschung als auch in der wasserwirtschaftlichen Anwendung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Tag der Hydrologie 2012 steht deshalb unter dem Motto „**Wasser ohne Grenzen**“. Die Tagung thematisiert und diskutiert Arbeiten, die diese physischen und disziplinären Grenzbereiche erforschen, Methoden über Barrieren hinweg anwenden und Ansätze zur Überwindung von Grenzen aufzeigen. Die 123 Beiträge sind in drei Themenbereiche gegliedert:

### ***Thema 1: Grenzbereiche (Forschung, Modellierung)***

Beiträge in diesem Bereich erforschen interdisziplinär und experimentell Prozesse, die den Wasser- und Stoffaustausch steuern, oder beschäftigen sich mit der Entwicklung und Anwendung von Modellen, die diese Prozesse realitätsnah abbilden. Beispiele für thematisierte Grenzbereiche im hydrologischen System schließen Interaktionen von Oberflächen- und Grundwasser, sowie Pflanzen als Bindeglied des Wasser- und Stofftransfers zwischen Atmosphäre und Boden ein.

### ***Thema 2: Grenzüberschreitungen (Management, Planung)***

Beiträge in diesem Bereich beschäftigen sich mit integrativen Ansätzen der Wasserwirtschaft oder dem Transfer von Methoden über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen. Es werden Fragen des interregionalen oder internationalen Einzugsgebiets- und Aquifermanagements thematisiert sowie Probleme bei der skalenüberschreitenden Anwendung von Modellen aufgezeigt.

### ***Thema 3: Grenzüberwindung (Anwendung, Governance)***

Beiträge in diesem Schwerpunkt behandeln Möglichkeiten und Lösungen zur Überwindung von Barrieren und zur Umsetzung hydrologischer Forschungsergebnisse in der Wasserwirtschaft. Die Beiträge zeigen Vorteile und Probleme gemeinsamer Datennutzung auf und erörtern, wie der Austausch von hydrologischen Daten und Modellen sowie die Transparenz von Methoden verbessert werden kann. Weiterhin werden Konzepte vorgestellt, wie auf allen Ebenen der Verwaltung die Grenzen zwischen Forschung und Anwendung überwunden werden können.

Ich danke allen, die dazu beigetragen haben, dass der Tag der Hydrologie 2012 in Freiburg stattfindet. Die Veranstaltung wurde von einer Reihe von unten aufgeführten Sponsoren finanziell unterstützt und ich bedanke mich sehr für deren Engagement. Außerdem möchte ich mich bei der Universität Freiburg für die Unterstützung der Veranstaltung bedanken. Zum Schluss möchte ich insbesondere Christina Hauger, Nicole Jackisch, Irene Kohn, Hannes Leistert, Michael Stölzle und Jürgen Strub danken, die maßgeblich für die Tagungsorganisation verantwortlich waren.

Ich wünsche allen eine interessante und gelungene Veranstaltung

Markus Weiler

Freiburg, 14. März 2012





# Heft 31 2012 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

## Wasser ohne Grenzen

### Keynotes

Hydrologie mit Grenzen – Grenzen der Anwendung von Klimamodellsimulationen in hydrologischen Modellen <i>Jan Seibert, Geographisches Institut, Universität Zürich</i> .....	17
Zweitausend Jahre Ökoklimatologie – von Aristoteles bis zu bioklimatischen Feedbacks <i>Markus Reichstein, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena</i> .....	23

### Vorträge zum Themenbereich 1 "Grenzbereiche"

Ein landnutzungssensitives Bodenmodell für die meso-und makroskalige Wasserhaushaltsmodellierung <i>Phillip Kreye, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig</i> .....	25
Neue Möglichkeiten zur Bestimmung hydraulischer Kennfunktionen von Böden <i>Uwe Schindler, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg</i> .....	31
Räumliche und zeitliche Muster der Bodenfeuchte zur Evaluierung von Bodenwasserhaushaltsmodellierungen <i>Yvonne Morgenstern, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg</i> .....	37
Regionalisierung der Bodenfeuchte in mesoskaligen Einzugsgebieten <i>Sarah Engels, Ruhr-Universität Bochum</i> .....	43
Stammabfluss bei Buchen als Auslöser für präferenzielle Fließvorgänge im Boden <i>Kai Schwärzel, Technische Universität Dresden</i> .....	49
Ermittlung von hyporheischen Austauschflüssen und deren Verweilzeitverteilungen mit Hilfe von reaktiven und konservativen Tracern <i>Dennis Lemke, Water &amp; Earth System Science (WESS), Universität Tübingen</i> .....	54
Quantitative Analyse von Grundwasserzutritten und Fließwegen im Flachwasser mittels Thermographie <i>Tobias Schütz, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	59
Untersuchung des Einflusses von Sohlstrukturen auf Strömung und redox-sensitive Stoffumsätze in der hyporheischen Zone mittels eines gekoppelten Oberflächen-Grundwassermodells <i>Jan Fleckenstein, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig</i> .....	65
Experimentelle Analyse und Modellierung des Sauerstoffhaushaltes im Hyporheal des Kharaa (Mongolei) <i>Melanie Hartwig, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Magdeburg</i> .....	66

Einsatz von Online-Sonden-Technik zum Monitoring von prozessgesteuertem Stickstofftransport <i>Marc Schwientek, Water &amp; Earth System Science (WESS), Universität Tübingen</i> .....	67
Dynamische Modellierung der Sorption von Substanzen in einem hydrologischen Einzugsgebietsmodell anhand des Beispiels Phosphor <i>Matthias Gassmann, Universität Lüneburg</i> .....	73
Transport und Umsetzung von reaktivem Stickstoff auf der Hangskala: Ein prozessorientierter Modellansatz <i>Philipp Kraft, Universität Gießen</i> .....	79
Tracer-basierte Modellkalibrierung von Abflussprozessen in einem vergletscherten Einzugsgebiet in den Alpen <i>Michael Engel, Freie Universität Bozen</i> .....	85
Bestimmung von Abflusswegen des Gletscherwassers in einer karstischen Umgebung <i>David Finger, Geographisches Institut, Universität Bern</i> .....	91
Identifizierung und Evaluierung von Karstmodellen mittels systembeschreibender Zielfunktionen <i>Andreas Hartmann, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	97
Erweiterte Hauptkomponentenanalyse – ein nützliches Werkzeug um Prozesse zu verstehen, die die Wassergüte in Flusseinzugsgebieten steuern <i>Benny Selle, Water &amp; Earth System Science (WESS), Universität Tübingen</i> .....	103
Nachweis und Interpretation von Grundwasserqualitätsschwankungen in einem flussnahen Trinkwasserfördergebiet mittels multivariater Analyse <i>Rebecca Page, Universität Basel</i> .....	108
Effekte lateraler bodennaher Austauschprozesse auf die Evapotranspiration in strukturierten Landschaften <i>Gunnar Lischeid, , Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg</i> .....	114
Multikriterielle Kalibrierung gekoppelter Boden-Pflanze-Atmosphäre Modelle <i>Sebastian Gayler, Water &amp; Earth System Science (WESS), Universität Tübingen</i> .....	115
Sensitivität der Abflussprozesse kleiner alpiner Einzugsgebiete auf Klimaänderungen <i>Gertraud Meißl, Institut für Geographie, Universität Innsbruck</i> .....	121
Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen Simulation potenziell naturnaher Zustände im urbanen Einzugsgebiet <i>Georg Johann, Emschergenossenschaft Essen</i> .....	127
Ökohydrologische Untersuchungen hochfrequenter Wachstumsreaktionen der Waldbäume auf die Bodenfeuchtedynamik im Nationalpark Eifel <i>Burkhard Neuwirth, Geographisches Institut, Universität Bonn</i> .....	133

Prozessorientierte Rekonstruktion von Winterniederschlägen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für die hydrologische Modellierung von nivo-pluvialen Einzugsgebieten <i>Kristian Förster, Technische Universität Braunschweig</i> .....	135
Einfluss des Klimawandels mit zunehmenden Starkniederschlägen auf Abfluss und Bodenerosion in Süddeutschland <i>Jessica Kempf, geomer GmbH Heidelberg</i> .....	141
Besondere Maßnahmen zur Berücksichtigung des Schneeinflusses bei der Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg <i>Ingo Haag, HYDRON GmbH, Karlsruhe</i> .....	147
Ökologische Flutung an der Donau – Untersuchungen im Grenzbereich zwischen Hydrologie und Geomorphologie <i>Peter Fischer, Katholische Universität Eichstätt</i> .....	153
<b>Vorträge zum Themenbereich 2 "Grenzüberschreitungen"</b>	
Integratives flussgebietsweites Nährstoffmanagement AGRUM Weser im Einzugsgebiet der Flussgebietseinheit Weser <i>Ute Kuhn, Geschäftsstelle der Flussgebietsgemeinschaft Weser, Hildesheim</i> .....	159
AMICE: erste internationale Modellrechnung der Maas <i>Simone Patzke, Deltares, Delft</i> .....	165
Probenahmestrategien der Bodenseeanrainerstaaten – Konsequenzen für Prognosen von Stofffrachten und Wasserqualität <i>Philipp Schneider, Geographisches Institut, Universität Zürich</i> .....	171
Optimale integrierte Bewirtschaftung gekoppelter Grundwasser-Landwirtschaft Hydrosysteme <i>Jens Grundmann, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden</i> .....	177
Urban geprägte Bäche und deren Stoffhaushalt – Integration der Niederschlagswasserbewirtschaftung <i>Berenike Meyer, Universität Trier</i> .....	183
Wird der Starkregen immer stärker? Analyse von Sturzflut-relevanten Starkregen <i>Eva Nora Mueller, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam</i> .....	189
Starkregengefahrenkarten und Risikomanagement im Glems-Einzugsgebiet <i>André Assmann, geomer GmbH, Heidelberg</i> .....	195
Änderung von Bemessungsniederschlag – relevant in Hydrologie und Meteorologie <i>Gabriele Malitz, Deutscher Wetterdienst, Berlin</i> .....	201
Skalenübergreifende Modellierung der Abflussbildungsprozesse bei der Entstehung von Hochwasser mit dem Modell DROGen <i>Andreas Steinbrich, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	207

Gekoppelte Niederschlag-Abfluss-Statistiken en gros et en detail <i>Michael Wagner, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden</i> .....	213
Niederschlagsanalyse objektiver Wetterlagen in Klimasimulationen <i>Ulf Riediger, Deutscher Wetterdienst, Offenbach</i> .....	219
Einfluss der Bias-Korrektur auf die Abflusssimulation in mesoskaligen Einzugsgebieten <i>Markus Casper, Universität Trier</i> .....	225
Ein Frühwarnsystem für Wasserknappheit in Kärnten <i>Jürgen Komma, Technische Universität Wien</i> .....	231
Grenzen überwinden im Nahen Osten – Ergebnisse 10-jähriger hydrologischer Modellstudien <i>Lucas Menzel, Geographisches Institut, Universität Heidelberg</i> .....	236
Modellierung von Durchflussverlusten in Flüssen trockener Landschaften <i>Axel Bronstert, Universität Potsdam</i> .....	237
Statistisches Downscaling von CLM-Niederschlagsdaten mit einer Analogmethode unter Verwendung von Radardaten des DWD-Radars Essen <i>Alrun Tessendorf, hydro &amp; meteo GmbH &amp; Co. KG, Lübeck</i> .....	243
Hydrologisch relevante Rasterdatensätze (HYRAS) für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe <i>Monika Rauthe, Deutscher Wetterdienst, Offenbach</i> .....	249
 <b>Vorträge zum Themenbereich 3 "Grenzüberwindung"</b>	
Mobile Augmented Reality – Neue Möglichkeiten für die Hydrologie <i>Frank Fuchs-Kittowski, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin</i> .....	254
Detaillierte Feldbeobachtung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Schneedeckeneigenschaften mit einem Netzwerk aus zahlreichen kostengünstigen Sensoren <i>Stefan Pohl, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	260
Angewandte offene Standards im integrierten Wasser-Informations-Management <i>Roland Funke, KISTERS AG, Aachen</i> .....	266
Hydrometeorologische Leistungen des DWD zur Unterstützung der Wasserwirtschaft im Zeichen des Klimawandels – eine aktuelle Übersicht <i>Bruno Rudolf, Deutscher Wetterdienst, Offenbach</i> .....	272
Grenzen der hydrologischen Modellierung? Eine retrospektive Analyse des Extremhochwassers im Lötschental, Schweiz, im Oktober 2011 <i>Ole Rössler, Oeschger Zentrum für Klimaforschung, Geographisches Institut, Universität Bern</i> ....	278

Verbesserung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems im Einzugsgebiet von Mosel und Saar <i>Inga Gellweiler, FLOW MS – Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar (IKSMS), Trier</i> .....	283
Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum <i>Enno Nilson, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz</i> .....	287
Künstliche Feuchtflächen in Hochwasserrückhaltebecken – eine Chance für die Reduzierung von Pflanzenschutzmitteleinträgen in Gewässer <i>Jens Lange, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	293
Grundwassernutzung im Reich der Hethiter – Hydrologie und Archäologie <i>Hartmut Wittenberg, Universität Lüneburg</i> .....	299
<b>Posterbeiträge zum Themenbereich 1 "Grenzbereiche"</b>	
Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsbereich zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei. Teil 1: Evapotranspiration, latenter, fühlbarer und Bodenwärmestrom <i>Stefanie Minderlein, Geographisches Institut, Universität Heidelberg</i> .....	305
Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsbereich zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei. Teil 2: Abfluss und Bodenfeuchte <i>Benjamin Kopp, Geographisches Institut, Universität Heidelberg</i> .....	307
Modellierung der Wasser- und Stoffflüsse in der Westsibirischen Tiefebene unter dem Einfluss von Landnutzungs- und Klimawandel mittels CoupModel und SWAT <i>Olga Kolychalow, Abteilung für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Universität Kiel</i> .....	309
Wasserhaushalt des Feuchtgebiets Nabajjuzi in Uganda, East Africa <i>Astrid Unterberger, Universität für Bodenkultur, Wien</i> .....	310
Charakterisierung des Abflussverhaltens eines Flusses (Gunt) im semi-ariden Pamir Tadschikistans mittels stabiler Isotope, Hydrochemie und Fernerkundung <i>Christiane Ebert, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Halle (Saale)</i> .....	311
Abschätzung der Auswirkungen des Landnutzungswandels in der Drei-Schluchten-Region in China auf Wasserquantität und -qualität durch Simulation von Landnutzungsszenarien mit dem Modell SWAT <i>Katrin Bieger, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Universität Kiel</i> .....	313
Der Effekt von Baumarten auf die Versickerungsraten auf einer tropischen Aufforstung <i>Matthias Sprenger, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	314

Statistische Auswertung forstwirtschaftlicher Maßnahmen bzw. Störungen der Bestandesstruktur auf die Gewässerchemie <i>Carina Sucker, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	315
Modellierung des Bodenwasserhaushalts und Analyse des Trockenstresses für zwei Waldstandorte im Odenwald <i>Jannis Groh, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg</i> .....	316
Flächenbezogene Schätzung von physikalischen und hydraulischen Bodeneigenschaften aus Monitoringdaten <i>Klaus von Wilpert, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Boden und Umwelt, Freiburg</i> .....	318
Modellstudie zum Einfluss der Substratheterogenität auf die Bestimmung von Sickerwasserflüssen <i>Tobias L. Hohenbrink, Institut für Landschaftswasserhaushalt, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg; Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam</i> .....	321
Interaktionen zwischen hydrologischen Prozessen unterschiedlicher räumlich-zeitlicher Skalen <i>Sophie Bachmair, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	322
Räumlicher Vergleich von Abflussbildung Mechanismen in einem Schweizer voralpinen Einzugsgebietes <i>Benjamin Fischer, Physische Geographie - H2K, Universität Zürich</i> .....	323
Quantifizierung der Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Kielstau <i>Cindy Hugenschmidt, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Kiel</i> .....	324
Verweilzeit und Hydrochemie von vier alpinen Einzugsgebieten (Urserental, Schweiz) <i>Matthias Müller, Institut für Umweltgeowissenschaften, Universität Basel</i> .....	325
Kartierung räumlicher Muster der Bodenfeuchte anhand qualitativer Indikatoren <i>Michael Rinderer, Geographisches Institut, Universität Zürich</i> .....	327
Untersuchung steuernder Faktoren der Grundwasserdynamik in einem Wildbacheinzugsgebiet <i>Michael Rinderer, Geographisches Institut, Universität Zürich</i> .....	328
Modellierung der Abflusskonzentration auf unterschiedlich bearbeiteten landwirtschaftlichen Flächen <i>Florian Winter, Universität der Bundeswehr, München</i> .....	329
Welche Gebietseigenschaften bestimmen das Abflussverhalten in kleinen Einzugsgebieten? <i>Björn Thomas, Institut für Landschaftswasserhaushalt, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg; Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam</i> .....	330

Ableitung des Retentionsverhaltens des Karstkörpers an der Zugspitze mit Hilfe des hydrologischen Modells ALPINE3D <i>Matthias Bernhardt, Department für Geographie, Universität München</i> .....	332
Evaluierung der Einzugsgebietspeicher mit stabilen Isotopen und einem Grundwassermodell mit Focus auf Trockenheit <i>Anita Gundel, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	333
Separation von Gebietsentwicklungen und Interaktionen bei der Entwicklung von Typganglinien für Grundhochwasserereignisse in Sachsen <i>Hannaleena Pöhler, UDATA Bayreuth</i> .....	334
Erweiterung eines Abflussvorhersagemodells um Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser in alpinen und voralpinen Schotterkörpern <i>Natalie Stahl, Wasserwirtschaftsamt Weilheim</i> .....	336
Laborexperimente zur Dynamik von Süßwasserlinsen: Fließgeschwindigkeit und Altersschichtung <i>Leonard Stöckl, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover</i> .....	338
Grenzbereiche und Anwendung numerischer Modellierung Dichte-getriebener Strömung auf verschiedenen hydrologischen Skalen <i>Thomas Graf, Universität Hannover</i> .....	340
Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit von Abfluss-Messungen in mittelgroßen Flüssen <i>Song Song, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Universität Kiel</i> .....	341
Gestaltung des Uferzonenbereichs für effiziente Nährstoffentfernung mittels eines simplen physikalisch basierten Ansatzes <i>Luisa Hopp, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth</i> .....	342
Controlled Drainage zur Minderung des Nährstoffaustrages aus dränierten landwirtschaftlich genutzten Flächen <i>Petra Kahle, Universität Rostock</i> .....	343
Reaktive Grabensysteme zur Reinigung von Dränagewässern – Ein Baustein zur Reduktion des diffusen Stickstoffeintrags aus landwirtschaftlichen Flächen? <i>Matthias Pfannerstill, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Kiel</i> .....	345
Großräumige hydrologische Messkampagnen im Norddeutschen Tiefland und erste Auswertungen zur Erfassung des Istzustandes des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes <i>Hilmar Messal, Universität Kiel</i> .....	346

Ökotonbasierte Analyse von Fauna-Habitat-Beziehungen in Quellgewässern als Beitrag für den Gewässerschutz <i>Martin Reiss, Fachbereich Geographie, AG Bodengeographie &amp; Hydrogeographie, Universität Marburg</i> .....	347
Hydrologische und hydraulische Modellierung zur Beschreibung aquatischer Habitate <i>Jens Kiesel, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Universität Kiel</i> .....	349
Wassertemperaturen am Lech – Entwicklungen im Grenzbereich zwischen Gewässer, Klima und anthropogener Nutzung <i>Karl-Friedrich Wetzel, Institut für Geographie, Universität Augsburg</i> .....	350
Auswirkungen von möglichen Klimaveränderungen auf das Erzeugungspotential von Wasserkraftwerken in einem mesoskaligen Einzugsgebiet in den hohen Tauern <i>Simon Frey, alpS GmbH, Wien</i> .....	352
Einfluss des Klimawandels auf die hydrologischen Prozesse küstennaher Einzugsgebiete, eine Modellstudie <i>Thomas Graeff, Institut für Erd- &amp; Umweltwissenschaften, Universität Potsdam</i> .....	354
Geohydraulische Modellierung eines küstennahen Moorstandortes unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels <i>Anne Hohlbein, Arbeitsgruppe Hydrologie und Meteorologie, Universität Rostock</i> .....	355
Skalierung von ERA-Interim Daten in komplexem Terrain <i>Lu Gao, Universität München</i> .....	357
Modellierung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen – die Quadratur des Kreises? <i>Markus Disse, Institut für Wasserwesen - Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz, Universität der Bundeswehr München</i> .....	358
Neue Fernerkundungsmethoden in der Hydrologie – Flächenhafte Abschätzung der Evapotranspiration mittels eines UAV <i>Philipp Rauneker, Institut für Landschaftswasserhaushalt, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg</i> .....	360
 <b>Posterbeiträge zum Themenbereich 2 "Grenzüberschreitungen"</b>	
Einordnung der extremen Niederschläge in Nordostdeutschland im Juli und August 2011 <i>Konrad Miegel, Institut für Umweltingenieurwesen, Universität Rostock</i> .....	361
Evaluierung von meteorologischen Eingangsdaten für die lokale und großskalige hydrologische Modellierung von Moorstandorten <i>Enrico Frahm, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig</i> .....	363

Aufbereitung und Verifizierung von regionalen Klimaprojektionsdaten für das Ressortforschungsprogramm KLIWAS <i>Florian Imbery, Deutscher Wetterdienst - Zentrales Klimabüro, Offenbach</i> .....	366
Länderübergreifender Binnenhochwasserschutz – ein Leitprojekt für die Metropolregion Hamburg <i>Dieter Ackermann, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Hamburg</i> .....	368
AMICE: erste internationale Modellrechnung der Maas <i>Simone Patzke, Deltares, Delft</i> .....	369
Hochwasservorhersage mit Delft-FEWS in Kopplung mit dem N-A-Modell NASIM <i>Oliver Buchholz, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen</i> .....	371
Kopplung hydrologischer und hydrodynamischer Modelle zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten <i>Alpaslan Yörük, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen</i> .....	373
Hydrologische und hydraulische Ergebnisse eines integrierten Modellierungsansatzes in einem mesoskaligen chinesischen Einzugsgebiet <i>Britta Schmalz, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Kiel</i> .....	375
Konzept einer hydrologischen Systemanalyse als Grundlage eines nachhaltigen Wassermanagements kleiner Einzugsgebiete im Klimawandel <i>Steven Boettcher, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg</i> .....	376
Analyse der Bandbreiten von Modellketten am Beispiel von Klimaprojektionsstudien auf den Wasserhaushalt in einem Teileinzugsgebiet der Spree <i>Anne Gaedeke, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Cottbus</i> .....	377
Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen – Ergebnisse modelltechnischer und hochwasserstatistischer Auswertungen <i>Marlene Gelleszun, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Braunschweig</i> .....	379
Wasserhaushaltsmodellierung der Lausitzer Neiße auf Basis von national unterschiedlichen Datengrundlagen <i>Ina Pohle, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung, Universität Cottbus</i> .....	381
Hydrologische und hydraulische Modellierung als erste Schritte in einem integrierten abiotisch-biotischem Modellkomplex zur Modellierung der Wirkungskette der Wasserrahmenrichtlinie <i>Björn Guse, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Kiel</i> .....	383
Strategien zur Abbildung diffuser Stoffquellen mit beschränkten Datenmengen für die räumlich verteilte ökohydrologische Modellierung in der West-Ukraine <i>Filipa Isabel, Lopes Tavares Wahren, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Technische Universität Dresden</i> .....	384

Ökohydrologische Modellierung eines tidebeeinflussten Einzugsgebietes unter starker anthropogener Nutzung <i>Malte Lorenz, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Braunschweig</i> .....	385
Entwicklung einer gewässermorphologischen Methode zur Bewertung von Fließgewässern auf Teneriffa (Spanien) <i>Katharina Eller, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Kaiserslautern</i> .....	386
Eintragsfunktion und Prognose von Pestiziden mit Umwelttracern <i>Pablo Davila, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	388
Langfristige Veränderung von punktueller und diffuser Stickstoff- und Phosphorbelastung im Einzugsgebiet der oberen Stör <i>Pott Cristiano Andre, Universität Kiel</i> .....	389
Entwicklung und Erprobung eines Phytoplankton-Indexes der biotischen Integrität (P-IBI) für einen deutschen Tieflandbach <i>Naicheng Wu, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Universität Kiel</i> .....	390
Nutzung bestehender Webcam-Infrastruktur zur Messung der mesoskaligen Schneeverteilung in hochalpinen Gebieten – Beispiel Zugspitze <i>Stefan Härer, Department für Geographie, Universität München</i> .....	391
 <b>Posterbeiträge zum Themenbereich 3 "Grenzüberwindung"</b>	
Potential der Zeitraffer-Fotografie zur Beobachtung der räumlichen Verteilung von Schneedeckeneigenschaften <i>Jakob Garvelmann, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg</i> .....	392
Adaptation toolkit for the North Sea Region in a changing climate <i>Helge Bormann, Department Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Wasserwirtschaft, Universität Siegen</i> .....	394
Entwicklung eines Indikatorenkonzepts für das System "Binnenwasserstraße" und für politische Entscheidungsprozesse bei der Anpassung an den Klimawandel <i>Annette Stosius, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz</i> .....	396
Wegweiser zum Studium hydrologischer Extremereignisse an der Elbe und Oder <i>Mathias Deutsch, Geographisches Institut, Universität Göttingen</i> .....	398
Grenzüberwindung bei der Hochwasservorhersage für die Flusssysteme Inn und Donau <i>Alfons Vogelbacher, Amt der Salzburger Landesregierung, Hydrographischer Dienst, Salzburg</i> .....	399

Internetbasierte Informationsplattform für die Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems vom Rhein bis zur Oder <i>Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz</i> .....	400
Austausch von hydrologischen Daten am Beispiel des Messdatenmanagementsystems (MDMS) AquaZIS <i>Gerhard Langstädtler, aqua_plan GmbH, Aachen</i> .....	401
Die Water Research Horizon Conference – Dialogplattform für die Wasserforschung innerhalb der Water Science Alliance <i>Roland Barthel, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig</i> .....	403
Ensemblesimulationen in Visdom – Entscheidungshilfe durch visuelle Interaktion <i>Jürgen Waser, VRVis, Wien</i> .....	404
Konzeption wasserwirtschaftlicher Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel auf kommunaler und regionaler Ebene <i>Heide Stephani-Pessel, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)</i> .....	406
Harmonisierungsbedürftige Umweltqualitätsnormen als flussgebietsübergreifende Feststoffwerte im Fokus patentrechtlicher Lösungsvorschläge <i>Hans-Jürgen Ulonska, Erfurt, Deutschland</i> .....	408
Erschienenene Hefte der Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung ..	410



# Hydrologie mit Grenzen – Grenzen der Anwendung von Klimamodellsimulationen in hydrologischen Modellen

Jan Seibert<sup>1,2,3</sup>, Claudia Teutschbein<sup>3</sup> und Nans Addor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geographisches Institut, Universität Zürich, Schweiz

<sup>2</sup> Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden

<sup>3</sup> Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University, Sweden

There is an increasing number of studies evaluating the potential effects of a changed climate on hydrology. Increasingly advanced modelling techniques are used, but in most studies there still is a focus on assessing annual and seasonal flows only. We argue that there is a strong need to move forward to assessing also changes in runoff variability. Decision making on appropriate mitigation and adaptation strategies requires assessing the potential changes in frequencies and magnitude of extreme events such as floods and droughts. At the same time, there are clear limitations due to the reliability of climate models, especially for precipitation simulations.

Global Circulation Models (GCMs) are usually used to derive future climate scenarios based on certain assumptions on future emissions of greenhouse gases. Due to their coarse resolution GCMs can only give averages over large areas, and variables such as precipitation at regional or local scales are insufficiently modelled by the present generation GCMs [*Ines and Hansen, 2006; IPCC, 2001*]. Regional Climate Models (RCMs) are increasingly used to provide more detailed climate change scenarios for hydrological impact studies [*Teutschbein and Seibert, 2010*].

Until recently, most hydrological impact studies were based on GCM simulations. However, as the resolution of these models was, and still is, much coarser than the typical catchment size, downscaling is necessary. Instead of the traditionally used statistical downscaling, RCMs allow a dynamic downscaling to capture climate processes at local scale. RCMs, also referred to as Limited-Area Models (LAMs), produce high spatial and temporal resolution climate information. Coarse-grid GCM simulation output is used for initial and lateral boundary conditions, thus a one-way nesting approach is applied to retrieve high-resolution climatic variables. RCMs can be run in two ways to reproduce current conditions: (1) using current condition GCM simulations as boundary conditions and (2) using reanalysis data (e.g., ERA-40) data as boundary conditions. In the latter case any potential error due to erroneous GCM simulations is eliminated, which allows a direct validation of the RCM simulations.

Most RCMs provide hydrological variables such as surface and subsurface runoff. While it has been stated that RCM simulated surface runoff might not agree well with observations (Evans, 2003), there are only a few studies which actually compared RCM streamflow with observed streamflow. These few studies indicated that runoff is not reliably simulated by RCMs (Giorgi et al., 1994; Hagemann et al., 2004, Kleinn et al. 2005). For five Swedish catchments the seasonal runoff variation simulated by different ERA-40 driven RCM deviated considerably from observation (Fig. 1) [*Teutschbein and Seibert, 2010*]. For this reason, instead of using hydrological variables from the RCMs directly, it is rather common to use their detailed climate information to force hydrological models to simulate river runoff in offline-mode.

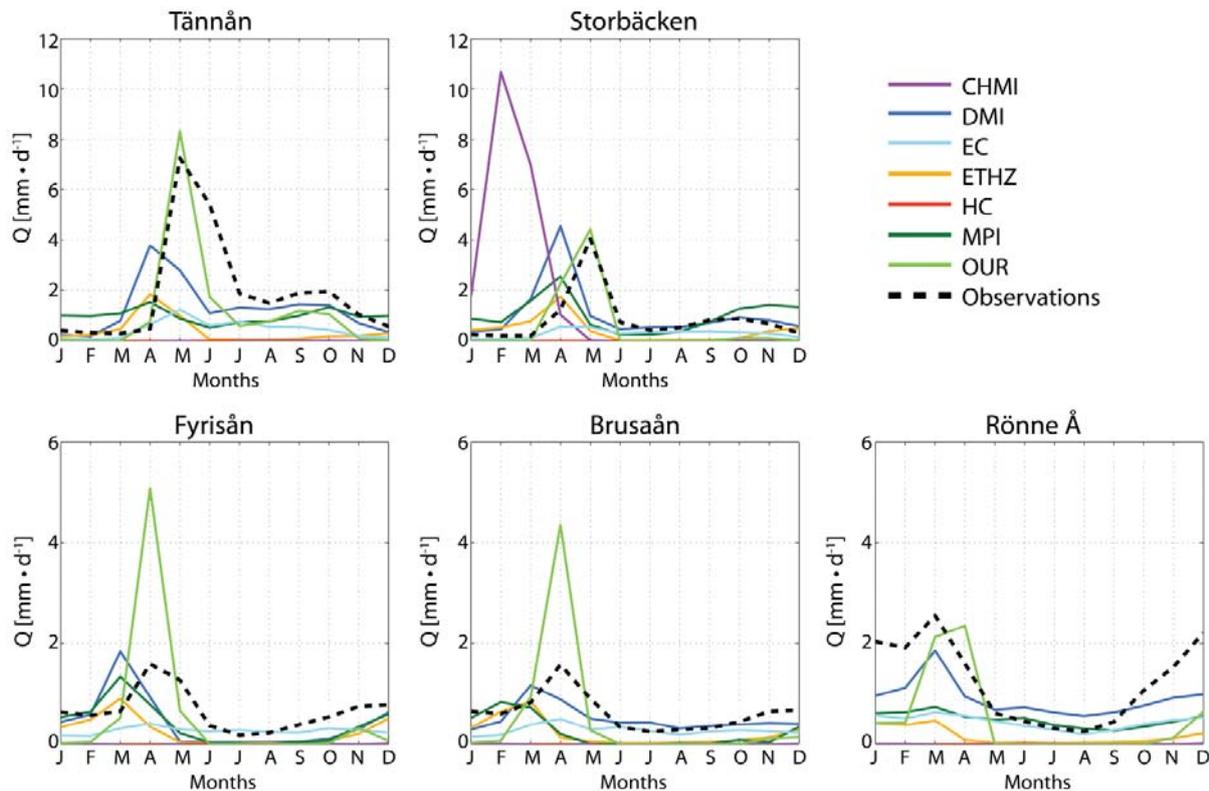


Figure 1: Seasonal surface runoff (average 1961-1990) simulated directly by a set of ERA-40 driven RCMs in comparison with observations. In the ENSEMBLES database the surface runoff field was only available for download for seven out of the 14 suitable RCMs. Note the different scales in each row of the diagram (from [Teutschbein and Seibert, 2010])

The most commonly used approach to compile future climate series for hydrological modelling is the so called delta change or perturbation approach. This means that differences from the control and scenario simulations of the climate model for the relevant climate variables (usually precipitation, temperature and evapotranspiration) are compiled and then used to modify the observed climate to generate scenario input to the hydrological model (Fig. 2a). While this approach is straight-forward and by definition preserves the properties of the observed baseline climate, the delta change approach has its drawbacks mainly because of the aggregation of the predicted changes into simple perturbation operations. This approach does not change the variability of the climate time series but rather changes the observed data by adding constant (temperature) or multiplying with a factor (precipitation, evaporation). Consequently, the number of rainy days, for instance, will not change for any climate scenario and extreme precipitation events are changed by the same factor as minor precipitation events. Also, any covariance of changes in different climate variables is neglected. More advanced delta change approaches might be used with perturbation operations being a function of season or, for instance, precipitation intensity. However, as we want to extract more and more details from the differences between control and scenario simulations, it might be more appropriate to use the output from RCMs directly. This is possible since the quality of RCM simulations has been improved considerably recently, even if some adjustment of the RCM simulations still is needed. This approach is often called scaling-approach (Fig.2b)

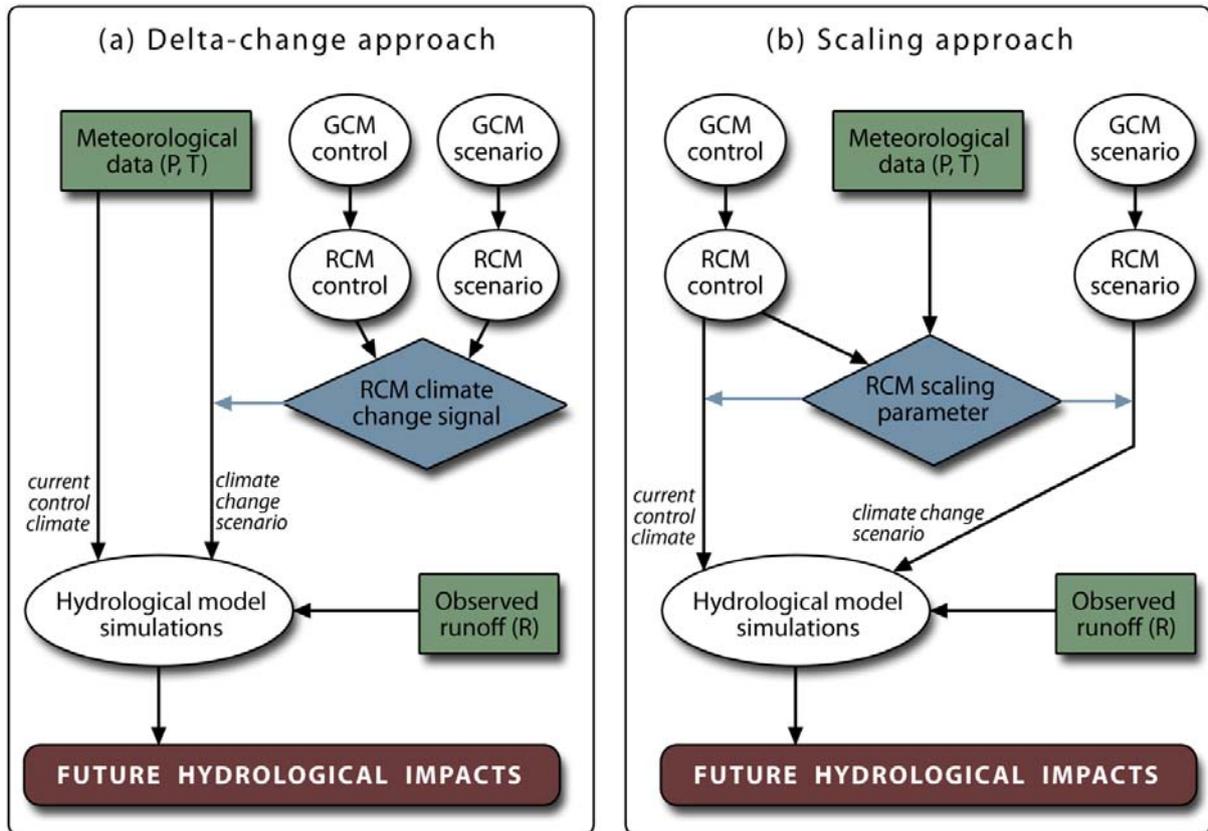


Figure 1: RCM bias correction scheme for (a) the Delta-change approach and (b) the Scaling approach. (from [Teutschbein and Seibert, 2010])

The output of RCMs for the control run often has been found to agree reasonably well with current observations (e.g., for precipitation [Frei et al., 2003] and in some hydrological studies the RCM simulations have been used directly [Dankers and Christensen, 2005]. More often, however, the integrated catchment-scale assessment of the RCM might reveal problems with the RCM simulations, and inconsistencies of the RCM control runs and observed data have been found when using the RCM simulations for catchment scale modelling and bias corrections had to be used [Andréasson et al., 2004; Graham et al., 2007; Hay et al., 2002; Kunstmann et al., 2004; Lucarini et al., 2007; van den Hurk et al., 2005]. These results were reinforced when we were using precipitation and temperature from different RCM for runoff simulations in five Swedish catchments [Teutschbein and Seibert, 2010]. This study focused on the effect of errors in precipitation simulations and, therefore, simulated temperature was bias-corrected using monthly correction values. While the annual precipitation from the RCM simulations was mainly within 10% of the observations and also monthly values were mainly within +/- 30% of the observations, the simulated seasonal runoff differed by up to 100 per cent from the observations (Figure 1a). It should be noted that the seasonal runoff was simulated almost perfectly when the hydrological model was run using observed meteorological variables, i.e. the large errors could be attributed to the errors in the RCM simulations. This again clearly demonstrated that some adjustment or scaling is needed before RCM data can be used for hydrological modelling.

While the resolution of RCMs typically agrees with the size of meso-scale catchments (i.e., ~10-10 000 km<sup>2</sup>), and downscaling should, thus, not be necessary, therefore some form of bias correction is usually needed, because climate models often provide biased representations of observed time series due to systematic model errors caused by imperfect knowledge and/or representation of physical processes, limitations in conceptualization, discretization and spatial averaging within grid cells. Typical biases include e.g. too many wet days with low-intensity rain or incorrect estimation of extreme temperature in RCM simulations [Ines and Hansen, 2006]. A bias in RCM-simulated variables can lead to unrealistic hydrological simulations of river runoff and, thus, application of bias-correction methods is recommended. The term ‘bias correction’ describes the process of scaling climate model output in order to account for systematic errors in the climate models. The basic principle is that biases between observed climate time series and observations are identified and then used to correct both control and scenario runs. A main assumption is that the same bias correction applies to control and scenario conditions.

An often used bias-correction method is the use of monthly scaling factors. These factors ensure that the long-term annual variation of precipitation corresponds exactly to the observations and, thus, also the simulated seasonal runoff variation is usually greatly improved. However, this does not mean that the hydrological impact simulations are reliable in other aspects. This was tested by comparing the simulated frequency distribution of annual maximum flows, after the bias-correction, with observed data. While the runoff model using observed climate data was able to reasonably well reproduce the observed maximum flows of different return periods, the higher annual maximum flows (return period of 3-10 years) were largely underestimated when using the time series from the RCMs even after the monthly scaling described above (Figure 2). When using the RCM based on the HadAM3H GCM boundary conditions there was one large event which compared well with the observed maximum flow (i.e. the one highest values), while the use of the ECHAM/OPYC3 boundary resulted in runoff simulations which during the entire 30-year simulation period never exceeded the observed ~3 year flood event. Similar results were recently obtained for a catchment in Ireland [Semmler, 2007] .

Dibike and Coulibaly [2007] also found that hydrological simulations were not fully satisfactory when the models were run using downscaled precipitation and temperature time series. They concluded that *“before starting any [...] climate change impact study, the appropriateness of both the downscaled meteorological variables and the hydrological simulation models have to be validated based on their performance in simulating the historical flows in the watershed corresponding to the baseline climate condition.”* To follow this recommendation we used a differential split-sample test approach, which highlighted challenges when the climate-hydrological model chain is used to simulate changed conditions. We found that bias corrections methods are not always reliable when used on periods different from those used to parameterize the bias-correction. We further present preliminary results from Switzerland. Given the importance of topography for climatic conditions in Switzerland, the low resolution of RCMs is an important issue, and we could relate RCM simulation errors directly to the topography and weather patterns.

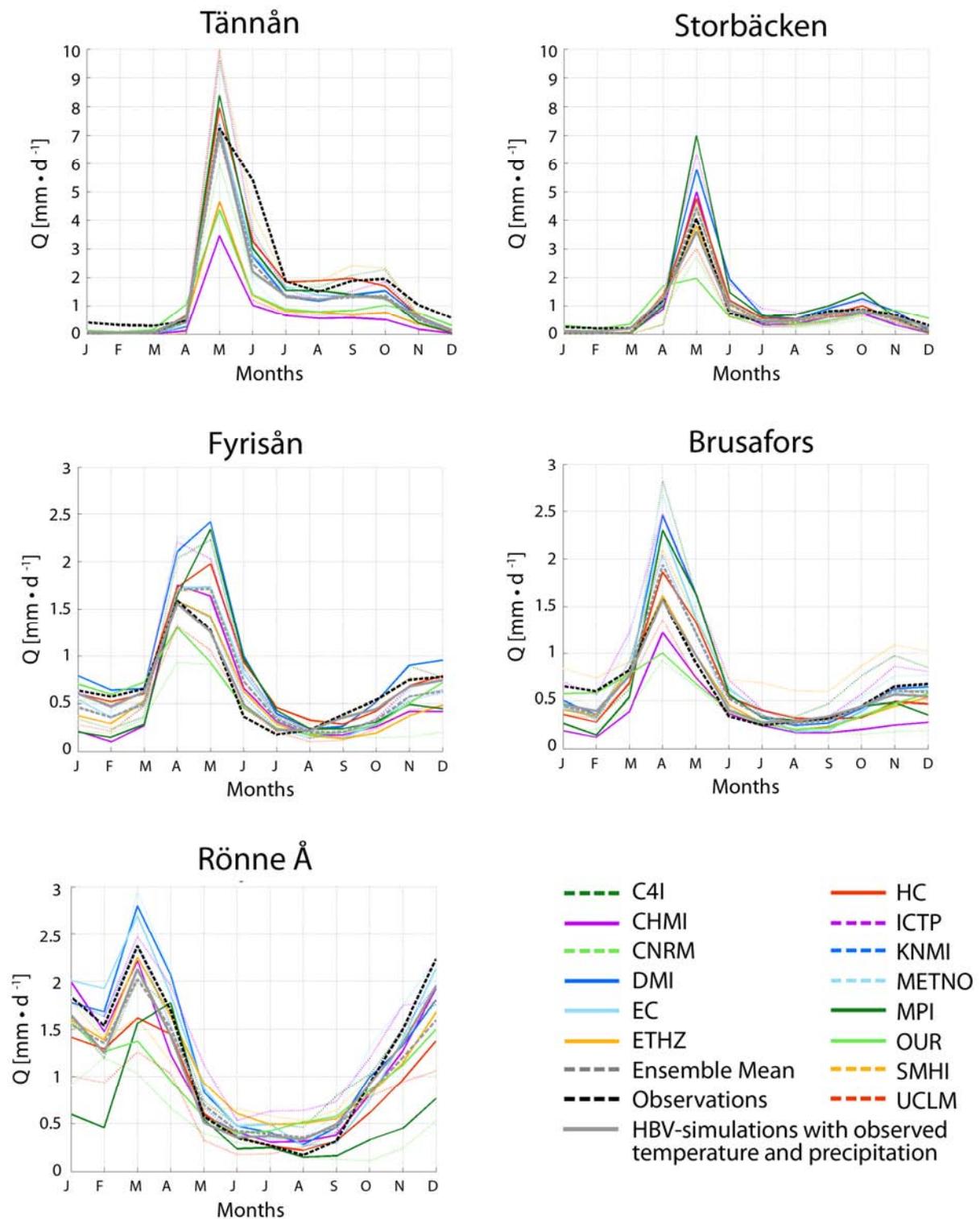


Figure 3: Mean HBV-simulated runoff from an RCM ensemble (30 yr averages). Note the different scale for the two northernmost catchments (upper row) (from [Teutschbein and Seibert, 2010])

## References

- Andréasson, J., S. Bergström, B. Carlsson, L. P. Graham, and G. Lindström (2004), Hydrological Change–Climate Change Impact Simulations for Sweden, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(4), 228-234.
- Dankers, R., and O. B. Christensen (2005), Climate Change Impact on Snow Coverage, Evaporation and River Discharge in the Sub-Arctic Tana Basin, Northern Fennoscandia, *Climatic Change*, 69(2), 367-392.
- Dibike, Y. B., and P. Coulibaly (2007), Validation of hydrological models for climate scenario simulation: the case of Saguenay watershed in Quebec, in press.
- Frei, C., J. H. Christensen, M. Deque, D. Jacob, R. G. Jones, and P. L. Vidale (2003), Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, 108(10.1029).
- Graham, P., J. Andréasson, and 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*, in press.
- Hay, L. E., M. P. Clark, R. L. Wilby, W. J. Gutowski Jr, G. H. Leavesley, Z. Pan, R. W. Arritt, and E. S. Takle (2002), Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations, *Journal of Hydrometeorology*, 3(5), 571-590.
- Ines, A. V. M., and J. W. Hansen (2006), Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, *Agricultural and forest meteorology*, 138(1-4), 44-53.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]*, 881 pp., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kunstmann, H., K. Schneider, R. Forkel, and R. Knoche (2004), Impact analysis of climate change for an Alpine catchment using high resolution dynamic downscaling of ECHAM 4 time slices, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1030-1044.
- Lucarini, V., R. Daniluk, I. Kriegerova, and A. Speranza (2007), Does the Danube exist? Versions of reality given by various regional climate models and climatological datasets, *Journal of Geophysical Research*, in press.
- Semmler, T., Wang, S., McGrath, R., Nolan, P. (2007), Regional climate ensemble simulations for Ireland - impact of climate change on river flooding, paper presented at Proceedings of the National Hydrology Seminar, Tullamore.
- Teutschbein, C., and J. Seibert (2010), Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: A review of recent modeling strategies, *Geography Compass*, 4(7), 834-860.
- van den Hurk, B., M. Hirschi, C. Schär, G. Lenderink, E. van Meijgaard, A. van Ulden, B. Rockel, S. Hagemann, P. Graham, and E. Kjellström (2005), Soil Control on Runoff Response to Climate Change in Regional Climate Model Simulations, *Journal of Climate*, 18(17), 3536-3551.

# **Zweitausend Jahre Ökoklimatologie – von Aristoteles bis zu bioklimatischen Feedbacks**

Markus Reichstein

Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Deutschland

In diesem Vortrag wird ein Überblick über Fortschritte im Bereich der Ökoklimatologie und Ökohydrologie gegeben, und aktuelle Probleme und wichtige zukünftige Forschungsfragen aufgezeigt.

Im Besonderen werden die folgenden Entwicklungen diskutiert und mit Forschungsbeispielen belegt:

- von philosophischen und phänomenologischen zu prozess-basierten Ansätzen
- von statischen zu dynamisch-adaptiven Konzepten
- von linearen zu nicht-linearen Modellen
- von "Impact" zu "Feedback-orientierten" Sichtweisen
- von Mittelwertklimatologie zu Ansätzen die Klimavariabilität und Extreme berücksichtigen
- und von vegetationszentrierter zu ökosystemarerer Forschung.

Dabei wird insbesondere die Wichtigkeit einer stärkeren Integration von Monitoring, experimentellen und Modellierungsansätzen hervorgehoben, um neue Einsichten in die hoch-aktuellen Fragestellungen der Ökoklimatologie und Ökohydrologie zu bekommen.



# Ein landnutzungssensitives Bodenmodell für die meso- und makroskalige Wasserhaushaltsmodellierung

Phillip Kreye, Marlene Gelleszun und Günter Meon

Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Leichtweiß-Institut für Wasserbau,  
Technische Universität Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Es wurde das für die Meso- bis Makroskala geeignete, physikalisch-orientierte Bodenwasserspeichermodell DYVESOM (Dynamic Vegetation Soil Model) entwickelt, als Komponente in das Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI implementiert und getestet. Für die Berechnung der Teilströme wurden drei vertikale Speicher angenommen. Direktabfluss wird durch einen modifizierten SCS-Ansatz berechnet. Für die Wasserbereitstellung aus den oberen Bodenspeichern zur Evapotranspiration wird eine simulierte Wurzeldichte verwendet, welche aus einer abgeleiteten Größe des GSI (Growing Season Index) berechnet wird. Der GSI ermöglicht eine Simulation der Vegetationsphasen in Abhängigkeit von meteorologischen Eingangsgrößen. Der unterste Bodenspeicher von DYVESOM wird von Transpirationsprozessen nicht direkt beeinflusst, dadurch lässt sich die den Speicher verlassende Sickerwassermenge als Grundwasserneubildung interpretieren.

Der simulierte Wassergehalt des untersten Speichers korreliert mit beobachteten Grundwasserpegelständen sehr gut ( $R > 0.75$ , Modelleffizienz  $> 0.6$ ). Dies plausibilisiert die im Modell abgebildete Interaktion von Oberflächen-, Boden- und Grundwasser. In der praktischen hydrologischen Anwendung liefert DYVESOM sehr gute Ergebnisse. In Vergleichen mit einem bewährten konzeptionellen Bodenspeicher-Ansatz, der sowohl in der Hochwasservorhersage als auch in der Klimafolgenforschung in Niedersachsen erfolgreich eingesetzt wird, zeigen die Resultate mit DYVESOM ähnliche bis höhere Modellgüten für unterschiedliche Pegelzugsgebiete. Die langjährigen Monatsmittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten werden insgesamt verbessert wiedergegeben.

## Einleitung

Das umfangreiche Spektrum der hydrologischen Prozesse fordert zunehmend Interdisziplinarität für eine Verbesserung der Wasserhaushaltssimulation. Die Modellierung der Abflussbildung ist in meso- bis makroskaligen Modellgebieten mit rein physikalischen Ansätzen eine große Herausforderung, weil die Eingangsdaten, insbesondere die heterogen verteilten bodenhydraulischen Eigenschaften, oft nur in grober Auflösung verfügbar sind. In der meso- bis makroskaligen Wasserhaushaltsmodellierung wird die Abflussbildung daher oft durch konzeptionelle oder physikalisch orientierte Ansätze abgebildet.

Ein häufig verwendeter Ansatz zur Abschätzung des Direktabflusses ist das empirische SCS-Verfahren. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass der Abflussbeiwert dem Verhältnis von kumulativer Infiltration zur maximalen Retention  $S_{max}$  gleichgesetzt werden kann.  $S_{max}$  wird im SCS-Ansatz durch die sog. Curve Number  $CN$  berechnet, in welche u.a. Landnutzung und Durchlässigkeit der Böden eingehen. Das ursprüngliche SCS-Verfahren wurde für einzelne Niederschlagsereignisse entwickelt und eignet sich nicht für Kontinuumsimulationen. Modifikationen des ursprüngli-

chen SCS-Ansatzes ermöglichen Langzeitsimulationen. So hängt beispielsweise im Soil & Water Assessment Tool (SWAT) der Term  $S_{max}$  vom simulierten Wassergehalt des gesamten Bodenprofils ab (Neitsch, 2009). Sahu et al. (2007) haben Kontinuumsimulationen durch eine Beziehung von der Anfangsbodenfeuchte und der Infiltration des vorherigen Ereignisses erreicht. Mishra et al. (2003) berechnen die  $CN$  in Abhängigkeit von bodenphysikalischen Größen wie beispielsweise der Bodenwassergehalt oder die Sorptivität, wozu Feldmessungen notwendig sind.

### Das Bodenwasserspeichermodell DYVESOM (Dynamic Vegetation Soil Model)

Das Bodenwasserspeichermodell DYVESOM wurde für hydrologische Simulationen in der Meso- bis Makroskala entwickelt und als Komponente in das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI (Riedel et al., 2011 und Kreye et al., 2010) integriert. PANTA RHEI wird mit dem bewährten Ansatz zur Abflussbildung in nationalen und internationalen Projekten zur Hochwasservorhersage und Klimafolgenforschung erfolgreich angewendet.

Das Bodenwasserspeichermodell DYVESOM ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Der vertikale Wasseraustausch in der ungesättigten Zone mit den Prozessen Infiltration, Perkolation und kapillarem Aufstieg wurde u.a. durch die Verwendung der matrixpotentialabhängigen Darcy-Buckingham Beziehung realisiert (z.B. in Jury und Horton, 2004). Der Bestandsniederschlag ( $N_{interz.}$ ) bildet nach der Passage des Interzeptions-Moduls von PANTA RHEI den Input für das Bodenmodell. Die Retentionsbeziehungen der drei Bodenspeicher werden mit Hilfe der Bodenübersichtskarte 1:50.000 und der Software Rosetta Lite 2003 (Schaap et al., 2001) durch Transferfunktionen nach van Genuchten (1980) parametrisiert. Die Mächtigkeit des oberen Speichers wird pauschal mit 30 cm angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass der Wassergehalt der obersten Bodenschicht ausschlaggebend für die Infiltrationsrate ist. Dieser Wassergehalt fließt ebenfalls als Randbedingung in den modifizierten SCS-Ansatz ein (Gleichung (1)). Die Mächtigkeiten der *Speicher 2* und *Speicher 3* werden durch die Durchwurzelungstiefe landnutzungsabhängig auf Hydrotopbasis angepasst.

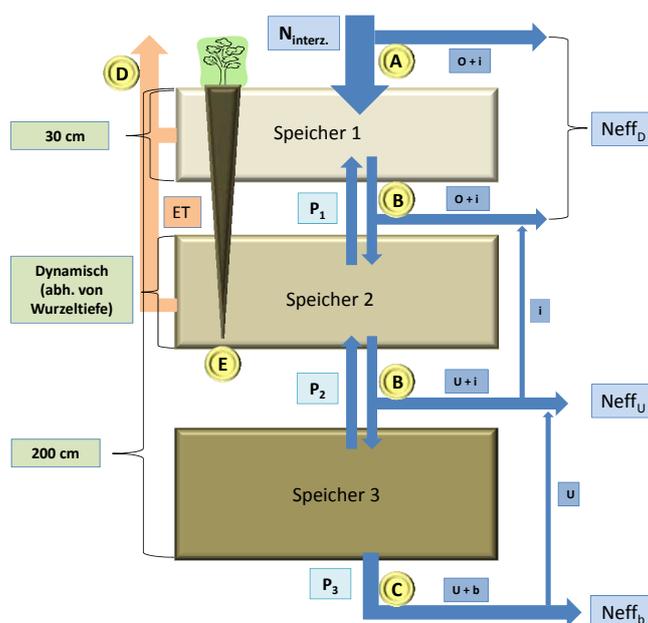


Abb. 1: Schematische Übersicht des Bodenmodells DYVESOM. A = Aufteilung Direktabfluss/Infiltration. B = Perkolation/kapillarer Aufstieg sowie laterale Abflusskomponente. C = Ausfluss aus unterstem Speicher, Grundwasserneubildung. D = Evapotranspiration mit dynamischen Anteil aus

Speicher 1 und 2, abhängig vom GSI (Growing Season Index). E = mittlere Durchwurzelungstiefe, abhängig von der Landnutzung.

$$An_{Inf} = \frac{(2 \cdot (S_{1max} - S_1) - CN_{Term} + MP_{Term})}{(N_{sum} - V_{sum,t}) + (2 \cdot (S_{1max} - S_1) - CN_{Term} + MP_{Term})} \quad (1)$$

Mit:	$An_{Inf}$	Prozentualer Anteil der Infiltration am Niederschlag = 1 - Abflussbeiwert	-
	$S_1$	Wasserinhalt von <i>Speicher 1</i>	mm
	$S_{1max}$	Maximaler Wasserinhalt von <i>Speicher 1</i>	mm
	$CN_{Term}$	Term abhängig von der Curve Number	mm
	$MP_{Term}$	Kalibrierungsparameter	mm
	$N_{sum}$	Kumulative Niederschlagssumme	mm
	$V_{sum,t}$	Kumulative Verlustsumme im aktuellen Zeitschritt	mm

Die ursprünglich von Riedel (2004) eingeführte und hier neu konzipierte Verlustsumme  $V_{sum,t}$  wird in jedem Berechnungsschritt bestimmt und ermöglicht eine Kontinuumsimulation unabhängig von der Zeitschrittlänge:

$$V_{sum,t} = V_{sum,t-1} + Ab_{Rate} \quad (2)$$

Wobei:  $Ab_{Rate} = (N_{sum} - V_{sum,t-1}) \cdot Ab_{Term}$

$$Ab_{Term} = 0,02 + Ab_{Faktor} \cdot 0,01 - (2(S_{1max} - S_1))^{-0,6} \cdot \frac{350 - 2(S_{1max} - S_1)}{300}$$

Mit:	$V_{sum,t}$	Kumulative Verlustsumme im aktuellen Zeitschritt	mm
	$V_{sum,t-1}$	Kumulative Verlustsumme des vorherigen Zeitschritts	mm
	$Ab_{Rate}$	Abtrocknungsrate	mm
	$Ab_{Term}$	Abtrocknungsterm	mm
	$N_{sum}$	Kumulative Niederschlagssumme	mm
	$Ab_{Faktor}$	Kalibrierungsparameter	-

Die nach Penman-Monteith berechnete Evapotranspiration wird nach Feddes (z.B. in Utset et al., 2000) in Abhängigkeit der Matrixpotentiale der oberen Speicher reduziert. Die aktuelle Evapotranspiration wird ausschließlich aus *Speicher 1* und *Speicher 2* entnommen. Das Wasser in *Speicher 3* kann kapillar aufsteigen oder als Grundwasserneubildung aussickern (Unit Gradient RB).

Die prozentualen Anteile an der gesamten Evapotranspiration für *Speicher 1* und *2* werden von einer dynamischen Wurzeldichte in Abhängigkeit vom simulierten Growing Season Index (*GSI*) gestellt. Der *GSI* ist eine aus Klimavariablen einfach zu berechnende Größe und dient als normiertes Maß für die Aktivität der Vegetation im Jahresverlauf (Jolly et al., 2005). Förster et al. (2012) haben die Gültigkeit dieses Ansatzes für die betrachteten Einzugsgebiete in Niedersachsen validieren können. In Gleichung (3) wird der prozentuale Anteil der Evapotranspiration an *Speicher 1* mit der Tiefe beschrieben. In Abb. 2 ist Gleichung (3) für verschiedene *GSI*-Werte für zwei unterschiedliche Gesamttiefen der Wurzeln graphisch dargestellt.

$$G(z) = 100 \cdot \frac{\left( z - k \cdot z \left( \frac{z}{Z_{Ges}} \right)^{0,15} \right)}{(1 - k) \cdot Z_{Ges}} \quad \text{Wobei: } Z_{Ges} = dz1 + dz2 \cdot GSI^2 \quad (3)$$

Mit:	$G(z)$	Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an <i>Speicher 1</i> in Abhängigkeit der Tiefe	%
	$GSI$	Growing Season Index	-
	$k$	Koeffizient (= 0,8)	-
	$Z_{Ges}$	Gesamt-Wurzeltiefe	cm
	$z$	Tiefe	cm
	$dz1$	Mächtigkeit <i>Speicher 1</i>	cm
	$dz2$	Mächtigkeit <i>Speicher 2</i>	cm

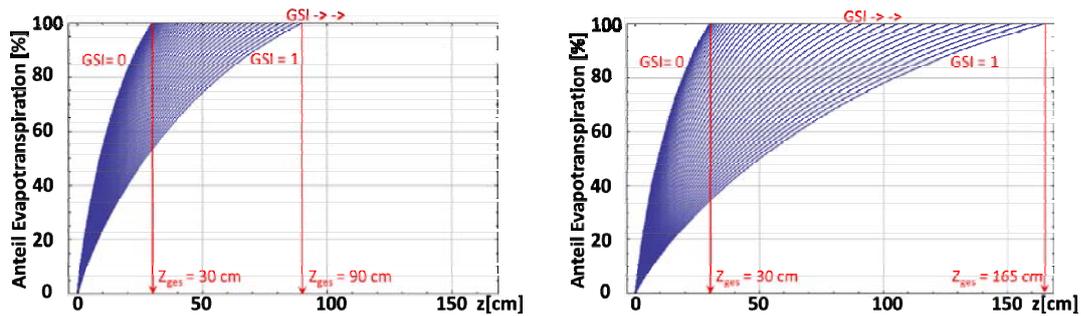


Abb. 2: Prozentualer Anteil der Evapotranspiration an *Speicher I* in Abhängigkeit von der Tiefe  $z$  (Gl. (3)) für verschiedene  $GSI$ . Links: Gesamttiefe der Wurzeln = 90 cm, Rechts: Gesamttiefe = 165 cm.

## Ergebnisse

Abb. 3 (links) zeigt das Modellgebiet der Unterweser, welches als Untersuchungsgebiet für das KLIFF Teilprojekt „A-KÜST“ dient. Gewässerpegel sind in Abb. 3 als grüne Dreiecke und Grundwasserpegel sind als rote Punkte eingetragen. Mit DYVESOM wurden unterschiedliche Gebiete im „A-KÜST“ und im Einzugsgebiet der Aller analysiert. Zum A-KÜST Gebiet gehört auch das Einzugsgebiet der Wümme bis zum Pegel Hellwege ( $A = 907 \text{ km}^2$ ,  $MQ (1966-2000) = 9,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $PNP = 12,3 \text{ m}$ ), Abb. 3 rechts.

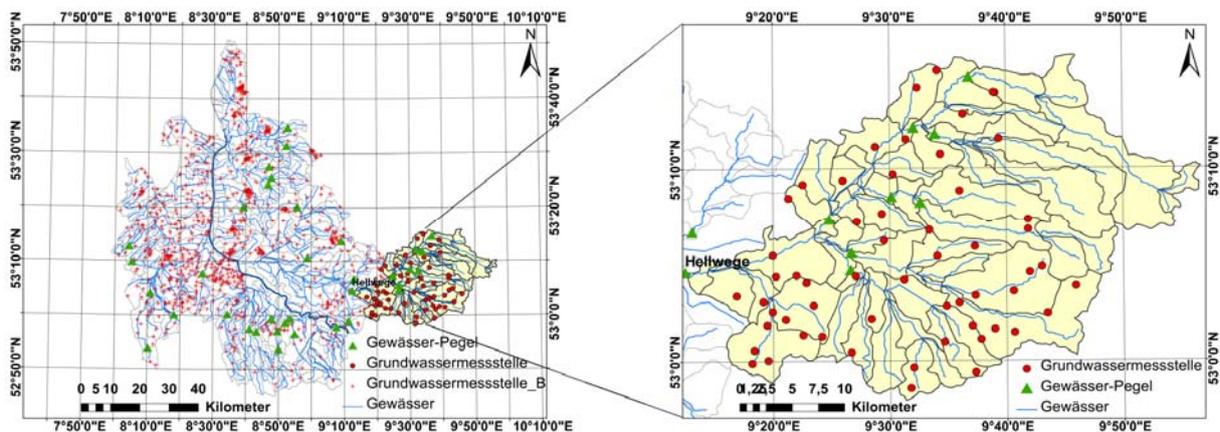


Abb. 3: Übersichtskarte des Modellgebiets der Unterweser.

Die Gang- und Summenlinien des beobachteten und mit PANTA RHEI simulierten Abflusses für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum (1971-81 bzw. 1981-91) am Pegel Hellwege sind in Abb. 4 auf der rechten Seite dargestellt. Die Modelleffizienz ist mit  $E = 0,76$  als gut zu bezeichnen, auch die monatlich Wasserbilanz wird gut wiedergegeben.

Der Wassergehalt  $\theta_3$  von *Speicher 3* wird nicht direkt von Transpirationsprozessen beeinflusst (siehe Abb. 1). Mit dem kalibrierten Modell wurde eine Zeitreihe des simulierten  $\theta_3$  auf Stundenbasis ausgegeben. Im Pegelgebiet Hellwege existieren 69 Grundwassermessstellen (siehe Abb. 3 rechts) mit langen Zeitreihen der Pegelstände des oberen Grundwasserstockwerks. Aus diesen Daten wurden kontinuierliche Zeitreihen auf Tagesbasis interpoliert und anschließend durch arithmetische Mittelung eine Ganglinie des mittleren Grundwasserstands im Pegelgebiet Hellwege berechnet (Abb. 4 links). Durch eine lineare Transferfunktion mit  $\theta_3$  als Variable konnte eine approximierte mittlere Grundwasserstandsganglinie erzeugt werden (Abb. 4 links). Die Modelleffizienz ist mit  $E = 0.63$  sehr

gut, wenn bedacht wird, dass der simulierte Grundwasserstand mit einem hydrologischen Modell auf der Mesoskala erzeugt wurde.

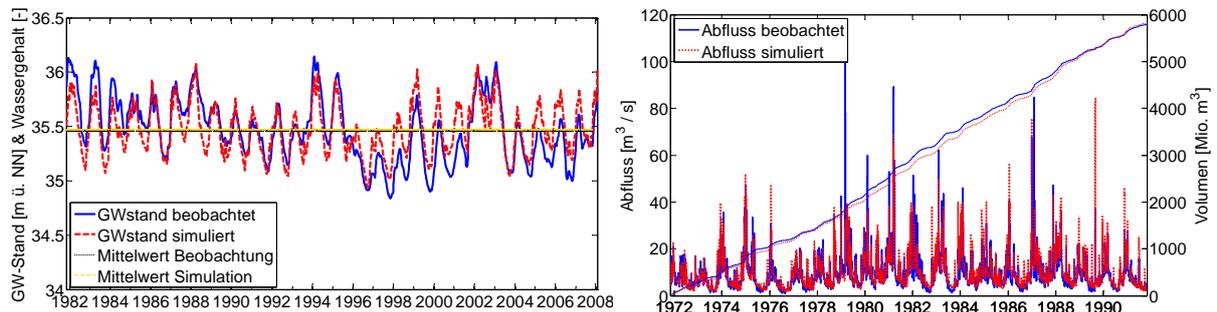


Abb. 4: Links: Beobachteter (arith. Mittel von 69 Grundwasserpegeln, siehe Abb. 3) und approximierter mittlerer Grundwasserstand für den Zeitraum 1982-2008 ( $R = 0.79$ ,  $E = 0.63$ ). Rechts: Beobachteter und simulierter Abfluss für den Zeitraum 1971-1991 ( $R = 0.87$ ,  $E = 0.76$ ).

Abb. 5 zeigt den Vergleich zwischen den langjährigen (1971-1991) Monatsmitteln des beobachteten und mit zwei unterschiedlichen Ansätzen simulierten Abflusses am Pegel Hellwege (links) und am Pegel Glentorf (rechts). PANTA RHEI wurde zum einen mit dem bewährten Ansatz („mod. SCS“) und mit DYVESOM zur Berechnung der Abflussbildung kalibriert. Der bewährte Ansatz erlaubt eine Kontinuumsimulation mit dem SCS-Verfahren durch eine bodenfeuchteabhängige Curve Number (Riedel, 2004). Es wird jedoch kein volumetrischer Wassergehalt des Bodens approximiert, sondern eine kontinuierliche Bilanzierung ohne bodenhydraulische Parameter durchgeführt.

Der Pegel Glentorf ( $A = 296 \text{ km}^2$ ,  $MQ (1966-2000) = 1,56 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $PNP = 85,55 \text{ m}$ ) liegt im Einzugsgebiet der Aller an der Schunter. Das Pegelgebiet Glentorf weist zum größten Teil feinkörnige Böden (28% SI, 24% Lt, 16% Ls, 15% Ut, 17% Sonst.) und Acker als dominante Landnutzung (53% Acker, 24% Wald, 10% Grünland, 13% Sonst.) auf. Das Pegelgebiet Hellwege weist zum größten Teil grobkörnige Böden (69% S, 14% Ls, 17% Sonst.) und Acker sowie Grünland als dominante Landnutzungen (36% Acker, 31% Grünland, 23% Wald, 10% Sonst.) auf. In beiden Fällen kann der Wasserhaushalt mit einer hohen Modellgüte wiedergegeben werden. Auf Tagesbasis berechnet ist  $E = 0.76$  und  $E = 0.70$  mit DYVESOM für Hellwege bzw. Glentorf, während der bewährte Ansatz  $E = 0.66$  und  $E = 0.75$  erreicht. Im März liegt DYVESOM bei beiden Pegeln zu niedrig, während der bewährte Ansatz eine sehr hohe Übereinstimmung erreicht. Am Pegel Glentorf erreicht DYVESOM in allen anderen Monaten eine höhere Übereinstimmung, am Pegel Hellwege ebenfalls in den meisten Monaten. Besonders während des Niedrigwassers gibt DYVESOM den Wasserhaushalt verbessert wieder.

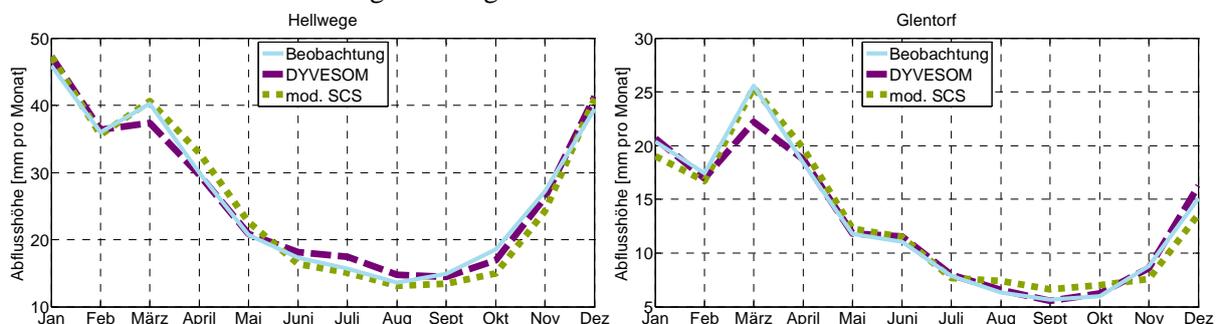


Abb. 5: Mittlere monatliche Abflüsse (1971-91) der Beobachtung und der Simulation mit DYVESOM und dem bewährten Ansatz (mod. SCS) für die Pegel Hellwege (links) und Glentorf (rechts).

## Schlussfolgerungen

In der praktischen Anwendung liefert DYVESOM besonders in Vegetationsphasen sehr gute Ergebnisse. Vergleiche mit einem bewährten Ansatz zeigen, dass die Resultate mit DYVESOM ähnliche bis höhere Modellgüten für unterschiedliche Pegelzugsgebiete erzielen. Die langjährigen Monatsmittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten können verbessert wiedergegeben werden. Der *GSI* kann mit meteorologischen Parametern aus Klimaszenarien kontinuierlich berechnet werden. Durch diese Rückkopplung mit der Vegetation in Kombination mit der Landnutzung sind somit auch aussagekräftige Wasserhaushaltsimulationen für Klimaszenarien möglich.

Der simulierte Wassergehalt des untersten Speichers korreliert mit den beobachteten Grundwasserspiegelständen sehr gut. Dies plausibilisiert die im Modell abgebildete Interaktion von Oberflächen-, Boden- und Grundwasser. Für Simulationen mit Klimaszenarien erlaubt diese Korrelation eine Aussage über Grundwasserstandsänderungen der Zukunft. Für Simulationen mit historischen Abflussdaten könnten vorhandene Daten über Grundwasserstände eine zusätzliche Größe für die Kalibrierung darstellen.

## Literatur

- Förster, K., M. Gelleszun und G. Meon (2012): A Weather dependent approach to estimate the annual course of vegetation parameters for water balance simulations on the meso- and macroscale. *Adv. Geosci.* (Submitted).
- Jolly, W. M., R. Nemani und S. W. Running (2005): A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biol.* (11), 619–632.
- Jury, W. A. und R. Horton (2004): Soil physics. J. Wiley, Hoboken, NJ.
- Kreye, P., Gocht, M. und K. Förster (2010): Entwicklung von Prozessgleichungen der Infiltration und des oberflächennahen Abflusses für die Wasserhaushaltsmodellierung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (5).
- Mishra, S. K., V. P. Singh, J. J. Sansalone und V. Aravamuthan (2003): A modified SCS-CN Method: Charakterization and Testing. *Water Resources Management* (17), 37–68.
- Riedel, G. (2004): Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Riedel, G., Förster, K., Meon, G., Lange, S., Lichtenberg, T. und M. Anhalt (2011): Panta Rhei – Modellsystem für Forschung und Praxis (Posterbeitrag), Tag der Hydrologie, Wien.
- Sahu, R. K., S. K. Mishra, T. I. Eldho und M. K. Jain (2007): An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method. *Hydrological Processes* (21), 2872–2881.
- Schaap, M. G., van Leij, J. F. und M. T. van Genuchten (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* (251), 163–176.
- Utset, A., M. E. Ruiz, J. Garcia und R. A. Feddes (2000): A SWACROP-based potato root water-uptake function as determined under tropical conditions. *Potato Research* (43), 19–29.
- van Genuchten, M. T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* (44), 892–898.

# Neue Möglichkeiten zur Bestimmung hydraulischer Kennfunktionen von Böden

Uwe Schindler<sup>1</sup>, Georg von Unold<sup>2</sup> und Lothar Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF),  
Institut für Landschaftswasserhaushalt, Müncheberg, Deutschland

<sup>2</sup> UMS GmbH München, Deutschland

## Zusammenfassung

Hydraulische Kennfunktionen (Wasserretentionsfunktion, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion) werden benötigt für das Bodenwassermanagement, die Modellierung von Bodenwasser- und Stoffflüssen in unterschiedlichen Skalen in der Landschaft. Ihre Messung ist mit den klassischen Verfahren (Sand/Kaolinbox, Drucktopf, Multi-step outflow method) sehr kosten- und zeitaufwendig. Das Verdunstungsverfahren ermöglicht die simultane Messung beider Kennfunktionen mit nur einem Gerät und bietet eine zeit- und kostengünstige Alternative. Durch die Anwendung von Siedevertensimetern und die Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik kann der Messbereich von bislang 0-500 hPa auf derzeit 0-6500 hPa erweitert werden. Das Verfahren (Extended Evaporation Method, EEM) bietet eine hohe Flexibilität und ermöglicht darüber hinaus die Quantifizierung der bodenhydraulischen Kennfunktionen unter Berücksichtigung der Schrumpfdynamik und die Messung von Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungszyklen (Hysteresis). Das Messverfahren wird erläutert, und an Ergebnissen von Beispielsproben werden die Eignung und Grenzen der Anwendbarkeit diskutiert. Diese technischen Neuerungen sind Bestandteil des kommerziellen Messsystems HYPROP (**HY**draulic **PROP**erty Analyzer, UMS GmbH München).

## 1 Problemstellung

Die klassischen hydrostatischen Verfahren für die Bestimmung der Wasserretentionsfunktion im Labor sind gekennzeichnet (Sand/Kalolinbox, Drucktopf) durch die sehr langen Messzeiten und hohe Kosten. Für die Messung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion ist die Multistep-Outflow Methode (van Dam et al., 1994) gebräuchlich. Durch die Verwendung von Tensiometern ist der Messbereich bis maximal 500 hPa begrenzt.

Das Verdunstungsverfahren Schindler (1980), ermöglicht die simultane Messung beider Kennfunktionen. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die hydraulischen Funktionen aus einem natürlichen Prozess, der Verdunstung, abgeleitet werden. Die Messkurven werden durch eine Vielzahl von Wertepaaren im gesamten Messbereich in hoher Güte beschrieben, und die Handhabung ist sehr einfach. Begrenzend wirkt jedoch insbesondere der eingeschränkte Messbereich zwischen 0 und maximal 500 hPa.

Sowohl bei den klassischen Verfahren als auch beim Verdunstungsverfahren wird zugrundegelegt, dass der Boden starr und geometrisch nicht veränderlich ist. Desweiteren wird ausschließlich die Desorptionskurve bestimmt. Ein dynamisches Verhalten nach Wiederbefeuchtung kann nicht bestimmt werden

Die nachfolgend vorgestellten Neuerungen ermöglichen

- I. eine Erweiterung des Messbereiches bis nahe dem permanenten Welkepunkt (Schindler et al., 2010a und b).
- II. die Berücksichtigung von Schrumpfung und
- III. die Analyse der Dynamik bodenhydraulischen Kennfunktionen nach Wiederbefeuchtung (Hysteresis).

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Verdunstungsverfahren nach Schindler (1980)

**Kurzbeschreibung:** In eine wassergesättigte Bodenprobe ( $250\text{cm}^3$ ) werden zwei Tensiometer eingebaut. Die Probe wird basal abgedichtet und auf eine Waage gestellt. Im Zeitintervall werden die Saugspannungen und die Probenmasse gemessen. Diese Werte bilden die Grundlage für die Berechnung der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion. Die Messzeit beträgt zwischen 3 und 10 Tagen.

Peters und Durner (2008) haben dieses Verfahren hinsichtlich ihrer vereinfachenden Grundannahmen geprüft und als für geeignet bewertet.

### 2.2 Erweiterung des Messbereiches

#### 2.2.1 Anwendung von Siedeverzugtensiometern

Der Messbereich eines wassergefüllten Tensiometers endet gewöhnlich bei etwa 700 hPa.

Der Messbereich kann erweitert werden, wenn der Siedepunkt des Wassers verzögert wird (Schindler et al., 2010a).

#### 2.2.2 Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik

Die Saugspannungsdynamik erfolgt in drei voneinander abgrenzbaren Phasen (Abb. 1).

1. Phase: Messung repräsentativer Saugspannungen
2. Phase: Erreichen des Siedepunktes. Die Saugspannung sinkt abrupt auf Dampfdruck
3. Phase: Die Saugspannung im Boden wird so groß, dass die größte durchgehende Pore der Tensiometerkeramik entwässert wird. Luft dringt in das Tensiometerinnere ein und der Druck geht auf 0 zurück.

**Idee:** Da der Lufteintritt in das Tensiometerinnere zeitlich fixiert werden kann, ist es möglich, bei Kenntnis des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik zwischen den repräsentativen Saugspannungsmesswerten (Phase 1) und dem Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik zu interpolieren und so den Messbereich bis nahe an den Welkepunkt zu erweitern (Schindler et al., 2010b). Der Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik kann im Labor mit Überdruck bestimmt werden.

Die Neuerungen aus 2.2 sind im Gerätesystem HYPROP (**HY**draulic **PRO**perty Analyzer) der Fa. UMS GmbH umgesetzt

### 2.3 Messung der Schrumpfung von Bodenproben

Hypothese: Wird neben der Saugspannungs- und Wassergehaltsmessung gleichzeitig die Volumenänderung der Probe erfasst, können die bodenhydraulischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Schrumpfungsdynamik quantifiziert werden.

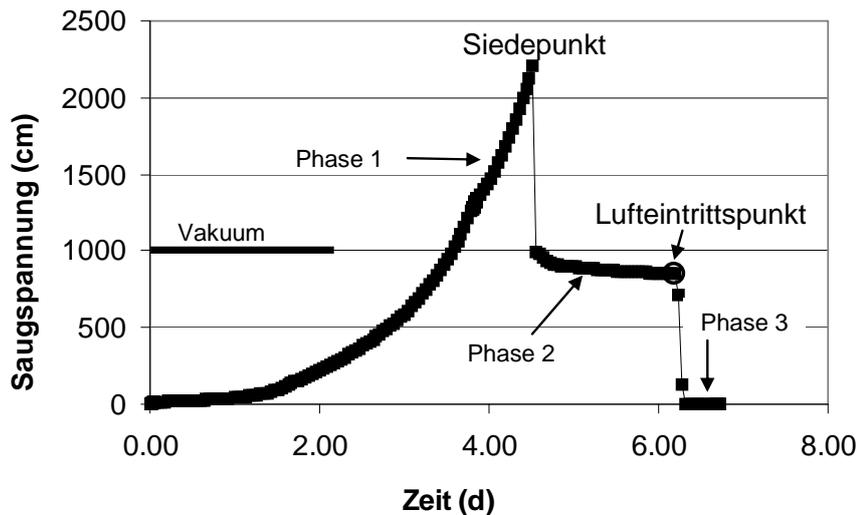


Abb. 1: Phasen der Saugspannungsdynamik während der Verdunstungsmessung.

#### Arbeitsschritte:

1. Quantifizierung der horizontalen und vertikalen Schrumpfung von Torf und Tonproben durch Vermessen der Probe (Durchmesser, Höhe) nach Abschluss der Verdunstungsmessung und nach Trocknung
2. Bestimmung des Tiefenprofils der horizontalen Schrumpfung zwischen Oberfläche und Basis der Probe. Dazu wurde der Probendurchmesser bzw. der Probenumfang ausgewählter Tonproben aus dem Oderbruch (Ap und Go Horizont) beginnend von der Probenoberfläche in 0,5 bis 1 cm Tiefenschritten zu ausgewählten Zeitpunkten der Verdunstungsmessung gemessen.
3. Kontinuierliche Messung der horizontalen Schrumpfung (Zeitverlaufes der Umfangsänderung während des Verdunstungsprozesses mit einem Umfangsmesser) in der Probenmitte (2,5 cm unter Probenoberkante).

Für diese Untersuchungen zu Punkt 3 ist die Probe in eine flexible, wasser- und luftundurchlässige Gummimembran eingehüllt, die ausschließlich eine Verdunstung von der Probenoberfläche zulässt. Die Messung der Umfangsänderung erfolgt mit einem Gerät (analog einem Dendrometer) bestehend aus einem dünnen Seil, das in der Mitte um die Probe geführt ist (Abb. 2). Das Seil wird über eine Feder gespannt und ist mit einem beweglichen Bügel verbunden, auf den ein Dehnungsmessstreifen aufgeklebt ist. Die Umfangsänderungen werden kontinuierlich zusammen mit den Saugspannungen und der Probenmasse online erfasst. Grundlage für die Messanordnung ist das Messgerät HYPROP (Abb. 2).

#### 2.4 Bestimmung der Hysterese hydraulischer Bodeneigenschaften

Das dynamische Verhalten der hydraulischen Bodeneigenschaften kann bestimmt werden, wenn die Probe während der Verdunstungsmessung analog eines Niederschlages wiederbefeuchtet wird. Dazu wird zu einem beliebigen Zeitpunkt der Austrocknung während der Verdunstungsmessung Wasser auf die Probenoberfläche gegeben. Die Wassermenge wird über die Wägung erfasst. Die Probe wird danach so lange abgedeckt, bis sich die Saugspannung nur noch geringfügig ändert. Nach Entfernung der Abdeckung wird die Verdunstungsmessung in üblicher Weise fortgesetzt.

Diese Wiederbefeuchtung kann mehrfach wiederholt werden. Voraussetzung ist, dass die Tensiometer zum Zeitpunkt der Wiederbefeuchtung noch nicht ausgefallen sind.



Abb. 2: HYPROP verändert zur Schrumpfungsmessung.

### 3. Ergebnis

#### 3.1 Erweiterung des Messbereiches

Durch Einsatz von Siedeverzugtensiometern und durch Saugspannungsinterpolation zwischen den repräsentativen Saugspannungsmesswerten (Phase 1) und dem Lufteintritt durch die Tensiometerkeramik in das Tensiometerinnere (Phase 3, siehe Abb. 1) kann der Messbereich bis nahe dem Welkepunkt erweitert werden. Die Ergebnisse sind in Schindler et al., (2010a und b) ausführlich erläutert.

#### 3.2 Bestimmung bodenhydraulischer Kennfunktionen unter Berücksichtigung von Schrumpfung

1. Die Hypothese wurde bestätigt, dass die Schrumpfung von Bodenprobe als isotrop angenommen werden kann.
2. Die horizontale Schrumpfung erfolgt linear über die Probenhöhe (Abb. 3). Der Probendurchmesser verringert sich linear über die Höhe. Die Bestimmtheitsmaße variierten zwischen  $B=0.82$  und  $B=0.98$ .

Aus den Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass es ausreichend ist, den Zeitverlauf der horizontalen Schrumpfung in Probenmitte (Zeitverlauf der Umfangsänderung) zu messen. Aus der horizontalen Schrumpfung kann unter Annahme isotroper Bedingungen auf die vertikale und damit auf die Gesamtschrumpfung bzw. Gesamtvolumenänderung der Probe geschlossen werden. Abb. 4 zeigt beispielhaft die bodenhydraulischen Kennfunktionen einer Tonprobe (Seelow, Oderbruch, Gr Horizont, Trockenrohddichte  $1,05 \text{ g cm}^{-3}$ ) unter Berücksichtigung der Schrumpfung. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Tonbodens wird durch Schrumpfung nur unwesentlich beeinflusst, während die Wasserretentionsfunktion erheblichen Veränderungen unterliegt. Bis zum Ende der

Messung ist der Boden um 19,2 Vol.-% geschrumpft, während der Wassergehalt sich in der Bodenmatrix nur um 9.6 Vol.-% verringert hat. Der Schrumpfungsverlauf in der dargestellten Form (Abb. 6) lässt sich mit hoher Bestimmtheit ( $B=0,999$ ) durch eine quadratische Funktion beschreiben. Wird die Volumenabnahme durch Schrumpfung beginnend ab Sättigungswassergehalt, analog dem Gesamtboden oder der Bodenmatrix in Abb. 6 aufgetragen, lässt sich der Kurvenverlauf in hoher Güte mit dem van Genuchten Modell (van Genuchten, 1981) parametrisieren.

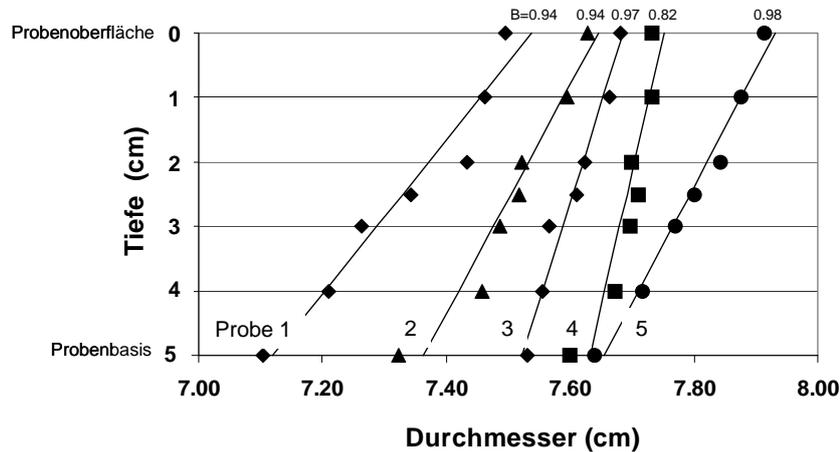


Abb. 3: Schrumpfung in Abhängigkeit von der Tiefe unter der Probenoberfläche.-

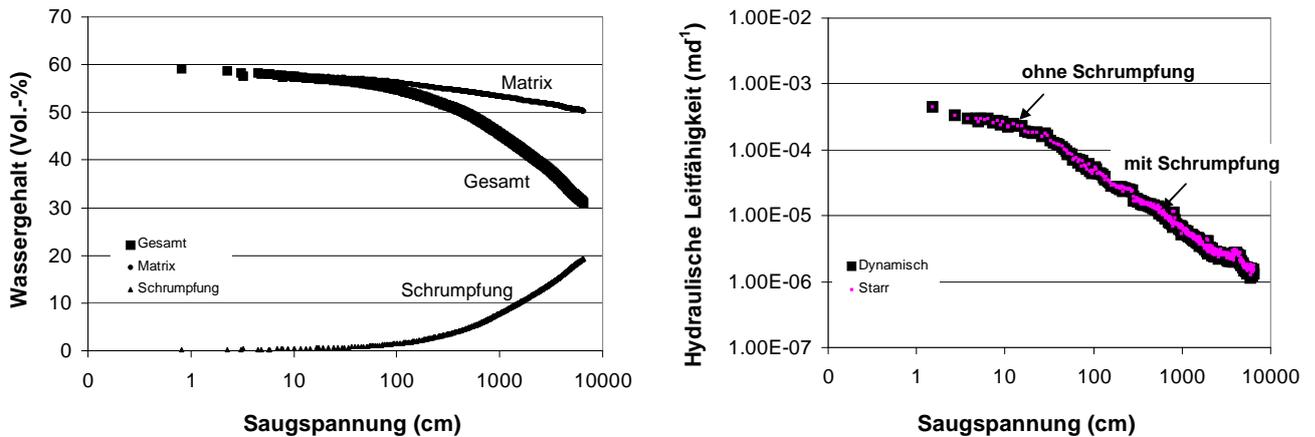


Abb. 4: Hydraulische Leitfähigkeit und Wasserretentionsfunktion einer Tonprobe unter Berücksichtigung von Schrumpfung.

### 3.3 Dynamik der Wasserretentionsfunktion durch Wiederbefeuchtung

Abbildung 5 zeigt die Wiederbefeuchtungszyklen der Wasserretentionsfunktion einer Tonprobe aus Vulkanasche. Die Probe wurde das erste Mal wiederbefeuchtet bei einer Saugspannung von etwa 137 cm. Beginnend von Wassersättigung betrug der Wasserverlust bis zu diesem Zeitpunkt schon 20 Vol.-%. Die Saugspannung geht danach auf nahe 0 zurück, der Wassergehalt ist jedoch über 10 Vol.-% geringer als der Ausgangswassergehalt. Die nachfolgend bestimmte Wasserretentionskurve trifft bei etwa 100 cm wieder auf den ursprünglichen Kurvenverlauf. Die folgenden 3 Wiederholungen zeigen ein ähnliches Bild. Hysterese ist hiernach bei dieser Probe nur bis zu einer Saugspannung von etwa 100 cm von Bedeutung.

#### 4. Schlussfolgerung

Das erweiterte Verdunstungsverfahren ermöglicht die Bestimmung der Wasserretentionskurve und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion bis nahe dem permanenten Welkepunkt. Grundlage ist die Anwendung von Siedeverzugtensiomern und die Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik zur Messwerterweiterung. Diese Neuerungen sind Bestandteil des Messsystems HYPROP (**HY**draulic **PRO**perty Analyzer) der Fa. UMS GmbH München. In Verbindung mit einer Datenerfassungs- und Datenverarbeitungssoftware bietet das Gerätesystem eine neue, innovative Möglichkeit zur effektiven Bestimmung und Parametrisierung bodenhydraulischer Kennfunktionen. Das Gerätesystem kann darüber hinaus verwendet werden zur Quantifizierung der Schrumpfdynamik hydraulischer Bodeneigenschaften und zur Charakterisierung der bodenhydrologischen Dynamik bei Wiederbefeuchtung.

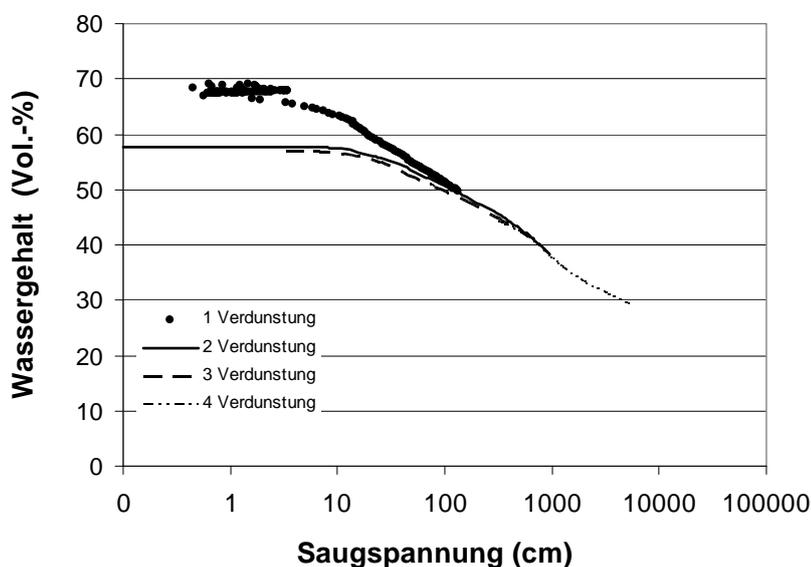


Abb. 5: Wasserretentionsfunktion einer Tonprobe aus Vulkanasche (Chile, Pelchuquin) nach mehrfacher Wiederbefeuchtung.

#### Literatur

- Peters, A. und W. Durner (2008): Simplified Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties, *Journal of Hydrology* 356, 147–162, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.016.
- Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., Berlin* 24: 1-7.
- Schindler, U., Durner, W. von Unold, G. und L. Mueller. 2010a. Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: Extending the Range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1071–1083.
- Schindler, U., Durner, W. von Unold, G., Mueller, L., and R. Wieland (2010b): The evaporation method – Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *J. of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 563–572. DOI: 10.1002/jpln.200900201
- Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. und P. Drooger (1994): Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil Science Society of America Journal* 58:647-652.
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.

# Räumliche und zeitliche Muster der Bodenfeuchte zur Evaluierung von Bodenwasserhaushaltsmodellierungen

Yvonne Morgenstern<sup>1</sup>, Heike Puhmann<sup>2</sup> und Klaus von Wilpert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup>Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Für die Evaluierung von Wasserhaushaltsmodellen werden Messdaten benötigt, die sowohl die zeitliche Dynamik als auch die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte eines Gebietes widerspiegeln. Punktuell können hierfür langjährige Zeitreihen von Bodenfeuchte/Bodenmatrixpotential, z.B. von den bundesweiten Waldklimastationen, verwendet werden. Jedoch geben diese nicht die räumliche Variabilität wieder. Mit einem neuartigen Versuchsdesign versuchen wir, dieses Dilemma zu lösen. In einer umfangreichen Messkampagne (2008-2010) haben wir in vier Waldgebieten Baden-Württembergs insgesamt 2156 kurze Zeitreihen der Bodenfeuchte oberflächennah gemessen. Dieser Datensatz gibt Aufschluss über die zeitliche Dynamik der Bodenfeuchte, aber gleichzeitig auch über deren räumliche Variabilität innerhalb der Waldgebiete. Auf der Grundlage der erhobenen Daten wird derzeit ein Raum-Zeit-Modell entwickelt, welches die mittlere zeitliche Dynamik der Bodenfeuchte in den Waldgebieten mithilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells LWF-Brook90 [Hammel und Kennel, 2001] berechnet und die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte (Raumfunktion) in Abhängigkeit verschiedener Standorts- und Bestandsfaktoren beschreibt. Zur Ableitung dieser Raumfunktion wurden an jedem Bodenfeuchtemesspunkt detaillierte Standortinformationen aufgenommen. Unter Einbeziehung detaillierter Informationen aus unmittelbarer Nähe der Messsondenposition (z.B. Vegetationsdichte) konnte die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte mit multiplen Regressionsmodellen abgebildet werden, die in der Regel einen sehr hohen Anteil der Varianz in den Bodenfeuchtemessungen erklärten. Unter dem Aspekt, dass das entwickelte Raum-Zeit-Modell vor allem in unbeobachteten Gebieten zur Vorhersage der Bodenfeuchte genutzt werden soll, wurden in einem zweiten Schritt Raumfunktionen abgeleitet, die als Prädiktoren ausschließlich flächenhaft vorliegende Größen verwenden. Im Wesentlichen handelt es sich um abgeleitete Parameter aus einem 1x1 m DGM sowie regionalisierte Standortseigenschaften.

## Einleitung

Die mit dem Klimawandel prognostizierten Änderungen führen zu einer Temperaturerhöhung und einer veränderten Niederschlagsverteilung (trockenere Sommer und mildere Winter) in Baden-Württemberg (KLIWA 2006). Längere Vegetationsperioden und trockenere Sommer verändern den Wasserhaushalt der Wälder und führen zur Erhöhung des Trockenstressrisikos an einigen Standorten. Daher werden Wasserhaushaltsinformationen benötigt, die die Auswirkung des sich ändernden Trockenstressrisikos auf Baumwachstum und -vitalität abschätzen können. Diese sollten sowohl die zeitliche Dynamik als auch die räumliche Verteilung von Bodenwassergehalten widerspiegeln (Puhmann et al, 2008). Im Gegensatz zu langjährigen Klimamessreihen des Deutschen Wetterdienstes gibt es für Waldstandorte nur wenige Dauerbeobachtungsstationen und vergleichsweise kurze Messreihen der

Bodenfeuchte (seit Mitte der 1990er Jahre), um Prognosen für die Zukunft abzuleiten. Zur Verbesserung der Datensituation wurde durch die FVA Baden-Württemberg eine umfangreiche Messkampagne durchgeführt, die es ermöglichen soll, Modelle zum kleinräumigen Trockenstressrisiko auf drei Integrationsebenen (Bodenprofil, Bestand, Landschaft) zu erstellen und Einflussfaktoren zu quantifizieren (Puhlmann et al., 2008). Aufgrund des hohen instrumentellen Aufwandes wurden bislang – und werden auch jetzt noch – in aller Regel Zeitreihen an wenigen stationären Messpunkten erhoben, welche aber nicht die räumliche Heterogenität der Waldbestände ausreichend berücksichtigen. Eine Alternative zur Erfassung langer Zeitreihen an einer festen Messposition stellt das RMP-Messkonzept (Randomised Moving Plots) nach Wöhrle (2006) dar. Dieses setzt voraus, dass zahlreiche Kenngrößen des Stoff- und Wasserhaushalts einem großräumigen saisonalen Muster folgen (Einfluss des Klimas). Deshalb muss das zeitliche Muster nicht an allen Messpunkten vollständig erfasst werden. Die dadurch frei werdenden Messkapazitäten können in die Erfassung der kleinräumlich variierenden Kenngrößen investiert werden, z.B. der Bodenfeuchte. So werden an vielen verschiedenen Einzelpunkten jeweils nur kurze Zeitreihen gemessen, um anschließend die Messgeräte wiederholt auf andere Standorte umzusetzen. Damit liegen für eine größere Bandbreite von Standorten Daten vor, die zur direkten Modellevaluierung, aber vor allem zu einer deutlich verbesserten Erfassung der Raumvariabilität der entsprechenden Messgrößen beitragen. Das RMP-Messkonzept wurde in vier Regionen Baden-Württembergs (Schwarzwald, südwestdeutsches Alpenvorland, Odenwald und Neckarland) im Zeitraum zwischen 2008-2010 angewendet (Morgenstern et al., 2011). Im Folgenden werden zunächst das Messkonzept und dessen Anwendung für die Erfassung der Raum-Zeit-Dynamik der Bodenfeuchte vorgestellt. Anschließend wird gezeigt, wie diese Daten zur Erstellung eines Raum-Zeit-Modells verwendet wurden.

## **Material und Methoden**

### **Zeitlicher Verlauf der Bodenfeuchte an Dauerbeobachtungsstationen**

Die vier gewählten Untersuchungsgebiete repräsentieren sehr unterschiedliche Klima- und Landschaftsregionen Baden-Württembergs und sind bereits seit Mitte der 90er Jahre in das EU-weite Programm zum Monitoring von Waldökosystemen (Level II-Standorte) integriert. Alle Standorte weisen ein ausgeprägtes Geländere Relief auf. Die bisherigen Dauerbeobachtungsstationen befanden sich überwiegend in Fichtenbeständen. 2008 wurden diese um Messstationen unter Buchenbeständen ergänzt. Pro Gebiet werden so kontinuierliche Messungen der Klimagrößen (Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte) sowie Bodenwasserhaushaltsgrößen (Wassergehalt und Saugspannung in 30 und 60 cm Bodentiefe) und Wachstumsreaktionen der Bäume (Dendrometer) an jeweils zwei Permanentstationen in je drei unterschiedlichen Kronensituationen (Kronenmitte, -rand und -lücke) in Halbstundenwerten erfasst.

### **Raum-Zeit-Dynamik der Bodenfeuchte in RMP-Plots**

In jedem Untersuchungsgebiet wurde ein Messtransekt (ca. 80 x 1000 m großer Geländestreifen) mit je 12 Messplots eingerichtet. Die Messplots wurden so gewählt, dass sie möglichst viele unterschiedliche Standorte mit unterschiedlichen Expositionen, Hangneigungen, Feuchteverhältnissen und Bestandssituationen abdecken. An allen Messplots wurden Bodenfeuchtemessungen nach dem gleichen Versuchsdesign durchgeführt. Über einen Zeitraum von 14 Tagen erfolgte mit 31 zufällig verteilten TDR-Sonden (MiniTrase mit 20 cm langen Dreistabsonden, maximale Kabellänge 40 m) in einem

Zeitintervall von 30 Minuten die Bestimmung der oberflächennahen Bodenwassergehalte. Danach wurden die Sonden auf einen der anderen Messplots umgesetzt und die Messungen wieder 14 Tage lang durchgeführt. Dieses Verfahren wurde ca. ein Jahr lang wiederholt, so dass in jedem Untersuchungsgebiet bis zu 24 x 31 kurze Zeitreihen der Bodenwassergehalte zur Verfügung stehen. Des Weiteren wurden an den Sondenstandpunkten erklärende Einflussgrößen (Tabelle 1) aufgenommen, die als potentielle Prediktoren bei der Erstellung der Raumfunktion der Bodenfeuchte (multiple Regressionsmodelle) verwendet wurden. Abbildung 1 zeigt exemplarisch das untersuchte Transekt in der Region Heidelberg, einen Messplot (Radius = 40 m) mit 31 Sondenstandorten sowie den Verlauf der Bodenfeuchte an einem Messplot.

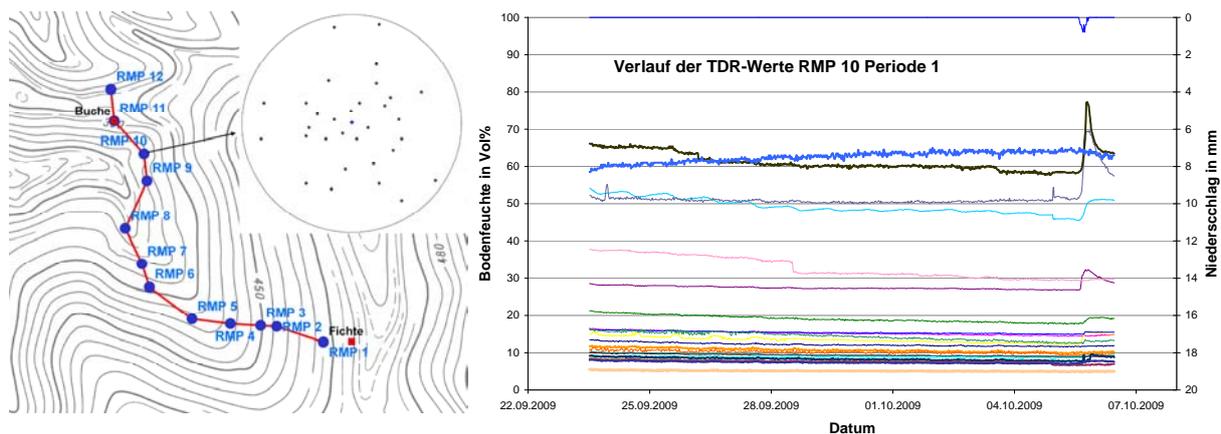


Abb. 1: Links: Transekt mit 12 Messplots (RMP1-RMP12) und den zwei permanenten Dauerbeobachtungsstationen unter Fichte und Buche sowie Sondensteckplan für einen Plot pro Periode mit 31 Sonden. Rechts: Beispielmessung vom RMP10 erste Messperiode

Tab. 1: Aufnahme und Ableitung potentieller Einflussparameter an allen Sondenstandorten

Vegetationsparameter <sup>1)</sup>	Bodenparameter <sup>1)</sup>	Reliefparameter <sup>2)</sup>
Hauptbaumart	Bodenart	Hangneigung
Baumartenmischung	Gefügeform	Hangausrichtung
Mischungsform	Höhe und Art der Auflage	Geländehöhe
Natürliche Altersklasse	Anzahl der Feinwurzeln	TOPEX - Exponiertheit
Schlussgrad	Humusanteil	Hangwölbung
Bestandesstruktur	Lagerungsdichte	Hanggliederung
Kronenhöhe	Hydromorphiemerkmale	Länge des Fließweges
Auftreten, Höhe und Bedeckungsgrad der Bodenvegetation	Entfernung zum nächsten Baum	Spezif. Einzugsgebiet am Punkt
	mittlerer Skelettgehalt in 20 bis 70 cm	Topographic Wetness Index
	Bodentiefe	Stahlungsparameter
	Fein-, Mittel-, Grobskelettanteil in 0 - 20 cm	Streampowerindex
		Slope-Length-Faktor

1) Schätzung im Feld

2) Beispiele der berechneten digitalen Reliefattribute (ca. 100) aus dem digitalen Geländemodell 1x1m

Insgesamt konnten 2156 kurze Zeitreihen der Bodenfeuchte gemessen werden, wobei ca. 10 % der Messungen messfehlerbehaftet waren. Problematisch waren vor allem Messungen im Winter (Frost und Schneedecke), weshalb für diesen Zeitraum kaum Messungen vorliegen.

Zur weiteren Auswertung wurden die gemessenen Bodenfeuchten in relative nutzbare Feldkapazitäten (rel. nFK) umgerechnet, um die Standorte vergleichbar zu machen. Die Retentionskurven wurden aus

geschätzten Eingangsgrößen (Bodenart, Trockenrohdichte und Humusklasse) an den Standorten mit der Pedotransferfunktion PTF-PUH2 für Waldstandorte nach Puhmann und v. Wilpert (2011) bestimmt. Vorab wurde die PTF-PUH2 mit einem unabhängigen Datensatz ( $n = 540$  Proben) aus dem großräumigen Umfeld der Untersuchungsgebiete getestet (siehe v. Wilpert et al., 2012). Es konnte eine mittlere Abweichung von  $0.066 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  zwischen gemessenen und geschätzten Retentionskurven bestimmt werden. Dies liegt im Fehlerbereich der Anwendbarkeit von Pedotransferfunktionen.

Zur Analyse der Einflussgrößen auf die räumliche Variabilität auf Plotebene wurden die Residuen aus Tageswerten der gemessenen Bodenfeuchtezeitreihen abzüglich der Permanentstation als Zielgröße verwendet. Bei der Analyse aller Standorte wurden die Mittelwerte der Residuen pro Standort berechnet, die sich aus den transformierten Zeitreihen  $-(\text{rel. nFK})$  der RMP-Messung abzüglich einer Permanentmessstation (rel. nFK der modellierte Bodenfeuchte in 15 cm Bodentiefe am Buchenstandort) ergaben. Im schrittweisen Verfahren wurden potentielle Prädiktoren für multiple lineare Regressionsmodelle auf verschiedenen Skalenebenen bestimmt.

## Ergebnisse

### Evaluierung am Standort

Eine umfangreiche Modellierung des Wasserhaushalts an den beiden Dauerbeobachtungsstationen Fichte und Buche wurde bereits für das Untersuchungsgebiet Heidelberg mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 vorgenommen und bezüglich Trockenstressereignissen ausgewertet (Groh, 2012). Abbildung 2 zeigt die Messungen der kurzen Zeitreihen (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) im Vergleich zu den modellierten Bodenfeuchten in 15 cm Bodentiefe.

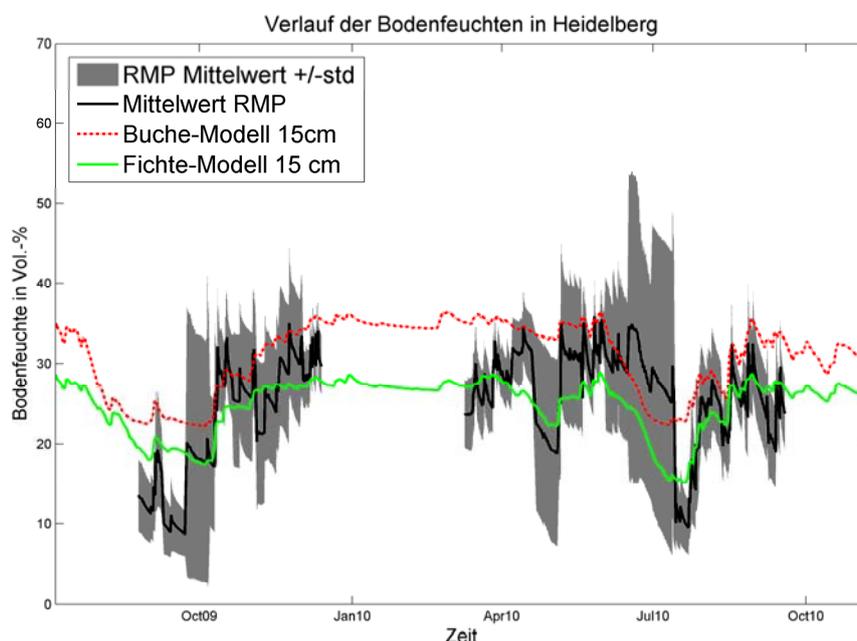


Abb. 2: Verlauf der Bodenfeuchtemesswerte aus der Modellierung des Buchen- und Fichtenstandortes mit LWF-Brook90 sowie der Streuung der Messwerte aus den RMP-Messungen in Heidelberg

Der zeitliche Trend ist im Jahresverlauf gut zu erkennen, jedoch beeinflussen die räumlichen Effekte (Lage, Vegetation und Bodeneigenschaften) die Höhe der Wassergehalte stark. Die Modellergebnisse

können nun im nächsten Schritt verwendet werden, um den zeitlichen Verlauf von den räumlichen Effekten zu trennen.

### Evaluierung auf Plotebene

Die Daten der RMP-Messungen können zur Erstellung von Bodenfeuchtekarten verwendet werden und dienen somit im Weiteren zur Evaluierung der Wasserhaushaltssimulationen. Die räumliche Interpolation wurde mit Kriging auf der Basis eines exponentiellen Variogrammmodells durchgeführt. Das Beispiel in Abbildung 3b spiegelt die aktuelle Situation eines Quellbereiches in der rechten oberen Ecke gut wider.

Am Beispiel des RMP10 in Heidelberg wurde auf der Basis von Tageswerten der gemessenen Bodenfeuchtedaten der ersten Messperiode abzüglich des zeitlichen Verlaufs der Permanentstation Buche ein multiples Regressionsmodell für den räumlichen Effekt entwickelt. Die räumliche Variabilität konnte zu 87 % durch die Prädiktoren Vegetationsdichte, Wurzelklasse, horizontaler Abstand vom Fließgewässer und Streampowerindex erklärt werden. Die Anwendung der Regressionsgleichung auf die zweite Messperiode des gleichen Plots (abweichende Sondenpositionen) zeigt aber, dass die Anwendung des Raum-Zeit-Modells das gemessene Bodenfeuchtemuster deutlich überschätzt (Abbildung 3c und d).

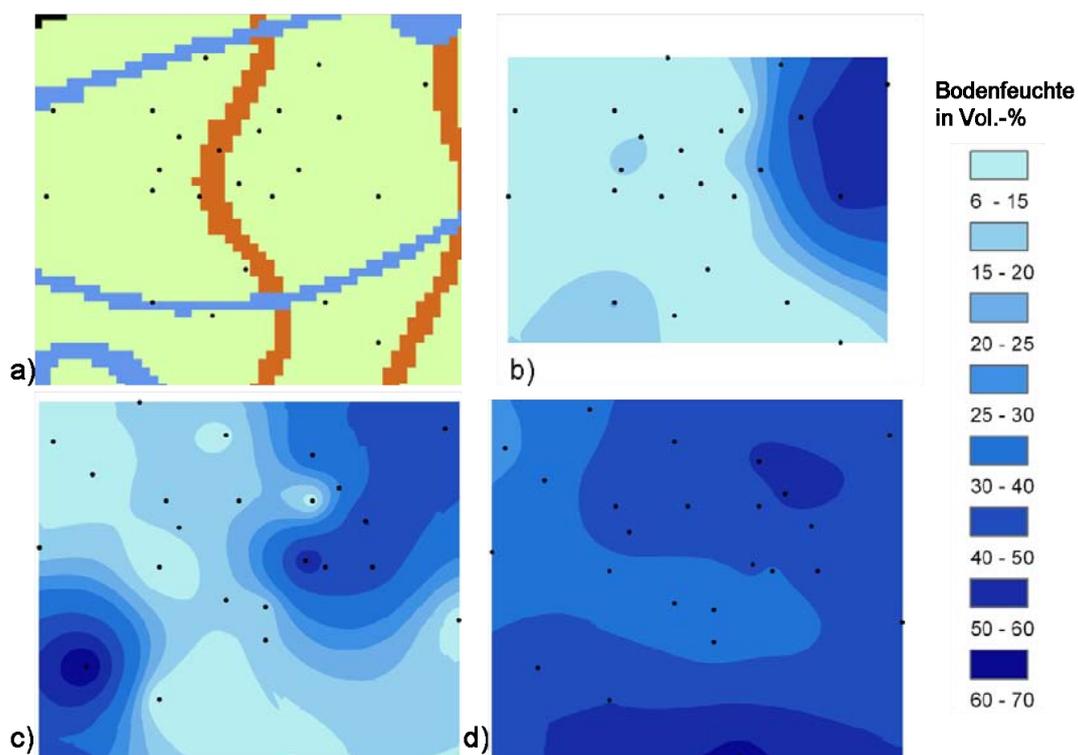


Abb. 3: a) Messplot mit Lage der Messpunkte von Messperiode 1 in einem Quellbereich (blau), b) Bodenfeuchtemuster der ersten Messperiode und c) der 2. Messperiode für RMP10 in Heidelberg, d) Anwendung des Raum-Zeit-Modells für die 2. Messperiode

### Evaluierung auf Bundeslandebene

Die Wasserhaushaltsmodellierung auf Bundeslandebene soll Informationen zur zeitlichen und zur räumlichen Verteilung der relativen nutzbaren Feldkapazität liefern. Die Modellevaluierung kann auf

dieser Skala nicht mehr direkt an Bodenfeuchtemessungen erfolgen, stattdessen werden Standortseigenschaften verglichen, die sowohl bei den RMP-Messungen als auch bei dem Landesmodell eine hohe Korrelation zur relativen nFK aufweisen. Bei der Analyse des RMP-Datensatzes bzgl. möglicher Prädiktoren zur Erklärung der räumlichen Variabilität werden multiple Regressionsmodelle entwickelt, die eine Erklärungsgüte von mindestens 35-40 % der Parametervarianz aufweisen sollen. Als maßgebliche Einflussgrößen konnten bisher Schluffgehalt, Slope-Length-Faktor, Länge des Fließweges und vertikaler Abstand zum Vorfluter identifiziert werden.

## **Schlussfolgerung**

Das Messkonzept der zufällig wandernden Messplots ermöglicht es, innerhalb kurzer Zeit ein breites Spektrum von Reaktionsmustern und potentiellen Einflussgrößen aufzunehmen und auszuwerten. Es zeigte sich, dass die kleinräumige Variabilität der Bodenfeuchte innerhalb der Plots mit den aufgenommenen Standortseigenschaften recht gut erklärbar ist. Bei der Entwicklung eines Raum-Zeit-Modells, das allgemeingültige Prädiktoren zur Erklärung der räumlichen Variabilität verwendet, muss mit einer wesentlich geringeren Vorhersagegenauigkeit gerechnet werden als bei der Analyse der einzelnen Plots. Für die Vorhersage von räumlichen und zeitlichen Bodenfeuchtemustern reichen die bisher entwickelten multiplen Regressionsmodelle noch nicht aus. Daher müssen im nächsten Schritt Prädiktoren und Modellansätze gefunden werden, die besser zur Vorhersage geeignet sind.

## **Literatur**

- Groh, J. (2012): Modellierung des Bodenwasserhaushalts und Analyse des Trockenstresses für zwei Waldstandorte im Odenwald. Posterbeitrag zum Tag der Hydrologie 2012.
- KLIWA Heft 9 (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland, Abschätzung und Auswirkung für den Wasserhaushalt. 100 S., Karlsruhe 2006.
- Hammel, K. und M. Kennel (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München (185).
- Morgenstern, Y., H. Puhmann und K. von Wilpert (2011): Erfassung und erste Analysen von räumlichen Mustern der Bodenfeuchte auf Waldstandorten. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 12, 47-59.
- Puhmann, H., Y. Morgenstern und K. von Wilpert (2008): Trockenstressrisiko für Waldbestände in Baden-Württemberg. FVA-Einblick, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 1, 28-35.
- Puhmann, H. und K. von Wilpert (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 12, 61-71.
- v. Wilpert, K., D. Zirlewagen, H. Puhmann und Y. Morgenstern (2012): Flächenbezogene Schätzung von physikalischen und hydraulischen Bodeneigenschaften aus Monitoringdaten. Posterbeitrag zum Tag der Hydrologie 2012.
- Wöhrle, N. (2006): Randomisiert wandernde Messplots. Raum-Zeit-Modellierung von Parametern des Stoffhaushaltes in heterogenen Kalkbuchenwäldern. Freiburg, Dissertation, Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen, 44, 145 S.

# Regionalisierung der Bodenfeuchte in mesoskaligen Einzugsgebieten

Sarah Engels, Bernd Marschner und Harald Zepp

Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

## Zusammenfassung

Vorrat und Umsatz des im Boden gespeicherten Wassers besitzen einen wesentlichen Einfluss auf Abflussbildungsprozesse. In räumlicher Sichtweise fungiert die Bodenfeuchte als Bindeglied zwischen Oberflächen- und Grundwasser. Zeitlich gesehen speichert der Boden gefallenem Niederschlag zwischen und verzögert somit den Abfluss. Um die Bodenfeuchte in NA-Modellen sinnvoll und realitätsnah berücksichtigen zu können, sind räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Bodenfeuchtedaten notwendig. Die kontinuierliche Messung der Bodenfeuchte in mesoskaligen Einzugsgebieten kann jedoch nur punktuell erfolgen. Um flächig verfügbare Bodenfeuchtedaten zu erhalten, ist eine anschließende Regionalisierung notwendig. Im ca. 300 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet der Biggetalsperre im südwestlichen Sauerland werden auf vier repräsentativen Hängen Niederschlag und Bodenfeuchte gemessen. Eine Analyse der erhobenen Messdaten hat gezeigt, dass die Voraussetzungen für die Regionalisierung mittels distanzbasierter Verfahren, wie Natural Neighbour oder Kriging, nicht erfüllt sind. Nicht zuletzt auf Grund der geringen Messpunktdichte im mesoskaligen Einzugsgebiet ist ein Regionalisierungsverfahren erforderlich, das sich zusätzlich auf flächig verfügbare Standorteigenschaften, u. A. Landnutzung, nutzbare Feldkapazität und Relief, und zeitlich veränderliche Umwelteinflüsse, wie Niederschlag und Evapotranspiration, stützt. Wenigstens an den Messstandorten sind neben Standorteigenschaften auch Umwelteinflüsse bekannt, so dass dort eine Hypothese für deren Abbildung auf die Bodenfeuchte erlernt werden kann, die später auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragbar sein soll. Ausgehend von der Diskussion distanzgewichteter Regionalisierungsverfahren werden in diesem Beitrag künstliche neuronale Netze trainiert, um auf Standorteigenschaften und Umwelteinflüssen basierend, pF-Wochenmittelwerte an beobachteten Stellen zu schätzen.

## Einleitung

Flächig verfügbare Bodenfeuchtedaten sind für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung von großer Bedeutung, weil in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte Niederschlag im Boden gespeichert und verzögert wird und dies entscheidend die Abflussbildung und -konzentration beeinflusst. Die Bodenfeuchte variiert sowohl räumlich als auch zeitlich zum Teil erheblich. Sie hängt dabei von zahlreichen Einflussgrößen ab. Zum Einen beeinflussen die Eigenschaften eines Standortes, z.B. Landnutzung, Relief und Beschaffenheit des Bodens, den Feuchtezustand und fungieren damit als Einflussgrößen für die Bodenfeuchte. Zum Anderen hängt die Bodenfeuchte von Umwelteinflüssen ab. Dabei führt Niederschlag zu einer Aufweitung und Evapotranspiration zu einer Austrocknung des Bodens. Eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Messung der Bodenfeuchte ist mit den heutigen zur Verfügung stehenden Messmethoden auf der Mesoskala nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Deshalb müssen punktuelle Messungen der Bodenfeuchte auf der Mesoskala regionalisiert werden, wobei üblicherweise distanzbasierte Interpolationsverfahren wie inverse Distanzgewichtung, Natural Neighbour

oder Kriging Anwendung finden. Diese setzen zusätzlich zu einer vergleichbaren Messmethodik voraus, dass zwischen den Stützstellen ein stetiger Zusammenhang der Bodenfeuchte vorhanden ist (Schafmeister, 1999).

Im Rahmen des Projekts "Automatisches Hydrologisches Echtzeit-Modell" (AHEM) sind vier repräsentative Hänge im ca. 300 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet der Biggetalsperre im Sauerland mit Niederschlags- und Bodenfeuchtesensoren ausgestattet. Weil für die Entwicklung eines auf Onlinedaten basierenden Niederschlag-Bodenfeuchte-Abfluss-Modells Bodenfeuchteinformationen für das gesamte Einzugsgebiet benötigt werden, ist die Regionalisierung der Bodenfeuchte von der Punkt- auf die Mesoskala notwendig. Die Datengrundlage für die Messgröße Niederschlag ergibt sich aus den Messungen der vier Niederschlagssammler, je einer pro Hang. Die Bodenfeuchte wird mit 8 bis 15 pF-Metern pro Hang an jeweils drei über den Hang verteilten Standorten in jeweils mehreren Tiefen gemessen. Insgesamt stehen somit Bodenfeuchtedaten von 48 pF-Metern zur Verfügung. Zusätzlich zu den Messdaten sind flächendeckend Daten zu Relief, Landnutzung und Boden abgeleitet aus DGM, Satellitenbild und digitaler Bodenkarte vorhanden. Die Bodenfeuchte wird an allen Standorten mit der gleichen Messtechnik (pF-Meter) und für die gleichen Zeiträume sowie Messintervalle erhoben. Zwischen den Messhängen liegen jedoch Abstände von mehreren Kilometern, so dass sich unbeobachtete Stellen im Untersuchungsgebiet grundlegend vom nächstgelegenen Messhang unterscheiden können und damit Interpolationsverfahren basierend auf einer Distanzgewichtung im Georaum hier versagen. Basierend auf der zur Verfügung stehenden Datengrundlage soll ein Verfahren entwickelt werden mit dem dennoch die Bodenfeuchte zeitlich und räumlich hoch aufgelöst für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelt werden kann. Künstliche neuronale Netze werden trainiert, um pF-Wochenmittelwerte an beobachteten Stellen zu schätzen.

## **Methode**

Die Mesoskala umfasst definitionsgemäß einen Raum von 0,1 bis 10<sup>3</sup> km<sup>2</sup> (Kleeberg 1992). Auf dieser Skala scheitern distanzgewichtete Regionalisierungsverfahren wie das (Ordinary) Kriging an der Realisierung eines hinreichend aufgelösten Messnetzes. Für ein Krigingverfahren, welches eine Kovariable verwendet, z.B. External Drift Kriging, ist der hierbei geforderte lineare Zusammenhang zwischen einer räumlich hoch aufgelösten Kovariablen und der Zielvariable „Bodenfeuchte“ nicht bekannt. Sind räumlich hoch aufgelöste Daten der zu regionalisierenden Variable nicht verfügbar, weil beispielsweise die dafür notwendige Datenerhebung zu aufwendig ist, müssen diese stattdessen aus anderen zur Verfügung stehenden hinreichend aufgelösten Daten abgeleitet werden.

Im Untersuchungsgebiet sind räumlich hoch aufgelöste Daten zu Relief, Boden und Landnutzung (Standorteigenschaften) vorhanden sowie an wenigen repräsentativen Standorten zeitlich hoch aufgelöste Niederschlags- und Bodenfeuchtedaten (Umwelteinflüsse). Somit können alle Punkt im Untersuchungsgebiet aus dem dreidimensionalen Georaum in einen multidimensionalen Eigenschaftsraum transformiert werden, wobei jede Dimension einer Standorteigenschaft entspricht (vgl. Abbildung 1). Zumindest an den Messstandorten kann dieser Eigenschaftsraum noch um die Dimensionen der Umwelteinflüsse erweitert werden. Damit stellen gemessene pF-Werte Stützstellen in diesem Raum dar, anhand derer ein Modell erlernt werden kann, welches Standorteigenschaften und Umwelteinflüsse als Eingangsgrößen auf die Bodenfeuchte abbildet. Zwischen den Stützstellen wird mittels Regression eine Funktion angenähert, um trotz verrauschter Daten, ein Modell erstellen zu können. Im Gegensatz zum Georaum sind die Stützstellen des pF-Werts im Eigenschaftsraum gleichverteilter, denn die

Messstandorte wurden repräsentativ bzgl. der Standorteigenschaften ausgewählt und aufgrund der kontinuierlichen Messung nimmt schließlich das Wissen über die dort vorherrschenden Umwelteinflüsse monoton zu.

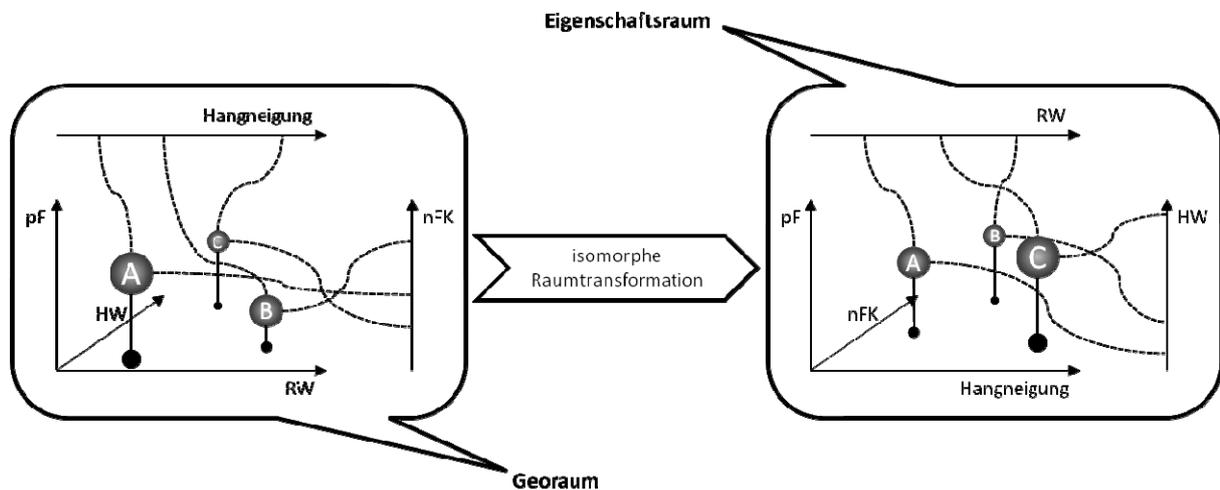


Abb. 1: Exemplarische Darstellung des Regionalisierungsraums distanzbasierter Verfahren (links) und des hier vorgestellten Verfahrens (rechts). Die Punkte im Raum können als Objekte begriffen werden, wobei dasselbe Objekte des einen Raums die komplementären Eigenschaften im anderen Raum besitzt (links: Hangneigung und nutzbare Feldkapazität (nFK), rechts: Rechtswert (RW) und Hochwert (HW)).

Weil der strukturelle Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und der Bodenfeuchte unbekannt ist, muss ein strukturerkennendes Verfahren verwendet werden. Künstliche neuronale Netze sind grundsätzlich in der Lage komplexe nichtlineare Zusammenhänge aus vorhandenen Daten zu erlernen (StatSoft Inc., 2011).

Für das Untersuchungsgebiet werden künstliche neuronale feed-forward Netze erstellt und trainiert, welche aus den gegebenen Standorteigenschaften und gemessenen pF-Werten von drei der vier instrumentierten Hänge den nichtlinearen Zusammenhang zu den pF-Werten eines Sensors des vierten Hanges erlernen. Da der Niederschlag als zeitlich und räumlich variable Einflussgröße nicht berücksichtigt wird, erfolgt keine zeitpunktgenaue Zuordnung von pF-Werten, sondern von mittleren pF-Werten auf Wochenbasis. Die ausgewählten Standorteigenschaften, welche die Bodenfeuchte beeinflussen, lassen sich in drei Gruppen einteilen: Landnutzung, Boden und Relief. Für die Gruppe Landnutzung sind Stützstellen nur für die Nutzungsarten Grünland, Nadelwald und Laubwald verfügbar. Der Boden beeinflusst durch seine Mächtigkeit und Textur die Speicherung und Bindung des Wassers im Boden. Die nutzbare Feldkapazität beinhaltet diese beiden Bodeneigenschaften und wird deshalb als bodencharakterisierende Eingangsgröße gewählt. Neben dem Porenvolumen im Boden spielen auch Stauhorizonte und hoch anstehendes Grundwasser eine entscheidende Rolle für den Feuchtezustand eines Bodens. Diese Einflüsse werden über die Eingangsgröße "Hydrodynamischer Grundtyp" berücksichtigt. Dabei werden die Klassen "Grundwassertyp", "Stauwassertyp" und "Perkolationsstyp" unterschieden (Zepp, 1995, Zepp, 1999). Zur Beschreibung des Reliefs werden die Eingangsgrößen Höhe über NN, Hangneigung und Exposition verwendet. Darüber hinaus stellt die Tiefe im Boden

eine Eingangsgröße dar, weil zu erwarten ist, dass die Bodenfeuchte ebenfalls mit dieser korreliert. Schließlich fließt noch die Kalenderwoche im Jahr als Eingangsgröße ein, da Wochenmittelwerte des pF-Werts verwendet werden und der pF-Wert mit dem Zeitpunkt im Jahr korreliert. Bei den nominal skalierten Einflussgrößen Landnutzung und Hydrodynamischer Grundtyp entspricht jede Klasse einer Eingangsgröße, um nicht fälschlicherweise eine Ordnung zwischen den Klassen zu unterstellen. Um den pF-Wert jeweils eines Sensors des vierten Hangs mittels seiner Standorteigenschaften gestützt durch die Standorteigenschaften der übrigen Messhänge zu ermitteln, enthält jedes Eingabemuster demnach für alle Sensoren von drei Hängen die Standorteigenschaften und den mittleren pF-Wert einer Woche sowie die Standorteigenschaften des Sensors des vierten Hanges. Für jede Woche gibt es somit für jeden Sensor mit verfügbaren Daten ein Eingabemuster mit je 325 Eingangsgrößen. Zur Ermittlung der Relevanz der einzelnen Eingangsgrößen wird für jedes erstellte neuronale Netz anschließend eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Insgesamt sind 1185 Datensätze aus dem Zeitraum April bis Oktober 2011, auf denen das neuronale Netz mit der Software Statistica 10 berechnet wird, vorhanden. Dabei wird die Wahl der optimalen Anzahl verdeckter Neuronen und der Aktivierungsfunktionen (logistisch, tanh, exponentiell) der Software überlassen. Während des Trainings des neuronalen Netzes wird die quadratische Fehlersumme zwischen berechneten und beobachteten Werten in der Ausgabeschicht mit Hilfe des Backpropagation-Lernalgorithmus minimiert. Für die Bewertung des neuronalen Netzes wird der Korrelationskoeffizient zwischen berechneten und beobachteten Ausgabewerten auf den Trainings-, Test- und Validierungsdaten berechnet.

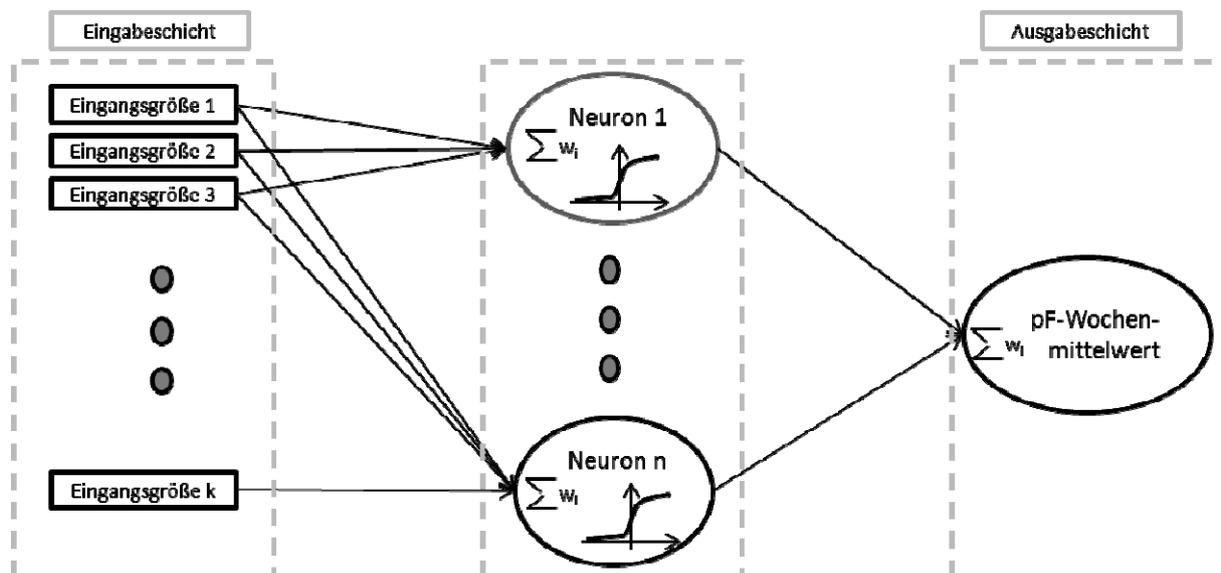


Abb. 2: Struktur eines neuronalen Netzes mit sigmoidschen Aktivierungsfunktionen zur Vorhersage von pF-Wochenmittelwerten.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Netze mit den besten Ergebnissen enthalten derzeit in einer verdeckten Schicht 8 bis 15 Neuronen und den tanh oder die logistische Funktion als Aktivierungsfunktion. Sie sind in der Lage aus gemessenen pF-Werten und Standorteigenschaften pF-Werte anderer Sensoren mit einem Korrelationskoeffizienten von über 0,9 zwischen berechneten und beobachteten pF-Werten auf den Trainings-, Test-

und Validierungsdaten zu berechnen. Dieser Korrelationskoeffizient auf den Trainings- und Testdaten lässt darauf schließen, dass die Netzstruktur weder zu einfach ist, so dass die Trainingsdaten nicht ausreichend abgebildet werden könnten, noch zu komplex ist, so dass die Trainingsdaten auswendig gelernt werden würden. Der Korrelationskoeffizient auf den Validierungsdaten gibt die Güte der Generalisierbarkeit des neuronalen Netzes an. Für eine Regionalisierung stellt dieser Korrelationskoeffizient eine Art obere Schranke dar, die voraussichtlich an unbeobachteten Stellen im Untersuchungsgebiet nur schwer zu erreichen sein dürfte. Abbildung 3 zeigt am Beispiel eines neuronalen Netzes mit zehn verdeckten Neuronen die Korrelation zwischen den beobachteten und gemessenen pF-Werten.

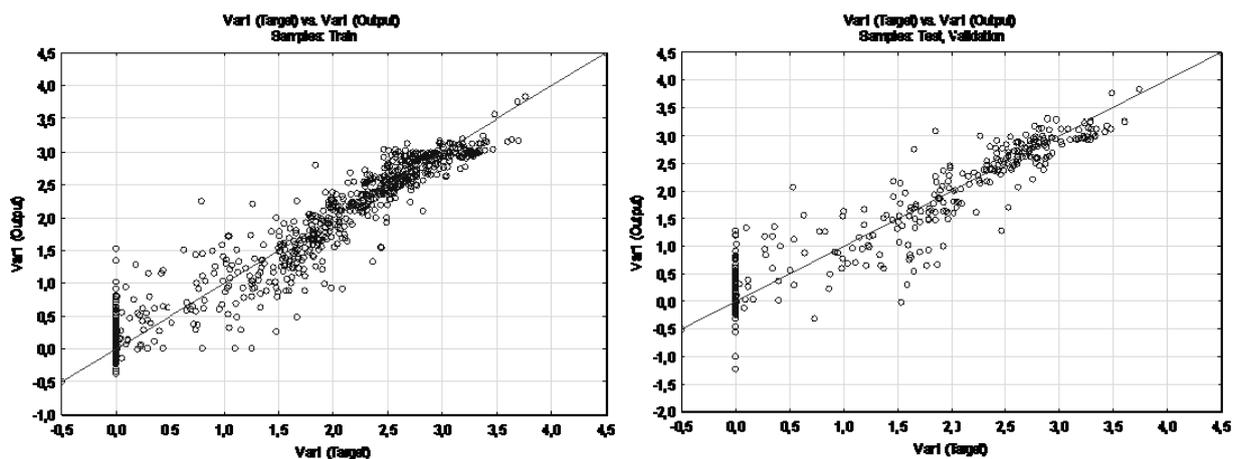


Abb. 3: Korrelation zwischen berechneten (Output) und beobachteten (Target) pF-Wochenmittelwerten auf den Trainingsdaten (links) und den Test- und Validierungsdaten (rechts). Die eingezeichnete Linie zeigt die optimale Korrelation von 1 an.

Übereinstimmend lässt sich aus einer globalen Sensitivitätsanalyse für die berechneten neuronalen Netze ableiten, dass überwiegend die Standorteigenschaften des Sensors, dessen pF-Wert geschätzt wird, den größten Einfluss auf die Bodenfeuchte haben. Die Sensitivitätsanalyse zeigt weiter, dass für jeweils diesen Sensor die Eingangsgrößen Hydrodynamischer Grundtyp, Hangneigung, nutzbare Feldkapazität, Tiefe im Boden und Landnutzung entscheidend sind. Erst dann folgt in der Rangfolge der Einfluss gemessener pF-Werte an anderen Standorten. Der zu schätzende pF-Wert hängt demnach stärker von den Standorteigenschaften an der Schätzstelle ab als von den Stützstellen an den anderen Hängen, insbesondere den dort gemessenen pF-Werten, wobei die Relevanz der übrigen Umwelteinflüsse hier bisher nicht untersucht wurde. Dies unterstützt die Argumentation statt im Georaum mittels klassischer distanzbasierter Verfahren im Eigenschaftsraum zu regionalisieren. Die im Eigenschaftsraum geschätzten pF-Werte sind aufgrund der isomorphen Abbildung zwischen den beiden Räumen (Eigenschafts- und Georaum, vgl. Abb.1) zurück in den Georaum übertragbar. Kritisch festzuhalten ist, dass die Sicherheit bei einer Extrapolation naturgemäß mit zunehmender Distanz zur konvexen Hülle der Stützstellen im multidimensionalen Eigenschaftsraum abnimmt. Eine gute Regionalisierbarkeit der Bodenfeuchte mit den hier beschriebenen künstlichen neuronalen Netzen hängt somit von der Gleichverteilung der Stützstellen im Eigenschaftsraum ab, die wiederum durch die Wahl repräsentativer Sensorstandorte und möglichst langer Messzeiträume gewährleistet wird.

## Schlussfolgerung

Die hier erstellten künstlichen neuronalen Netze schätzen Wochenmittelwerte der Bodenfeuchte eines Sensorstandortes aus Standorteigenschaften und gemessenen pF-Werten anderer instrumentierter Hänge. In einem nächsten Schritt soll durch eine Kreuzvalidierung ermittelt werden, wie gut ein neuronales Netz in der Lage ist, den pF-Wert an Standorten zu schätzen, die nicht in der Trainingsmenge enthalten sind. Des Weiteren sollte für eine Verbesserung der Ergebnisse und eine höhere zeitliche Auflösung die Eingabe ins neuronale Netz um den Niederschlag erweitert werden, weil der Niederschlag räumlich im Untersuchungsgebiet variiert und auf einer kleinen zeitlichen Skala von wenigen Stunden oder Tagen den Bodenfeuchtezustand erheblich beeinflusst. Zur Berücksichtigung des Niederschlags sind zunächst Vorverarbeitungsschritte notwendig, um die Niederschlagshistorie in eine geeignete Form zur Verwendung als Eingangsgröße für das neuronale Netz zu transformieren. Durch die Berücksichtigung weiterer Eingangsgrößen wie den Niederschlag und die Erweiterung der Netzstruktur um weitere verdeckte Schichten sollten künstliche neuronale Netze dann in der Lage sein, die Bodenfeuchte räumlich und zeitlich hoch aufgelöst auf der Mesoskala zu regionalisieren.

## Literatur

- Kleeberg, H.-B (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim, New York, VCH.
- Schafmeister, M.-T. (1999): Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. Berlin, Springer.
- StatSoft, Inc. (2011). Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.com/textbook/> (09.03.2012).
- Zepp, H. (1995): Klassifikation und Regionalisierung von Bodenfeuchteregimetyphen. Stuttgart, Borntraeger.
- Zepp, H. (1999): Bodenwasser und Grundwasser. In Zepp, H.; Müller, M. J. (Hrsg.): Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch. Flensburg, Deutsche Akad. für Landeskunde (Forschungen zur deutschen Landeskunde 244), 129-167.

# **Stammabfluss bei Buchen als Auslöser für präferenzielle Fließvorgänge im Boden**

Kai Schwärzel, Sebastian Ebermann und Nico Schalling

Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Fachrichtung Forstwissenschaften, Technische Universität Dresden, Deutschland

## **Zusammenfassung**

In dieser Studie wurde untersucht, wie die Kronen- und Wurzelarchitektur von Buchen die Entstehung von Stammabfluss, die Infiltration des Stammabflusses und die Weiterleitung des infiltrierenden Wassers durch den Boden reguliert. Dazu wurde auf einem Buchenstandort im Tharandter Wald (Untere Lagen des Osterzgebirges) Stammabfluss experimentell ausgelöst. Dem Stammabfluss wurde der Farbtracer Brilliant Blue beigemischt. Dadurch konnte die Ausdehnung der Infiltrationsfläche um den Stammfuß bestimmt und die räumliche Verteilung des Stammabflusswassers im Boden anhand aufgegrabener Bodenprofile erfasst werden. Neben den vom Tracer durchflossenen Bodenarealen wurden auch Fein- und Derbwurzeln, Makroporen (Totwurzeln, Tiergänge etc.) sowie Horizontgrenzen kartiert. Der erzeugte Stammabfluss infiltrierte in unmittelbarer Nähe des Stammes in den Boden. Die Visualisierung der Fließwege zeigte, dass das infiltrierende Wasser bevorzugt entlang vertikal und horizontal orientierter Wurzeln in und durch den Boden geleitet wurde. Deshalb kann geschlossen werden, dass der bei Starkregenereignissen entstehende Stammabfluss präferenzielle Fließvorgänge im Boden auslösen kann. In Abhängigkeit der Standortbedingungen (Niederschlagsintensität und –menge, Relief, hydraulisches Leitfähigkeitsvermögen des Unterbodens) könnten diese Vorgänge zur Bildung von schnellem Zwischenabfluss führen. Im Hinblick auf den gegenwärtig stattfindenden Umbau von Nadelwäldern zu von Buchen dominierten Mischwäldern ist daher zu beachten, dass sich die Abflusssdynamik bewaldeter Einzugsgebiete verändern könnte.

## **Einleitung**

Ziel des gegenwärtig in Deutschland durchgeführten Waldumbaus ist die Schaffung strukturreicher Mischbestände. Dabei werden Nadelwälder vor allem in Buchen dominierte Mischwälder umgewandelt. Im Vergleich zu den anderen Hauptbaumarten (Eiche, Fichte, Kiefer) mitteleuropäischer Wälder weist die Buche eine morphologische Besonderheit auf: Die Kombination steiler Astansatzwinkel mit glatter Rindenoberfläche bewirkt eine bevorzugte Akkumulation von Niederschlagswasser am Stammfuß. In Buchenaltbeständen tragen bis zu 20% des Jahresniederschlags als Stammabfluss zur Wasserbilanz bei (Schwärzel et al., 2009). In einem Buchenaltbestand im Tharandter Wald wurden bei Starkregenereignissen mit 15 mm Freilandniederschlag je nach Kronendurchmesser zwischen 3 und 4 mm Stammabfluss beobachtet (Spank, 2010). Bezogen auf den Einzelbaum infiltrierten dann in wenigen Stunden bis zu 140 l Wasser in den Boden. Ausgangspunkt für unsere Studie war die Frage, welchen Einfluss diese in kürzester Zeit in den Boden infiltrierenden Wassermengen auf die Bodenwasserdynamik haben. Entstehen Sättigungsflächen? Erhöht sich die Sickerwasserrate? Wird schneller Zwischenabfluss erzeugt? Um diesen Fragen nachzugehen, wurde ein Stammabflussexperiment konzipiert. Dazu wurde das mit einem Farbstoff beladene Wasser direkt am Stamm appliziert. Dadurch

konnte das natürliche Fließverhalten weitestgehend nachgebildet werden. Ziel der Studie war es, aufzuzeigen, inwieweit durch die Einführung von Buchen in Fichtenreinbestände die Fließwege und -vorgänge in der ungesättigten Bodenzone verändert werden könnten.

## Material und Methoden

Die Messungen wurden auf einem schwach geneigten Plateaustandort im Tharandter Wald (Untere Lagen des Osterzgebirges) durchgeführt. Der Boden ist ein schwach podsoliger Parabraunerde-Pseudogley aus Lösslehm. In der forstlichen Standortskarte ist dieser Standort als mittelfrischer, mäßig nährstoffversorgter Standort der feuchten, unteren Berglagen ausgewiesen. Den Profilaufbau, die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten (in vertikaler und horizontaler Richtung) der einzelnen Bodenhorizonte und Informationen zu den Durchwurzelungsintensitäten finden sich in Abbildung 1.

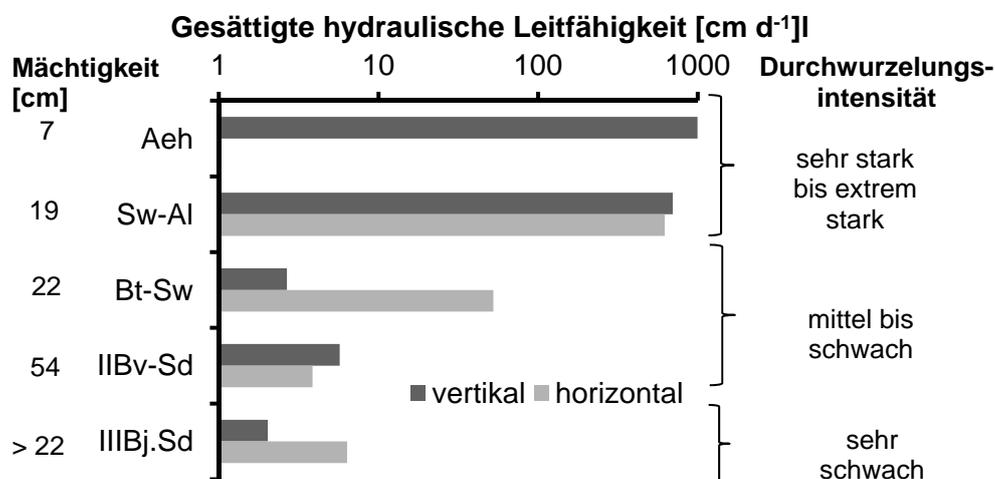


Abb. 1: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten des untersuchten Bodens. Die Leitfähigkeit des Aeh-Horizontes wurde im Feld mittels Haubeninfiltrimeter ermittelt. Die Leitfähigkeiten der Unterbodenhorizonte wurden im Laborversuch mittels Haubenpermeameter bestimmt. Dazu wurden Proben (Volumen der Probe = 245 cm<sup>3</sup>) in vertikaler und horizontaler Richtung entnommen. Die Horizontsymbole und die Durchwurzelungsintensitäten wurden nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden, 2005) benannt bzw. eingestuft. Die Profiltiefen ergeben sich durch Addition der Horizontmächtigkeiten.

Abbildung 1 kann entnommen werden, dass die hydraulische Leitfähigkeit (LF) im Unterboden (S-Horizonte) stark abnimmt. Unterschiede in den LF zwischen vertikal und horizontal entnommenen Proben sind mit Ausnahme des Sw-Horizontes gering. Die signifikanten Abweichungen zwischen der vertikalen und horizontalen LF im Sw-Horizont führen wir auf horizontal orientierte, aber bereits verrottete Wurzeln gefälltter Bäume zurück. In Abb. 1 sind auch Einstufungen der Durchwurzelungsintensität aufgeführt. Ersichtlich ist die starke Abnahme der Feinwurzeln in den Stauwasserhorizonten (S-Horizonte). Diese Beobachtung korrespondiert mit einer starken Zunahme der Trockenrohdichte (TRD) in diesen Horizonten (TRD nicht gezeigt).

Um Stammabfluss unter Buche und die Rolle des Wurzelstocks bei der Ausbreitung des Wassers im Boden untersuchen zu können, wurde ein neuartiges Tracerexperiment entwickelt. Dazu wurde ein Gardena-Schlauchregner in Brusthöhe um den Baum gewickelt und fixiert. Der Regner war durch

einen Gartenschlauch mit einer Pumpe und einem Wasserfass verbunden. Ein zwischen Regner und Stamm platzierter Geofilz gewährleistete, dass das Beregnungswasser gleichmäßig und ohne zu verspritzen den Stamm benetzte. Ausgehend von den langjährigen Stammabfluss-Messungen auf der Versuchsfläche (Spank, 2010) wurde ein mittleres Starkregenereignis ausgewählt. In 180 min wurden 120 l Stammabfluss erzeugt. Dem Stammabfluss-Wasser wurde  $4 \text{ g l}^{-1}$  Brilliant Blue zugefügt, um die Fließwege zu visualisieren. 24 Stunden nach Beendigung der Beregnung wurde begonnen, das erste von insgesamt 16 Profilen zu öffnen. Dabei wurden die vom Tracer eingefärbten Bereiche sowie Makroporen und Wurzeln  $> 2\text{mm}$  auf eine Folie übertragen. Außerdem wurden für jedes Profil die mittleren Horizontmächtigkeiten und Durchwurzelungsintensitäten aufgenommen. Die Folien wurden digitalisiert und nachfolgend mit einem Grafikprogramm bearbeitet. Dadurch konnten Flächenanteile der vom Tracer durchflossenen Bodenbereiche für jedes Profil ermittelt werden.

## Ergebnisse und Diskussion

Während des Stammabfluss-Experimentes trat kein Oberflächenabfluss auf. Der Stammabfluss infiltrierte in unmittelbarer Nähe des Stammes kreisförmig in den Boden. Abbildung 2 verdeutlicht, dass die Senker- und Zugwurzeln als Leitbahnen für den Stammabfluss dienten. Das Stammabfluss-Wasser verteilte sich im Wesentlichen gleichmäßig unter dem Stock.

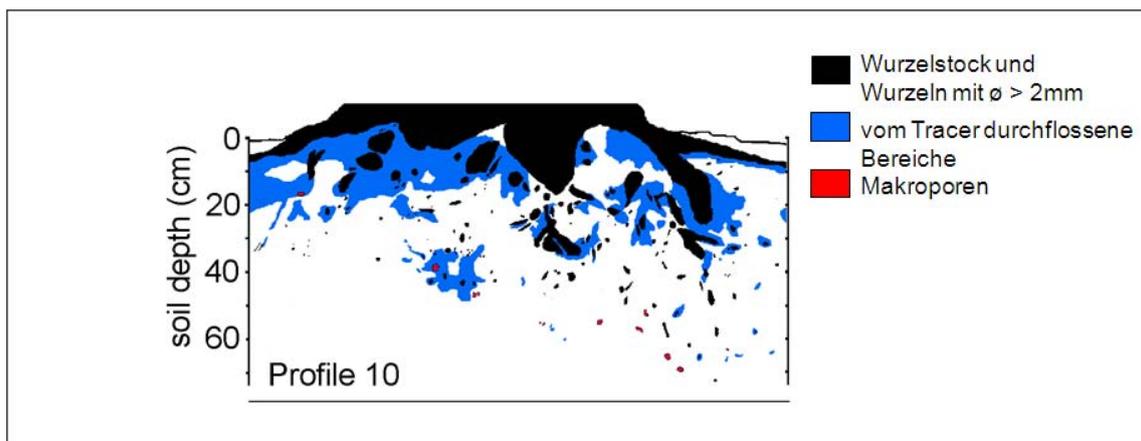


Abb. 2: Räumliche Verteilung des Tracers unter dem Wurzelstock. Die Profilbreite beträgt etwa 120 cm. Die Makroporen ( $\varnothing > 2 \text{ mm}$ ) stellen Wurmgänge und verrottete Wurzelkanäle dar.

Wie sich das Stammabfluss-Wasser hangabwärts im Boden verteilt hat, zeigt Abbildung 3. Dargestellt sind Tiefenprofile der prozentualen Tracerverteilung. In unmittelbarer Stammnähe floss das Stammabfluss-Wasser vor allem durch den Aeh- und Al-Horizont. In größerer Entfernung vom Stamm bewegte sich der Tracer meist im Al- und im oberen Bereich des SW-Horizontes. Vereinzelt gab es größere Tracerdurchbrüche in den Sd-Horizont (z.B. im 185 cm hangabwärts gelegenen Profil, Abb. 3). Die Tracerverteilungskurven verdeutlichen, dass das vertikal in den Boden infiltrierende Stammabfluss-Wasser sich trotz der geringen Hangneigung als lateraler Fluss hangabwärts bewegte. Ein vertikaler Wassertransport in tiefere Bodenbereiche fand nicht statt.

Das in den Boden infiltrierende Stammabfluss-Wasser floss entlang der Senkerwurzeln in die Tiefe (Abb. 4a). Außerdem wurde Wasser vor allem durch horizontal ausgerichtete Grob- und Derbwurzeln kanalisiert (Abb. 4b).

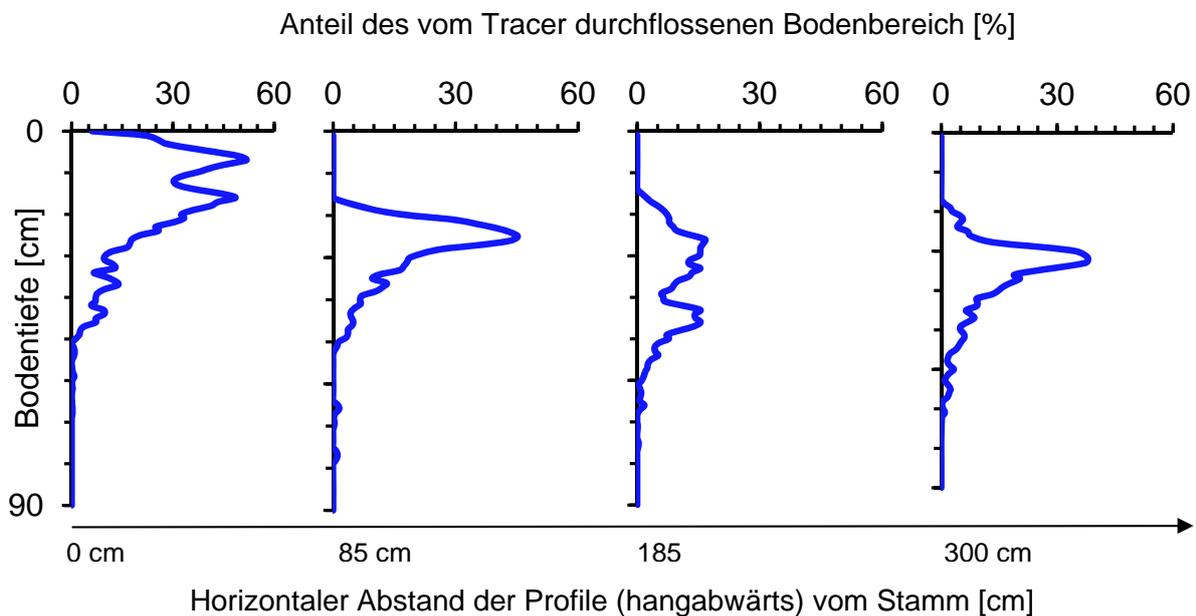


Abb. 3: Tracerverteilung in hangabwärts vom Beprobungsbaum gelegenen Profilen.

Unterhalb des A1-Horizont verringert sich die LF signifikant (Abb. 1); dann bewegte sich das Wasser entlang der Zugwurzeln hangabwärts. Zudem dienten horizontal orientierte Makroporen als Leitbahnen für präferenzielle Fließvorgänge. Diese Makroporen stellen oftmals Totwurzeln der gefälltten Bäume dar. Vom Tracer durchflossene Bereiche wurden auch in den bleichförmigen Streifungen des Sd-Horizontes gefunden.

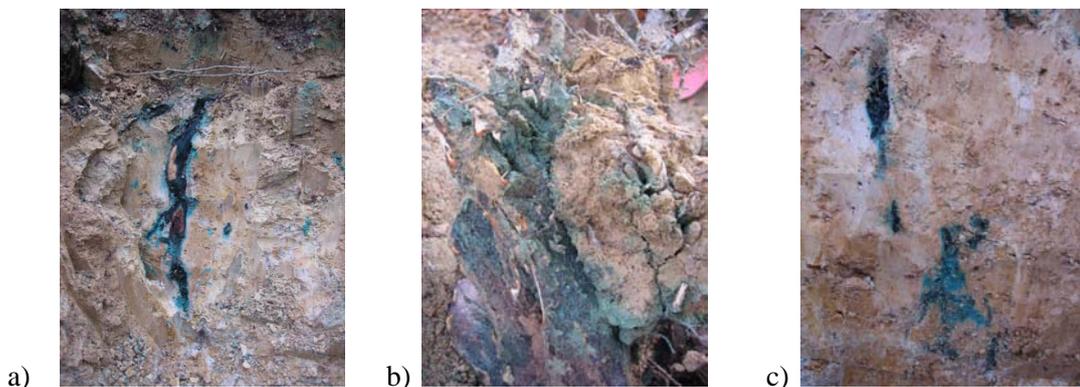


Abb. 4: Der Transport des in den Boden infiltrierenden Stammabflusswassers wurde durch Beimengung des Farbstoffes Brilliant Blue visualisiert. Die Fotos zeigen, dass der Stammabfluss unter anderem kanalisiert wurde durch a) Herzwurzeln der Buche, b) Senkerwurzeln und c) Ansammlung von Feinwurzeln in Makroporen.

Die bedeutsame Rolle des Wurzelsystems bei der Weiterleitung des in den Boden infiltrierenden Stammabflusses verdeutlicht außerdem Abbildung 5. Erkennbar ist, dass in den vom Tracer durchflossenen Bodenbereichen eine signifikant höhere Anzahl von Wurzeln vorkommen als in den nicht vom Tracer benetzten Bodenbereichen.

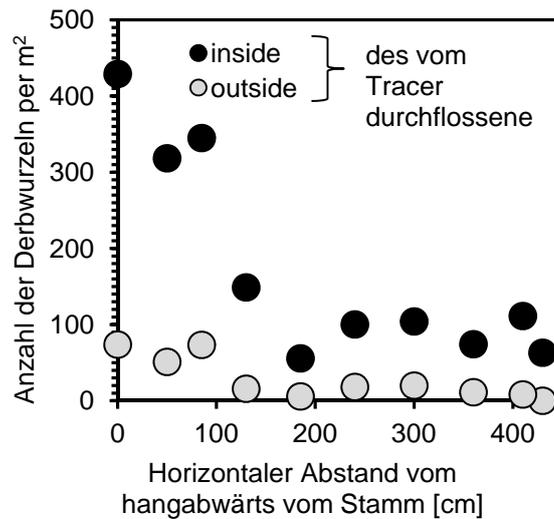


Abb. 5: Anzahl der Grobwurzeln ( $\varnothing < 2$  mm) innerhalb und außerhalb der vom Tracer durchflossenen Bodenbereiche.

## Schlussfolgerung

Zusammenfassend ergibt sich für den Standort folgendes: Bei Starkregenereignissen kanalisiert der Kronenschirm Niederschlagswasser. Dieses Wasser läuft am Stamm entlang und infiltriert in unmittelbarer Nähe des Stammes in den Boden. Vor allem durch die Wurzeln wird das Stammabfluss-Wasser im Boden kanalisiert. Trifft dieses Wasser auf einen Horizont bzw. eine Schicht mit geringer hydraulischer LF wird aus der überwiegend vertikalen Wasserbewegung eine überwiegend laterale Wasserbewegung. Dann wird das Wasser vor allem durch Zugwurzeln und horizontal orientierte Totwurzeln (bei anhaltendem Niederschlag) als schneller Zwischenabfluss hangabwärts bewegt. Stammabfluss bei Buche stellt somit einen punktuellen Eintrag von Niederschlagswasser in den Boden dar. Stammabfluss wird im Boden (vor allem) durch Senk- und Zugwurzeln kanalisiert. Stammabfluss bewirkt (je nach Bodenbedingungen) bei Starkregen-Ereignissen schnellen Zwischenabfluss. Deshalb kann geschlossen werden, dass der Umbau von Nadelwäldern zu von Buchen dominierten Mischwäldern die Abflussdynamik bewaldeter Einzugsgebiete verändern könnte.

## Literatur

- AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Schwärzel, K., A. Menzer, U. Spank, F. Clausnitzer, J. Häntzschel, T. Grünwald, B. Köstner und C. Bernhofer, K.H. Feger (2009). Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt Forest (Saxony, Germany). *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1994-2006.
- Spank, U. (2010): Site Water Budget: Influences of Measurement Uncertainties on Measurement Results and Model Results. Dissertation at the Institute of Meteorology and Hydrology, Technische Universität Dresden. Available via dialog: <http://nbn-esolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-62557> (accessed 10th Jan 2011).

# Quantifizierung von hyporheischen Austauschflüssen und deren Verweilzeiten mit Hilfe von reaktiven und konservativen Tracern

Dennis Lemke<sup>1</sup>, Zijie Liao<sup>2</sup> und Olaf A. Cirpka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Water & Earth System Science (WESS), Universität Tübingen, Deutschland

<sup>2</sup> Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen, Deutschland

## Zusammenfassung

Eine gängige Methode, den Austausch zwischen Fluss- und Grundwasser (sog. hyporheischer Austausch) zu charakterisieren, ist die Auswertung von Tracerexperimenten. Hierbei wird in der Regel ein konservativer Markierstoff in das Gewässer gegeben, und dessen zeitlicher Konzentrationsverlauf (sog. Durchbruchkurven) an einem unterstromigen Punkt gemessen und ausgewertet. Dies ist jedoch problematisch, weil der hyporheische Austausch und Mischungsprozesse im Fluss selbst (im Wesentlichen Dispersion) ähnlich auf die gemessenen Durchbruchkurven wirken. Um diese Prozesse zu trennen, führten wir einen Tracerversuch durch, bei dem wir zusätzlich zu einem konservativen Tracer (Uranin) auch einen reaktiven Tracer (Resazurin) einsetzten. Dieser wird selektiv und irreversibel in der hyporheischen Zone abgebaut, so dass er zusätzliche Informationen speziell zum hyporheischen Austausch liefern kann. Wir folgten der von Liao und Cirpka (2010) vorgestellten Methode und führten eine gekoppelte Analyse beider Durchbruchkurven durch, um die Intensität des hyporheischen Austauschs und die Verweilzeitverteilung des Flusswassers im Untergrund zu bestimmen. Wir erreichten so im Vergleich zur Analyse eines einzelnen Tracers eine spezifischere Bestimmung der den hyporheischen Austausch beschreibenden Parameter.

## Einleitung

Der Übergangsbereich zwischen Fließgewässern und Grundwasser wird als hyporheische Zone bezeichnet. Sie ist wichtig für die Ökologie von Fließgewässern und Grundwasserleitern, für biogeochemische Umsätze natürlicher und anthropogener Stoffe sowie für die Abreinigung von abwasser- und grundwasserbürtigen Schadstoffen (Boulton et al., 1998). Im sogenannten hyporheischen Austausch dringt Flusswasser in die Gewässersohle ein, verweilt für eine bestimmte Zeit im Sediment, und gelangt wieder in das Fließgewässer zurück. Hierbei gelangen Stoffe aus dem Fließgewässer in das Sediment, wo sie gegebenenfalls ausgefiltert oder mikrobiell abgebaut werden können. Es wird postuliert, dass der Grad der Filtration bzw. der chemischen Transformation von der Verweilzeit im Sediment abhängt. Damit kommt der Quantifizierung des hyporheischen Austauschs in Bezug auf die Stärke des Austauschs und die Verteilung der hyporheischen Verweilzeiten eine besondere Bedeutung für die Vorhersage des reaktiven Stofftransportes in Fließgewässern zu (Wondzell, 2011).

Tracerversuche in Fließgewässern, bei denen ein konservativer Markierstoff in das Fließgewässer zugegeben und dessen Durchbruchkurve weiter unterstromig gemessen wird, werden u.a. dazu eingesetzt, um neben Fließgeschwindigkeit und Dispersion auch den Austausch von Massen mit an das fließende Wasser angrenzende Kompartimente zu charakterisieren (Gooseff et al., 2003). In der

Modellvorstellung stellen diese Kompartimente (im Wesentlichen Pools und die hyporheische Zone) immobile Volumina (sog. transient storage zones) dar, die im Austausch mit dem fließenden Wasser stehen, und daher die Form der Durchbruchskurve beeinflussen können (Runkel, 1998). Es existieren allerdings auch Prozesse in der mobilen Zone selber, die die Durchbruchskurve auf ähnliche Weise beeinflussen können (im Wesentlichen Dispersion). Um diese Prozesse zu trennen, führten wir einen Tracerversuch durch, bei dem zusätzlich zu dem konservativen Tracer (Uranin) auch Resazurin als reaktiver Tracer eingesetzt wurde (Haggerty et al., 2008; Haggerty et al., 2009). Dieses wird selektiv und irreversibel in der hyporheischen Zone zu Resorufin abgebaut, und liefert somit zusätzliche Informationen speziell über den hyporheischen Austausch. Die so gewonnenen Parameter sollen in reaktiven Stofftransportmodellen für biogeochemische Inhaltsstoffe (z.B. gelösten Sauerstoff) in Flusswässern eingesetzt werden.

## Methoden

Wir führten einen Tracerversuch im Goldersbach, einem Zulauf des Neckars, nördlich von Tübingen durch. Der 1650 m lange Testabschnitt wurde so gewählt, dass das Flussbett über eine relativ hohe hydraulische Durchlässigkeit verfügt, und sich der Fluss selber durch eine hohe morphologische Dynamik aufgrund von zahlreichen Schleifen und Stufen auszeichnet. Da es im untersuchten Flussabschnitt nur wenige ausgeprägte Pools gibt, ist davon auszugehen, dass der Fluss hauptsächlich mit der hyporheischen Zone im Austausch steht.

Uranin und Resazurin wurden mittels Momenteingabe in den Fluss eingebracht. Der Versuch fand bei Dunkelheit statt, um Photodegradation der Tracer durch Sonnenlicht zu vermeiden. Um weitere mögliche Fehlerquellen aufgrund von Probennahme, -lagerung und -kontamination auszuschließen, verwendeten wir 3-Kanal-Feldfluorometer, die die Durchbruchskurven von Uranin, Resazurin und Resorufin simultan, kontinuierlich und in situ aufzeichneten. Die so gewonnenen Daten wurden mit der von Liao und Cirpka (2010) vorgestellten Methode ausgewertet, wonach die Tracerdurchbruchskurven anhand von folgender Modellgleichung beschrieben werden können:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + q_{he} \left( \int_0^t g(\tau) c(t - \tau) \exp(-\lambda \tau) d\tau - c(t) \right) \quad \text{Gl. 1}$$

Hierbei ist  $c$  die Tracerkonzentration im Fluss [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],  $t$  die Zeit nach Tracereingabe [ $\text{s}$ ],  $v$  die mittlere Fließgeschwindigkeit [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $D$  der Dispersionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $q_{he}$  die Austauschrate zwischen Flusswasser und hyporheischer Zone [ $1/\text{s}$ ],  $\tau$  die Verweilzeit im Untergrund [ $\text{s}$ ] und  $\lambda$  der Reaktionskoeffizient des Resazurins ( $\lambda = 0$  für Uranin) in der hyporheischen Zone [ $1/\text{s}$ ]. Die Advektions-Dispersionsgleichung wird hierbei um einen Term erweitert, der den Austausch zwischen Fluss und der hyporheischen Zone beschreibt. Für unsere Auswertung nehmen wir an, dass die Verweilzeitverteilung im Untergrund eine exponentielle Form mit dem Parameter  $k$  [ $1/\text{s}$ ] annimmt:

$$g(\tau) = k \cdot \exp(-k\tau) \quad \text{Gl. 2}$$

Mit Ausnahme von  $c$ ,  $t$  und  $x$  sind alle oben genannten Parameter freie Parameter, die durch die inverse Modellierung bestimmt werden.

Für Uranin und Resazurin wurden zunächst voneinander unabhängige Modellparametersätze bestimmt, mit denen die gemessenen Durchbruchskurven beschrieben werden konnten (vgl. Tab. 1). Anschließend wurde ein Parametersatz bestimmt, der sowohl die Durchbruchskurve des Uranins als auch des Resazurins simultan beschreiben kann.

## Ergebnisse

Abb. 1a zeigt die auf die Eingabemasse normierten gemessenen Durchbruchkurven von Uranin, Resazurin und Resorufin. Abb 1b und 1d zeigen zusätzlich zu den Durchbruchkurven auch die mit dem Parametersatz aus der gekoppelten Analyse berechneten Modellkurven in der linearen bzw. in der Semilogskala. Abb. 1c stellt die ebenfalls aus der gekoppelten Analyse berechneten Verweilzeitverteilungen ( $g(\tau)$ ) im Untergrund für Uranin und Resazurin dar. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven resultiert aus der Berücksichtigung eines Retardationsfaktors ( $R$ ) für das Resazurin.

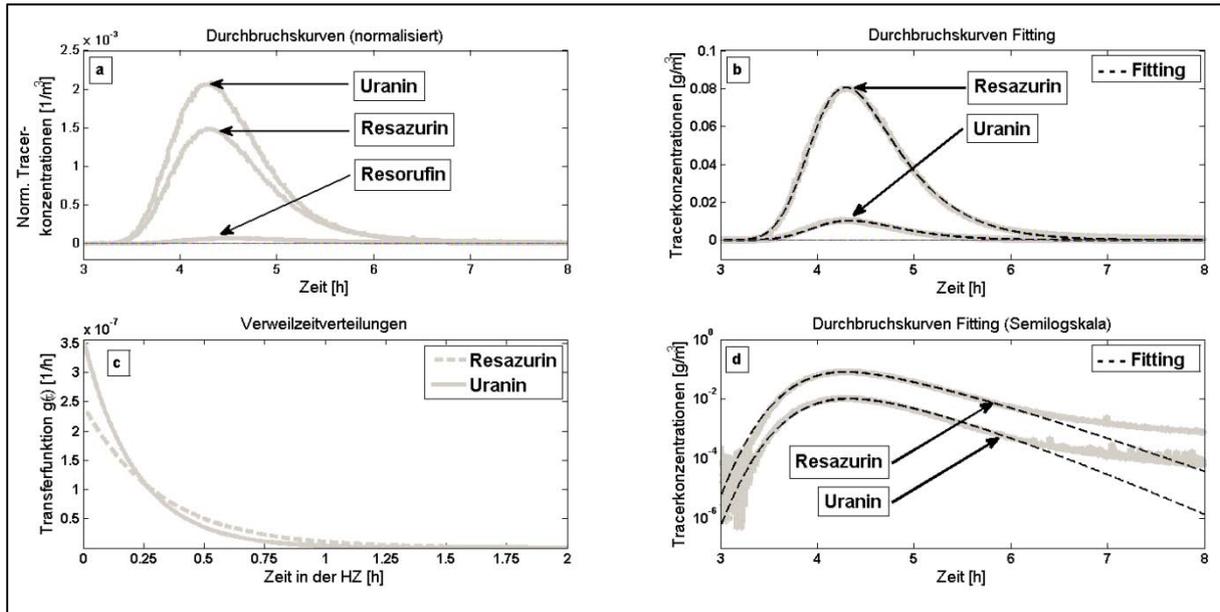


Abb.1: Darstellung der gemessenen Durchbruchkurven und Modellberechnungen (Erklärungen siehe Text)

Tab 1. zeigt die sowohl aus den separaten Analysen der einzelnen Tracer als auch die aus der gekoppelten Analyse beider Tracer modellierten Parameter. Die Werte für  $v$  und  $D$  sind vergleichbar mit Werten, die bei vorangegangenen Tracertests im selben Flussabschnitt bei ähnlichen Abflussbedingungen ermittelt wurden. Die Werte für  $\lambda$ ,  $R$  und  $k$  liegen in derselben Größenordnung wie die von (Haggerty et al., 2008; Haggerty et al., 2002) veröffentlichten Werte.

Tab. 1: Vergleich der aus der Analyse der Durchbruchkurven berechneten Parameter

	$v$ [m/s]	$D$ [m <sup>2</sup> /s]	$q_{he}$ [1/s]	$k$ [1/s]	$\lambda$ [1/s]	$R$ [-]
Uranin	0.11	0.44	1.39E-04	1.30E-03	-	-
Resazurin	0.11	0.52	1.13E-04	9.51E-04	1.81E-04	1.17
Uranin + Resazurin (gekoppelt)	0.11	0.49	1.20E-04	1.42E-03	1.70E-04	1.59

## Schlussfolgerung

Der Vergleich der Wiederfindungsraten von Uranin und Resazurin zeigt, dass etwa 25 % der eingegebenen Masse des Resazurins abgebaut wurde, etwa 5 % davon wurde zu Resorufin umgesetzt (vgl. Abb. 1a). Es ist daher anzunehmen, dass ein wesentlicher Teil des Flusswassers mit der hyporheischen Zone im Austausch stand. Die fehlenden 20 % können damit erklärt werden, dass das Resazurin in der hyporheischen Zone auch andere, nicht fluoreszierende Reaktionsprodukte besitzt, die von unseren Messgeräten nicht erfasst werden können (Haggerty et al., 2008).

Die Durchbruchskurven von Resazurin und Uranin zeigen unterschiedliche Sensitivitäten in Bezug auf die Parameter, die den hyporheischen Austausch beschreiben. Dies spiegelt sich in den Unterschieden der berechneten Dispersionskoeffizienten und Austauschraten mit der hyporheischen Zone wider. Folglich ist nicht zu erkennen, die Analyse welchen Tracers den „wahren“ Transport- und Austauschprozesse am nächsten kommt. Die berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit ist jedoch bei allen drei Parametersätze identisch, so dass davon auszugehen ist, dass dieser Parameter mit beiden Tracern mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

Die gekoppelte Analyse der Durchbruchskurven beider Tracer hat gegenüber der Analyse eines einzelnen Tracers den Vorteil, dass dies zum einen die zur Verfügung stehende Datendichte wesentlich erhöht, und zum anderen die konzeptionellen Stärken beider Tracer kombiniert. Wir waren in der Lage, einen einzigen Parametersatz zu berechnen, mit dem beide Durchbruchskurven mit hoher Genauigkeit beschrieben werden können (Abb. 1b,d). Wir nehmen daher an, dass diese Parameter den Stofftransport in dem von uns getesteten Flussabschnitt am besten beschreiben können. Vorangehende Arbeiten haben gezeigt, dass die Reaktionsraten von Resazurin zu Resorufin direkt proportional zur Sauerstoffzehrung im Sediment sind, so dass die berechneten Reaktionsraten zudem erste Anhaltspunkte bzgl. der mikrobiellen Aktivität in der hyporheischen Zone des getesteten Flussabschnitts geben können (Argerich et al., 2011).

Es muss jedoch beachtet werden, dass es immer noch Unklarheiten bzgl. der Unterscheidung zwischen sehr kurzen hyporheischen Aufenthaltszeiten und Mischungsprozessen im Fluss selber geben kann (vgl. Abb. 1c). Abb. 1d zeigt, dass es bei unserem Versuch insbesondere im Tailing zu systematischen Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Durchbruchskurven kommt. Dies mag daran liegen, dass die Verweilzeitverteilung in der hyporheischen Zone keine exponentielle Verteilung annimmt. Liao und Cirpka (2010) zeigten, wie die Form der Verweilzeitverteilung (sowohl parametrisiert als auch formfrei) direkt aus den Durchbruchskurven ermittelt werden kann.

## Literatur

- Argerich, A., Haggerty, R., Marti, E., Sabater, F. und Zarnetske, J. (2011): Quantification of metabolically active transient storage (MATS) in two reaches with contrasting transient storage and ecosystem respiration. *J Geophys Res-Biogeophys*, 116.
- Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H. und Valett, H.M. (1998): The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annu Rev Ecol Syst*, 29: 59-81.
- Gooseff, M.N., Wondzell, S.M., Haggerty, R. und Anderson, J. (2003): Comparing transient storage modeling and residence time distribution (RTD) analysis in geomorphically varied reaches in the Lookout Creek basin, Oregon, USA. *Adv Water Resour*, 26(9): 925-937.

- Haggerty, R., Wondzell und S.M. und Johnson, M.A. (2002): Power-law residence time distribution in the hyporheic zone of a 2nd-order mountain stream. *Geophys Res Lett*, 29(13): -.
- Haggerty, R., Argerich, A. und Marti, E. (2008): Development of a "smart" tracer for the assessment of microbiological activity and sediment-water interaction in natural waters: The resazurin-resorufin system. *Water Resour. Res.*, 44: -.
- Haggerty, R., Marti, E., Argerich, A., von Schiller, D. und Grimm, N.B. (2009): Resazurin as a "smart" tracer for quantifying metabolically active transient storage in stream ecosystems. *J Geophys Res-Bioge*, 114: -.
- Liao, Z. und Cirpka, O.A. (2010): Shape-Free Inference of Hyporheic Travel-Time Distributions from Conservative and Reactive Tracer Tests in Streams. *Eberhard Karls University Tuebingen, Tübingen*.
- Runkel, L. (1998): One-dimensional Transport with Inflow and Storage (OTIS): A Solute Transport Model for Streams and Rivers. *Water-Resources Investigations*, 98: 80.
- Wondzell, S.M. (2011): The role of the hyporheic zone across stream networks. *Hydrol Process*, 25(22): 3525-3532.

# Quantitative Analyse von Grundwasserzutritten und Fließwegen im Flachwasser mittels Thermographie

Tobias Schuetz und Markus Weiler

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Flachwasserzonen, wie sie in Feuchtfleichen oder auch in Bächen auftreten, stellen wichtige Lebensräume innerhalb aquatischer Ökosysteme dar. Gerade die räumliche Verteilung von Stillwasserzonen, Hauptfließwegen oder Grundwasserzuströmbereichen kann einen signifikanten Einfluss auf die Gewässerqualität (Stofftransport, Wassertemperatur/Sauerstoffgehalt) ausüben. Neue Methoden zur räumlichen Datenerhebung und Analyse dieser Verteilung können zu einem verbesserten Verständnis von Flachwassersystemen beitragen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden verschiedene tragbare thermographische Systeme getestet. Diese wurden zur Detektion und Quantifizierung von lokalen Grundwasserzutritten sowie, in Kombination mit erhitztem Wasser, zur räumlichen Visualisierung von Fließwegen und zur quantitativen Beschreibung des Stofftransportes eingesetzt. So konnten in zwei Kleinzugsgebieten lokal begrenzte Grundwasserzutritte und verborgene Dränrohre detektiert werden. Zusätzlich wurden mittels der Thermalbildanalyse sowohl die Durchmischungstrecken im Gerinne, als auch die relativen Anteile der Grundwasserzutritte am Gerinedurchfluss bemessen. Die erzielten Ergebnisse wurden mit herkömmlichen Methoden wie Leitfähigkeits-, Temperatur- oder Abflussmessung validiert. In einer Reihe weiterer Tests wurde durch Pulsinjektionen von erhitztem Wasser in einer künstlichen Feuchtfleiche die Verteilung der Hauptfließwege im Infrarotbereich markiert und damit sichtbar gemacht. Dank der hohen Auflösung moderner thermographischer Systeme konnten neben der reinen Visualisierung auch quantitative Analysen der Warmwasserausbreitung durchgeführt werden. So wurde neben der mittleren Fließgeschwindigkeit auch die 2-dimensionale hydrodynamische Dispersion des markierten Wassers zwischen einzelnen Thermalbildern berechnet. Durch die Zugabe von NaCl und zusätzlichen Messungen der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit konnte die Konservativität des Transportes von erhitztem Wasser simultan untersucht werden.

Zusammenfassend betrachtet, erlauben tragbare Thermographiesysteme nicht nur eine vereinfachte Analyse von Grundwasser - Oberflächenwasserinteraktion, sie bieten auch neue Möglichkeiten zur räumlichen Analyse von Fließsystemen.

## Einleitung

Detailliertes Wissen um die Fließgeschwindigkeitsverteilung in Flachwassersystemen ist von grundlegender Bedeutung um den Transport von gelösten Stoffen [Gooseff *et al.*, 2011], suspendierten Sedimenten [Lajeunesse *et al.*, 2010] oder der Vegetationsentwicklung [Cheng *et al.*, 2011] zu verstehen. Neben der Abflusssituation bestimmen die Geomorphologie und die Vegetation [z.B. Wörman and Kronnäs, 2005] die Fließgeschwindigkeitsverteilung in Flachwassersystemen. Gerade in Gewässern

mit geringen Abflüssen und Wassertiefen kann auch der Zustrom von Grundwasser (z.B. Drainagenabfluss) einen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeitsverteilung haben und damit auch auf den Stofftransport. Ebenso können Grundwasserzutritte auch durch Verdünnungseffekte oder den zusätzlichen Eintrag von Schadstoffen die Gewässerqualität [z.B. *Riise et al.*, 2004] direkt verändern. Der Stofftransport in Flachwassersystemen wird üblicherweise durch die Advektion und die hydrodynamische Dispersion beschrieben [z.B. *Huang et al.*, 2008]. Gerade in Feuchtflächen oder bewachsenen Bächen hat die räumliche Variabilität der aquatischen Vegetation, der Mikrotopographie oder der Oberflächenrauigkeit durch Scherkräfte, Turbulenzen und die Diffusion einen großen Einfluss auf die hydrodynamische Dispersion [Nepf, 1999]. Methoden, die eine flächenhafte Beobachtung von Fließprozessen erlauben, können daher zu einem verbesserten Verständnis der Funktion von Flachwassersystemen beitragen.

Für hydrologische Fragestellungen wurde bisher die Messung thermaler Ausstrahlung im Infrarot-Bereich hauptsächlich zur Bestimmung der Bodenfeuchte oder der Evapotranspiration genutzt. In der jüngsten Zeit wurden tragbare thermographische Systeme auch zur hoch aufgelösten Analyse von Prozessen im Fluss-Grundwasser-Kontinuum angewendet: Anhand der Strahlungstemperaturen (ST) von Wasseroberflächen wurden u.a. die Unterschiede der Temperaturverteilungen an der Wasseroberfläche von Basisabfluss und Abflussereignissen [Cardenas et al., 2008] analysiert, und die oberflächlichen Strömungsmuster von Flüssen [Puleo et al., 2012] und auch der Austausch von Grund- und Flusswasser [z.B. Deitchman and Loheide, 2009; Schuetz and Weiler, 2011] quantifiziert.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Verwendbarkeit tragbarer thermographischer Systeme für natürliche und künstliche Tracermethoden in Flachwassersystemen getestet. Neben der Quantifizierung von räumlich begrenzten Grundwasserzutritten in Bächen anhand der saisonal variierenden Differenz von Grundwasser- und Bachwassertemperaturen, wurde eine künstliche Tracermethode entworfen und getestet: Die räumliche Beobachtung von pulsweise injiziertem erhitztem Wasser mittels tragbarer thermographischer Systeme. Ziel dieser Untersuchung war es, zum Einen, die räumliche Verteilung von Fließwegen, Fließgeschwindigkeiten und der hydrodynamischen Dispersion in einer Experimental-Feuchtfläche zu verstehen, sowie zum Anderen, zu testen, ob der Transport von erhitztem Wasser mit konservativem Stofftransport vergleichbar ist.

### **Detektion und Quantifizierung räumlich begrenzter Grundwasserzutritte**

Der grundlegende Ansatz zur Quantifizierung der Grundwasserzuströme ist die Messung der „End-Member“, die zur Anwendung einfacher Mischungsrechnungen auf den Grundwasserzufluss und das Bachwasser oberhalb und unterhalb des Grundwasserzustroms benötigt werden [siehe: *Selker et al.*, 2006]. Daher ist die Bestimmung der Durchmischungsstrecke von Grundwasserzuström und Bachwasser fundamental zur Quantifizierung desselben. Tragbare thermographische Systeme können anhand der Beobachtung der räumlichen Verteilung der ST von Wasserflächen zur Bestimmung von Durchmischungsstrecken genutzt werden. Die Quantifizierung detektierter Grundwasserzuströme ist im Rahmen von vier Randbedingungen möglich: 1) eine beobachtbare Änderung der ST des Baches Bach-abwärts des Zustroms, 2) eine komplett durchmischte Wassersäule im Bach, 3) die ST des Grundwasserzustroms muss beobachtbar sein und 4) während des Messzeitraumes müssen die Wasserflüsse in Bach und Grundwasser konstant sein.

Auf der Basis detektierter Grundwasserzuströme und deren Durchmischungsstrecken wurden weitere unabhängige Methoden zur Quantifizierung der Grundwasserzuströme angewendet: Neben Abflussmessungen (Q) mittels Salzverdünnungsmethode ober- und unterhalb der Zustrombereiche wurde die elektrische Leitfähigkeit (EL) und die T aller „End-Member“ bestimmt. Alle angewendeten Methoden (ST, T, EL, Q) und deren Unsicherheiten (Gaußsche Fehlerfortpflanzung) wurden miteinander verglichen. Zur Messung der ST der untersuchten Bäche wurde das tragbare thermographische System VARIOCam hr 190 (INFRATEC) mit  $640 \times 480$  Pixeln und einer relativen Genauigkeit von  $0.08^\circ \text{K}$  verwendet. In die Fehlerberechnung für die Grundwasseranteile auf Basis der ST wurde zusätzlich die Standardabweichung der beobachteten ST in einer abgegrenzten „End-Member“-Fläche einbezogen. Des Weiteren wurden das Abflussmessset MST2 SOMMER (der Fehler der Salzverdünnungsmessung wurde nach Day [1976] mit 5 – 10 % veranschlagt) sowie das Temperatur-Leitfähigkeits-Messgerät LF92 (WTW) mit einem relativen Fehler von 0.5 % für die EL und einem absoluten Fehler von  $0.2^\circ \text{K}$  für T verwendet.

In zwei Quelleinzugsgebieten in Süd-Westdeutschland wurden während mehrerer Messkampagnen in Sommer und Winter Grundwasserzuströme und alte Drainagen detektiert und deren Abfluss quantifiziert (Abbildung 1 a, b). Einige der detektierten Zustrombereiche erzeugten keine Änderung der ST Bach-abwärts (Randbedingung 1). Die absoluten Abflüsse in den untersuchten Bächen lagen während der Messkampagnen zwischen 0.3 und 6 l/s, während die Anteile der Grundwasserzuströme am Abfluss zwischen 15 und 75 % betragen. Der Vergleich der vier Methoden (ST, T, EC, Q) ergab eine Standardabweichung der Grundwasseranteile zwischen 5 und 11 % für die verschiedenen Beobachtungen. Während die temperaturbasierten Methoden (ST, T) in der Fehleranalyse eine größere Unsicherheit für die bestimmten Grundwasseranteile aufwiesen (6 – 55 %) als die Berechnungen auf Basis der EC-Daten (4 – 22 %), weisen die Berechnungen anhand der Abflussmessungen gerade für kleinere Grundwasseranteile die größten Fehler auf.

### **Räumliche Analyse von Fließwegen und Transportprozessen**

In einer künstlich angelegten, permanent durchflossenen Feuchtfäche ( $65 \text{ m}^2$ ) wurde die Anwendung tragbarer thermographischer Systeme in Kombination mit pulsweise injiziertem, erhitztem Wasser als neue Tracermethode getestet (Abbildung 1 c, d). Im Verlauf der Versuchsreihen wurden zwei thermographische Systeme (TROTEC IC080 V Thermographie Kamera ( $160 \times 120$  Pixel; relativer Fehler  $0.1^\circ \text{K}$ ) und FLIR E320 Thermacam ( $320 \times 240$  Pixel; relativer Fehler  $0.08^\circ \text{K}$ )) von einem Beobachtungsturm aus zur Analyse der Ausbreitung des erhitzten Wassers genutzt. Um die Konservativität des Transports von erhitztem Wasser in einer kühleren Umgebung mit zu untersuchen, wurde das erhitzte Wasser vor der Einspeisung mit NaCl angereichert. Dadurch konnten räumlich verteilte, automatische Messungen der Durchgangskurven von T und EL (VAN ESSEN CTD-Diver; relativer Fehler EL 1 %; absoluter Fehler T  $0.1^\circ \text{K}$ ) zusätzlich durchgeführt werden. Neben der direkten Visualisierung der Fließwege im Infrarotbereich wurden die Transportprozesse in der Feuchtfäche mittels zwei- bzw. ein-dimensionaler Momentenanalyse [z.B. Kadlec, 1994; Peeters et al., 1996] der Thermalbilder (ST-Verteilungen) und der T- und EL-Daten quantifiziert. Um Abkühlungseffekte durch Ausstrahlung und Wärmeleitung zu berücksichtigen, wurden innerhalb der Thermalbildsequenzen Bilanzen zwischen den 0-ten Momenten der beobachteten ST-Verteilungen berechnet. Der u.a. von Holley and Jirka [1986] publizierte Zusammenhang, zwischen der longitudinalen oder lateralen Varianz von Konzent-

rationsverteilungen und der hydrodynamischen Dispersion in Fließgewässern, wurde in dieser Studie zur Berechnung der Dispersion zwischen den einzelnen Thermalbildern verwendet.

Während aller Versuche konnten in den Thermalbildern die charakteristischen Fließwegverteilungen in der Feuchtfläche sichtbar gemacht werden (Abbildung 1d). Die Punktmessungen von T und EL zeigten über einen Beobachtungszeitraum bis 12 min einen zeitlichen Versatz in der Größenordnung des Messintervalls. Dieser konnte jedoch auch in Laborversuchen zwischen den Messmethoden von T (Wärmeleitung) und EL (Leitfähigkeit des umgebenden Mediums) beobachtet werden. Im Vergleich der 0-ten Momente der ST-Verteilungen wurde bei langsameren Fließgeschwindigkeiten innerhalb 1 min eine Abkühlung um 11 % festgestellt, während bei schnelleren Fließgeschwindigkeiten innerhalb 23 s keine Abkühlung festgestellt werden konnte. Anhand von Gleichung (1) konnte zwischen einzelnen Beobachtungen die räumliche Variabilität der lateralen ( $0.018 - 0.031 \text{ m}^2/\text{s}$ ) und der longitudinalen Dispersion ( $-0.006 - 0.008 \text{ m}^2/\text{s}$ ) bestimmt werden. Die beobachtete Größenordnung der Dispersion wurde auch in anderen Studien in Feuchtflächen nachgewiesen [z.B. Kadlec, 1994]. Negative Werte der longitudinalen Dispersion konnten durch den Einfluss der Bathymetrie auf die Fließrichtung erklärt werden.

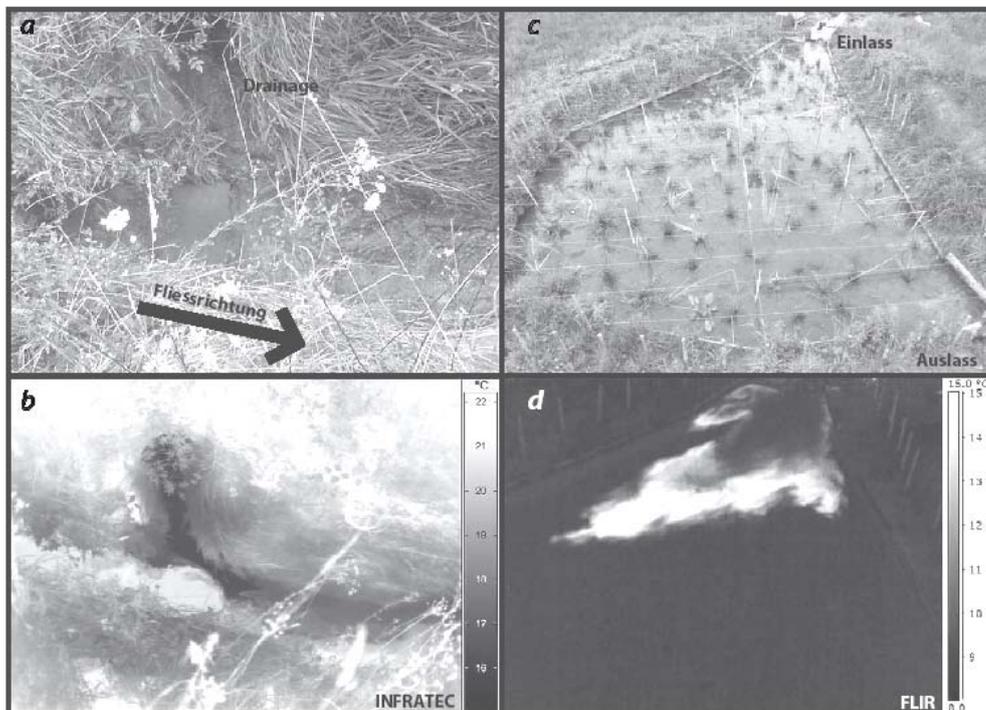


Abb. 1: Mischung von Bachwasser und Drainagenabfluss als Foto (a) und im Thermalbild (b); Experimental-Feuchtfläche (c); Thermalbild eines Warmwasser-Pulses (d).

## Diskussion

Die Fehler bei der Bestimmung der Wassertemperatur durch die Messung der ST von Wasserflächen werden in erster Linie durch die Reflexion langwelliger Strahlung an den Wasseroberflächen, die Ausbildung von thermischen Grenzschichten und der temperaturabhängigen Stratifizierung der Wassersäule verursacht [Kay et al., 2005; Torgersen et al., 2001]. Die Ausbildung von thermischen Grenzschichten und eines Temperaturgradienten in der Wassersäule (Randbedingung 2) konnten auf Grund

der hohen Fließgeschwindigkeiten, der Turbulenzen und den geringen Wassertiefen der untersuchten Gewässer für die hier vorgestellten Versuche ausgeschlossen werden. Der Einfluss der langwelligen Ausstrahlung der Umgebung wurde in der Untersuchung der Grundwasserzutritte durch die variable Positionierung des thermographischen Systems umgangen, während in der Feuchtfläche die langwellige Hintergrundstrahlung durch die künstlich induzierte Hitze überlagert wurde. Dem Einfluss des Beobachtungswinkels und der Oberflächenrauigkeit (hier: Wellen) auf die effektive Emissivität der Wasserflächen [Masuda et al., 1988] wurde durch die Positionierung der Systeme und die flächenhafte Analyse der ST Rechnung getragen. Weitere Fehlerquellen können die Luftfeuchte und die Beobachtungsdistanz sein, die jedoch in der Skala dieser Versuche vernachlässigbar sind [Feijt and Kohsiek, 1995].

Ein großer Vorteil der Anwendung thermographischer Systeme für die In-Situ-Untersuchung von Gewässern ist neben der einfachen und direkten Detektion von Grundwasserzutritten die einfache Bestimmung der Durchmischungstrecke, die für die End-Member-Analyse notwendig ist. Der berechnete, relative Anteil der Grundwasserzutritte am Abfluss im Unterlauf von bis zu 75% zeigt die Bedeutung dieser Quellen für den Basisabfluss und den Stofftransport. Für die Bestimmung der Transportprozesse liegt der Vorteil dieser Methode in der direkten, flächenhaften Messung, die für jedes betrachtete Pixel einen absoluten ST-Wert ergibt. Andere fernerkundliche Methoden zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und der Dispersion, wie z. B. Farbtracer [Tanino and Nepf, 2009] verlangen aufwendigere Verfahren zur Bildanalyse. Ein Nachteil dieser Methode, der anderen fernerkundlichen Methoden gemein ist, ist die Messung an der Wasseroberfläche, die die Annahme einer komplett durchmischten Wassersäule erfordert.

## Schlussfolgerungen

Die Messung der Strahlungstemperatur von Wasserflächen bietet sowohl als natürliche wie auch als künstliche Tracermethode neue Möglichkeiten für die hydrologische Forschung: Die raum-zeitliche Quantifizierung der multi-direktionalen Variabilität von Stofftransportprozessen in Bächen und Feuchtflächen. So kann die Differenz von mittleren Fließ- und Transportgeschwindigkeiten zu den räumlich variablen Transportprozessen direkt analysiert werden. Des Weiteren kann z.B. die Validierung von 2-dimensionalen hydraulisch-numerischen Modellberechnungen durch wiederholte, ökologisch unbedenkliche Warmwassereinspeisungen verbessert werden. Die berührungslose Detektion und direkte Quantifizierung von Grundwasserzutritten in Quellbächen kann gerade während Trockenperioden die Zusammensetzung des Basisabflusses erklären und zur Verbesserung des nachhaltigen Wassermanagements beitragen.

## Literaturverzeichnis

- Cardenas, M., J. Harvey, A. Packman, and D. Scott (2008), Ground-based thermography of fluvial systems at low and high discharge reveals potential complex thermal heterogeneity driven by flow variation and bioroughness, *Hydrological Processes*, 22(7), 980.
- Cheng, Y., M. Stieglitz, G. Turk, and V. Engel (2011), Effects of anisotropy on pattern formation in wetland ecosystems, *Geophys. Res. Lett.*, 38(4), L04402.
- Day, T. J. (1976), On the precision of salt dilution gauging, *Journal of Hydrology*, 31(3-4), 293-306.

- Deitchman, R. S., and S. P. Loheide, II (2009), Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face, *Geophys. Res. Lett.*, 36.
- Feijt, A. J., and W. Kohsiek (1995), The effect of emissivity variation on surface temperature determined by infrared radiometry, *Boundary-Layer Meteorology*, 72(3), 323-327.
- Gooseff, M. N., D. A. Benson, M. A. Briggs, M. Weaver, W. Wollheim, B. Peterson, and C. S. Hopkinson (2011), Residence time distributions in surface transient storage zones in streams: Estimation via signal deconvolution, *Water Resour. Res.*, 47(5), W05509.
- Holley, E., and G. Jirka (1986), Environmental and water-quality operational studies: mixing in rivers. Final report, Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Dept. of Civil Engineering.
- Huang, Y., J. Saiers, J. Harvey, G. Noe, and S. Mylon (2008), Advection, dispersion, and filtration of fine particles within emergent vegetation of the Florida Everglades, *Water Resour. Res.*, 44.
- Kadlec, R. (1994), Detention and mixing in free water wetlands, *Ecological Engineering*, 3(4), 345-380.
- Kay, J., S. Kampf, R. Handcock, K. Cherkauer, A. Gillespie, and S. Burges (2005), Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(5), 1161-1175.
- Keefe, S., L. Barber, R. Runkel, J. Ryan, D. McKnight, and R. Wass (2004), Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands, *Water Resour. Res.*, 40(1).
- Lajeunesse, E., L. Malverti, and F. Charru (2010), Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling, *J. Geophys. Res.*, 115(F4), F04001.
- Masuda, K., T. Takashima, and Y. Takayama (1988), Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions, *Remote Sensing of Environment*, 24(2), 313-329.
- Nepf, H. (1999), Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resources Research*, 35(2), 479-489.
- Peeters, F., A. Wüest, G. Piepke, and D. M. Imboden (1996), Horizontal mixing in lakes, *J. Geophys. Res.*, 101(C8), 18361-18375.
- Puleo, J. A., T. E. McKenna, K. T. Holland, and J. Calantoni (2012), Quantifying riverine surface currents from time sequences of thermal infrared imagery, *Water Resour. Res.*, 48(1), W01527.
- Riise, G., H. Lundekvam, Q. Wu, L. Haugen, and J. Mulder (2004), Loss of Pesticides from Agricultural Fields in SE Norway—Runoff Through Surface and Drainage Water, *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2), 269-276.
- Schuetz, T., and M. Weiler (2011), Quantification of localized groundwater inflow into streams using ground-based infrared thermography, *Geophys. Res. Lett.*, 38(3), L03401.
- Selker, J., N. Van De Giesen, M. Westhoff, W. Luxemburg, and M. Parlange (2006), Fiber optics opens window on stream dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 33(24), 24401.
- Tanino, Y., and H. M. Nepf (2009), Laboratory investigation of lateral dispersion within dense arrays of randomly distributed cylinders at transitional Reynolds number, *Physics of Fluids*, 21(4), 046603.
- Torgersen, C., R. Faux, B. McIntosh, N. Poage, and D. Norton (2001), Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams, *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 386-398.
- Wörman, A., and V. Kronnäs (2005), Effect of pond shape and vegetation heterogeneity on flow and treatment performance of constructed wetlands, *Journal of Hydrology*, 301(1-4), 123-138.

# **Untersuchung des Einflusses von Sohlstrukturen auf Strömung und redox-sensitive Stoffumsätze in der hyporheischen Zone mittels eines gekoppelten Oberflächen-Grundwassermodells**

Jan H. Fleckenstein, Nico Trauth, Christian Schmidt und Uli Maier

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig, Deutschland

In der hyporheischen Zone (HZ) finden wichtige biogeochemische Stoffumsätze statt, die u.a. für die Selbstreinigung des Flusses von Bedeutung sind. Verweilzeiten und Fließpfade in der HZ sind vom Abfluss, der Sohlstruktur sowie hydrogeologischen Faktoren abhängig. In den meisten numerischen Modellen wird der hydraulische Gradient, der den Austauschfluss zwischen Fluss- und Untergrund bestimmt, allein über die hydrostatische Druckverteilung an der Gewässersohle beschrieben. Dabei wird der hydrodynamische Einfluss von über eine Sohlstruktur strömendem Wasser auf die Druckverteilung an der Gewässersohle vernachlässigt. Diese Effekte bewirken z.B., dass an der Luv-Seite eines Riffles Flusswasser infiltriert und nach gewisser Verweilzeit im Sediment an der Lee-Seite wieder in den Fluss exfiltriert. Auf diesem Fließweg werden redox-sensitive Stoffe, wie z.B. Sauerstoff, bioverfügbarer Kohlenstoff oder Nitrat transportiert und biogeochemischen Reaktionen ausgesetzt.

Um den hydrostatischen und hydrodynamischen Anteil des Drucks abbilden zu können, wird ein Modellansatz vorgestellt, der sowohl die turbulente Flussströmung über eine beliebige Sohlstruktur simuliert als auch die Strömung im angekoppelten porösen Medium. Strömung und Wasserstand im Gerinne werden mit OpenFOAM, einer CFD Software mit einem Zwei-Phasen-Ansatz (Wasser & Luft) simuliert. OpenFOAM löst die Navier-Stokes-Gleichungen in 3D und bildet Turbulenzen durch Large-Eddy-Simulation (LES) ab. Die Kopplung an ein Strömungsmodell für den porösen Untergrund erfolgt über den Druck an der Flusssohle, der von OpenFOAM dynamisch berechnet wird und als Randbedingung erster Art auf das finite Volumen Modell MIN3P übertragen wird. Mit MIN3P können konservativer Stofftransport und biogeochemische Reaktionen modelliert werden. Grundwasserzu- oder -abstrom wird über eine untere Randbedingung abgebildet.

Auf Basis dieser Modellkopplung werden eine Reihe von numerischen Experimenten durchgeführt, in denen bei unterschiedlichen Abflüssen und Sohlstrukturen Druckverteilungen an der Gewässersohle generiert werden. Aus den Druckverteilungen ergeben sich, in Abhängigkeit von Grundwasserzu- und abströmen sowie Heterogenitäten in den Durchlässigkeiten, unterschiedliche Eindringtiefen des Flusswassers und Verweilzeiten in der HZ. Diese hydraulischen Verhältnisse steuern den Eintrag von Sauerstoff sowie bioverfügbarem Kohlenstoff und limitieren somit die biogeochemischen Reaktionen der redox-sensitiven Stoffe in der HZ.

## **Experimentelle Analyse und Modellierung des Sauerstoffhaushaltes im Hyporheal des Kharaa (Mongolei)**

Melanie Hartwig und Dietrich Borchardt

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ),  
Dpt. Aquatische Systemanalyse und Management, Magdeburg, Deutschland

Die hyporheische Zone rückt mehr und mehr in den Fokus der Hydrologie, da dieses Ökoton wichtige Funktionen hat: es ist Habitat für eine Vielzahl von Organismen und hier finden eine Reihe besonders intensiver Stoffumsatzprozesse statt. Diese zwei Funktionen werden u.a. durch die Verfügbarkeit von Sauerstoff beeinflusst. So können zum Beispiel unter Sauerstoffmangel Habitatverlust, Denitrifizierung sowie die Lösung von Phosphor auftreten. Wiederrum hängt der Eintrag, die Verweilzeit und Zehrung des Sauerstoffs im Hyporheal maßgeblich von Sohlenmorphologie und Sedimenteigenschaft ab.

Ziel der Studie ist daher die Analyse der Prozesse bezüglich des Sauerstoffhaushalts in den Kompartimenten Oberflächenwasser und Hyporheal entlang eines Gewässergradienten sowie unter Einfluß eingetragener Feinsedimente. Das Untersuchungsgebiet des Kharaa (Mongolei) ist in diesem Kontext besonders geeignet, denn es sich erstens in einem naturnahen Gewässerzustand befindet, und es zweitens eine identifizierbare punktuelle Schwebstoffquelle für das Hauptgewässer gibt, was eine Kausalanalyse der Kolmationsproblematik ermöglicht.

Zur numerischen Systemanalyse wurde ein Zwei-Kompartimentenmodell auf der Skala von Pool-Riffle-Sequenzen konzipiert. Ein dafür angelegtes Intensivmessprogramm beinhaltet Methoden zur Charakterisierung der Hydraulik, des hydraulischen Austauschs, sowie der biochemischen Prozesse des Gerinnes und Interstitials und wurde jeweils im Frühjahr und Sommer 2010 und 2011 durchgeführt. Das Modellkonzept wurde dann in AQUASIM realisiert und anhand der Messdaten kalibriert.

Die Analyse der Messdaten zeigt eine verringerte Interaktion zwischen Oberflächenwasser und Hyporheal stromabwärts. Speziell kam es zu einer Abnahme der Diversität der Sauerstoffkonzentrationen im Flussbetsediment. Zum anderen können für den kolmatierten Abschnitt Funktionsverluste für Habitat, Produktion und Regulation durch erhöhte suspendierte bzw. infiltrierte Feinsedimente aufgezeigt werden. Diese Ergebnisse konnten durch die numerische Analyse von Temperatur- und Sauerstoffganglinien bestätigt werden.

Diese Ergebnisse liefern einen wichtigen Beitrag zur Identifizierung kritischer Zustände sowohl für die aquatische Ökologie als auch für die Selbstreinigungsfunktion des Gewässers.

# **Einsatz von Online-Sonden-Technik zum Monitoring von prozessgesteuertem Stickstofftransport**

Marc Schwientek, Matthias Fleischer und Hermann Rügner

Water & Earth System Science (WESS), Universität Tübingen, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Stickstoff ist ein essentieller Nährstoff, der das Pflanzenwachstum steuert. Im Überschuss führt er zur Überdüngung und stellt weltweit einen der am weitesten verbreiteten Schadstoffe in Gewässerökosystemen inklusive der Weltmeere dar. Der Transport von den anthropogenen Stickstoffquellen in der Landwirtschaft und in urbanen Räumen hin zu den Ozeanen findet überwiegend über Fließgewässer statt. Die Beobachtung von mobilen Stickstoffspezies gehört daher in Gewässerüberwachungsprogrammen zum Standard.

In Abhängigkeit der Herkunft und der im Einzugsgebiet dominierenden hydrologischen Prozesse zeigt der Stickstofftransport eine kurzfristige Dynamik, die zumeist mit konventionellen Beprobungsmethoden nicht kosteneffizient zu erfassen ist. Dadurch wird einerseits die Ermittlung von Frachten mit dem Ziel der Stoffbilanzierung auf Einzugsgebietsskala unscharf. Andererseits erlauben konventionelle Methoden kein genaues Verständnis der zeitlich variablen Speicherung und Mobilisierung von Stickstoff in der Landschaft. Hochaufgelöste Datenreihen von Nitrat-Konzentrationen und zusätzlichen Wasserqualitätsparametern in Kombination mit Abflusszeitreihen bieten neue Einblicke in hydrologische Mechanismen und den Transport von Nitrat in Abhängigkeit der hydrologischen Bedingungen. Als neue Werkzeuge bieten sich hier online-Sonden an, die kontinuierlich zahlreiche physikochemische Parameter sowie beispielsweise Nitrat-Konzentrationen erfassen können.

Durch das Institut WESS (Water & Earth System Science Competence Cluster) wurden drei bezüglich Nutzung, Geologie und Hydrologie kontrastierende Einzugsgebiete mit entsprechender Technik ausgerüstet. Die ersten Datenreihen vermitteln nicht nur detaillierte Einblicke in die Dynamik des Stofftransports, sondern dokumentieren, dass die dominierenden, die Stickstoff-Mobilisierung steuernden Prozesse sich auch in räumlich direkt benachbarten Einzugsgebieten stark unterscheiden. Hierdurch werden zudem neue Informationen über die Funktionsweise des hydrologischen Systems erlangt. Das durch den Einsatz der Sondentechnik erworbene Prozessverständnis und die hochaufgelösten Datenreihen sollen in einem nächsten Schritt zum Aufbau bzw. zur Verbesserung von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen dienen.

## **Einleitung**

Stickstoff wird über vielfältige Pfade in Gewässer eingetragen. Generell ist zwischen punktuellen und diffusen Quellen zu unterscheiden. Dominierende Punktquellen sind häusliche und industrielle Abwässer, die diffusen Einträge stammen überwiegend aus landwirtschaftlicher Düngung und atmosphärischer Deposition (EEA, 1999). Aufgrund der kontinuierlich verbesserten Reinigungsleistung der Abwasserkläranlagen ist seit Jahren eine Abnahme von punktuellen Stickstoffeinleitungen zu be-

obachten. Damit einhergehend ist eine relative Zunahme der diffusen Einträge. Flächenhaft in der Landwirtschaft aufgebrauchte Dünger können entweder direkt über Oberflächen- und Zwischenabfluss oder indirekt über das Grundwasser in Oberflächengewässer gelangen. In diesem Zusammenhang ist von einer zunehmenden Abhängigkeit der Stickstofffrachten von den relativen Landnutzungsanteilen, insbesondere der intensiv bewirtschafteten Ackerflächen auszugehen (Alvarez-Cobelas et al., 2008). Andererseits deuten in Deutschland leicht abnehmende Trends der Nitrat-Konzentrationen an zahlreichen durch die LAWA regelmäßig beobachteten Fließgewässern darauf hin, dass die langewährenden Bemühungen um einen effizienteren Einsatz von Stickstoffdünger allmählich Wirkung zeigen (BMU, 2008).

In gut belüfteten Gewässern tritt Stickstoff ganz überwiegend oxidiert in seiner mobilsten Form, dem Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) auf. Der Verlauf der Nitrat-Konzentrationen im Gewässer spiegelt die wechselnden Beiträge verschiedener Stickstoff-Reservoirs im Einzugsgebiet sowie die aktiven Transportmechanismen wieder und enthält damit auch wertvolle Informationen über die zugrundeliegenden hydrologischen Prozesse. Um die Nitratdynamik und damit die beteiligten, oft hochdynamischen Prozesse entschlüsseln zu können, sind jedoch hoch aufgelöste Datenreihen unabdingbar (z.B. Neal et al., 2012, Bowes et al., 2009).

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es durch den Einsatz stationärer Sonden detailliertere Informationen über den Stickstoffhaushalt in intensiv genutzten Landschaften und den Verbleib der Stoffe zu erhalten. Weiterhin soll durch die zeitlich hoch aufgelösten Signale ein verbessertes Verständnis der dynamischen Prozesse erlangt werden, die durch konventionelle Beprobungsintervalle unsichtbar bleiben. U.a. soll weiter ergründet werden, inwieweit hydrologische Systeme chemostatisches Verhalten an den Tag legen und als Linearkombination weniger Speicher beschreibbar sind (z.B. Godsey et al., 2009).

## **Methode**

Im Rahmen des laufenden Projektes wurden drei Teileinzugsgebiete des oberen Neckars bei Tübingen mit online-Sondentechnik ausgerüstet. Die Gebiete liegen in unmittelbarer Nachbarschaft und weisen klimatisch fast identische Bedingungen auf, kontrastieren aber hinsichtlich der hydrologisch dominierenden Mechanismen und der Landnutzung stark (Abb. 1):

Das Ammer-Einzugsgebiet (Fläche bis Pegel Pfäffingen: 134 km<sup>2</sup>) ist zu rund 70 % landwirtschaftlich genutzt und mit ca. 600 Einw./km<sup>2</sup> dicht besiedelt, während Wald mit einem Anteil von 12 % eine untergeordnete Rolle spielt. Die Ammer ist stark durch verkarstete Grundwasserleiter des oberen Muschelkalk und des Gipskeupers geprägt, was zu einem außerordentlich starken und gleichmäßigen Basisabfluss und nur mäßig starken, jedoch sehr scharfen Hochwasserspitzen führt.

Der Goldersbach ist ein Zufluss der unteren Ammer. Das Einzugsgebiet bis zum Pegel Bebenhausen (39 km<sup>2</sup>) ist zu 100 % bewaldet und unbesiedelt. Den Untergrund bilden Sandsteine und Mergel des Keupers, bedeutende Aquifere gibt es nicht. Der Basisabfluss ist ausgesprochen schwach, und das Abflussgeschehen wird maßgeblich durch dynamische Abflusskomponenten geprägt, die vorwiegend in den periglazialen Deckschichten der Talhänge generiert werden (Einsele et al., 1986).

Die Steinlach entwässert ein mit ca. 300 Einw./km<sup>2</sup> mäßig stark besiedeltes Gebiet (Fläche bis Sonde oberhalb KA Steinlach-Wiesaz: 127 km<sup>2</sup>) im nördlichen Vorland der Schwäbischen Alb. Landwirtschaftliche Flächen nehmen 50 %, Wald etwa 40 % der Gebietsfläche ein, womit das Einzugsgebiet

einen ausgewogenen Mix verschiedener Nutzungen repräsentiert. Der verkarstete Weißjura spielt nur im südlichen Teil des Gebietes eine Rolle, während meist weniger durchlässige Ton- und Sandsteine des Keupers und des unteren und mittleren Juras den Hauptteil einnehmen. Entsprechend ist der Basisabfluss eher schwach ausgeprägt. Zwischenabfluss und sehr schnelle Abflusskomponenten führen zu einer lebhaften Dynamik mit sehr starken Spitzenabflüssen.

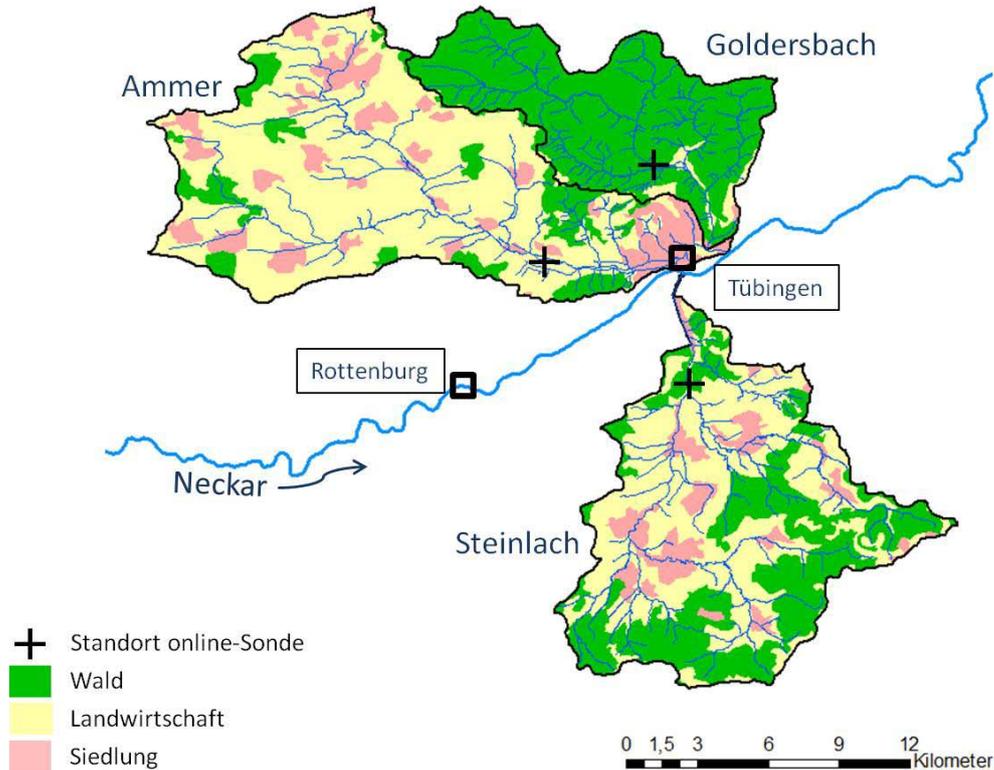


Abb. 1: Die WESS-Untersuchungsgebiete mit Landnutzung und Standorten der online-Sonden.

Alle eingesetzten Sonden messen in beliebiger zeitlicher Auflösung neben den Nitrat-Konzentrationen den Wasserstand (mittels Drucksensoren), die elektrische Leitfähigkeit, die Wassertemperatur sowie die Trübung. Die Sonde „Pegel Pfäffingen“ an der Ammer erfasst zudem die Konzentration des gelösten Sauerstoffs, den pH-Wert und das Redox-Potential. Über wiederholte Abflussmessungen wurden Wasserstand-Abfluss-Beziehungen abgeleitet, die eine durchgängige Ermittlung des Abflusses als hydrologisch bedeutender Variable, und somit auch von Stofffrachten ermöglichen. Die Sonde „Ammer/Pfäffingen“ ist seit Juni 2011 im Dauereinsatz, die Sonden „Steinlach/KA Steinlach-Wiesaz“ und „Goldersbach/Bebenhausen“ wurden erst im Februar 2012 installiert und nehmen seither Daten auf.

Ergänzt werden die durchgehenden Sonden-Messungen durch monatliche Wasser-Probennahmen im gesamten Gewässernetz der untersuchten Einzugsgebiete. Die Proben werden standardmäßig auf Haptionen, DOC (*dissolved organic carbon*) und Trübe analysiert.

## Ergebnisse

Die im Rahmen der bislang 1,5-jährigen Kampagne mit monatlichen Probennahmen ermittelten mittleren Nitrat-Konzentrationen von 32 mg/l in der Ammer, 3,5 mg/l im Goldersbach und 8,1 mg/l in der Steinlach korrelieren sehr gut mit den jeweiligen Anteilen von intensiv genutzten Ackerflächen am gesamten Einzugsgebiet. Da selbst in der Ammer, welche als einziger Vorfluter der hier betrachteten Teileinzugsgebiete geklärte Abwässer aufnehmen muss, die abwasserbürtige N-Fracht bei weniger als 1/3 der gesamten N-Fracht liegt, sind diffuse Stickstoffquellen als wesentlicher Eintragspfad in die Gewässer zu sehen.

Für die Ammer liegen bislang auch die längsten kontinuierlichen Datenreihen vor, aus welchen sich entscheidende hydrologische Eigenschaften extrahieren lassen. In Abb. 2 ist ein für dieses System charakteristisches Hochwasserereignis dargestellt. Der Abfluss erreicht, ausgehend vom Basisabfluss, extrem schnell seinen Scheitel und fällt binnen weniger Stunden auch wieder auf Basisabfluss-Niveau ab. Das Fehlen einer bedeutenden Zwischenabflusskomponente ist in allen Jahreszeiten beobachtbar. Ein zweites Charakteristikum ist der plötzliche Abfall der Nitrat-Konzentrationen mit dem Einsetzen von Abflussereignissen.

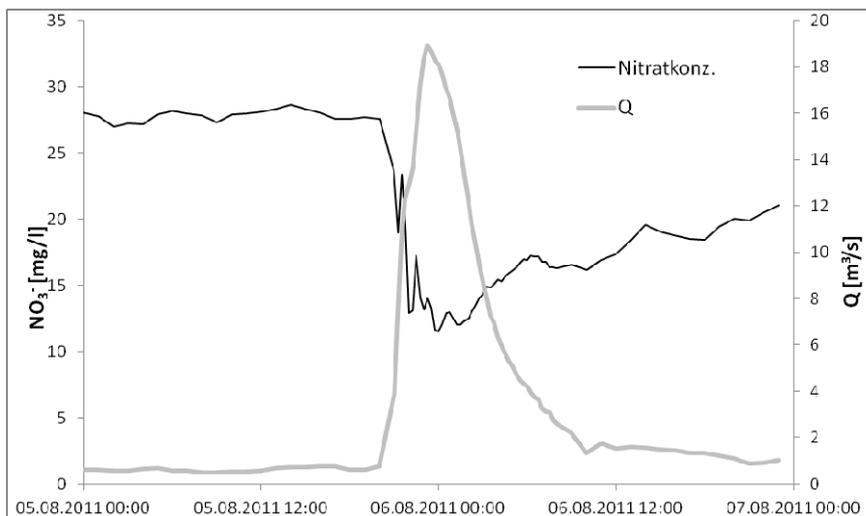


Abb. 2: Abflussereignis an der Ammer/Pfäffingen am 5./6. August 2011. Abfluss- und Nitratganglinien wurden, abhängig von Q, im 1 h- bzw. 15 min-Intervall durch eine online-Sonde aufgenommen.

Eine Analyse dieses Verhaltens zeigt, dass der Basisabfluss die maximalen Nitrat-Konzentrationen aufweist und im Hochwasserfall eine stark verdünnende Abflusskomponente aktiviert wird. Da der Eintrag von Stickstoff in die Aquifere, die schließlich den Basisabfluss liefern, gänzlich über die Böden läuft, sind letztere als bedeutende Stickstoff-Reservoirs anzusehen. Die sehr geringen Nitrat-Konzentrationen in der schnellen Abflusskomponente indizieren hingegen, dass die Böden nicht wesentlich an der Hochwasserabflussbildung beteiligt sind. In Verbindung mit Geländebeobachtungen wird vielmehr davon ausgegangen, dass zu großen Anteilen echtes Ereigniswasser von den versiegelten urbanen Flächen im Einzugsgebiet direkt in den Vorfluter gelangt. Hieraus wurde eine konzeptionelle Modellvorstellung des hydrologischen Systems entwickelt: Diese sieht einen sehr großen Speicher zur Beschreibung der Karstaquifere vor, welcher den überaus konstanten Basisabfluss liefert. Ein Bodenspeicher steuert die Grundwasserneubildung und die Zwischenspeicherung von Stickstoff, ist

aber nicht an das Gewässernetz angebunden. Eine hochdynamische „anthropogene“ Komponente wird über einen sehr „flachen“ Speicher für urbane Flächen wiedergegeben.

Nach dieser Hypothese mischen sich im Vorfluter nur 2 Komponenten. Als Test wurde über ein einfaches graphisches Verfahren in der Abflussganglinie der Basisabfluss abgetrennt und den auf diese Art separierten Abflusskomponenten konstante Nitrat-Konzentrationen zugewiesen (40 bzw. 15 mg/l). Die abflussgewichtete Mischung dieser Komponenten konnte den generellen gemessenen Konzentrationsverlauf in der Ammer plausibel wiedergeben (Abb. 3).

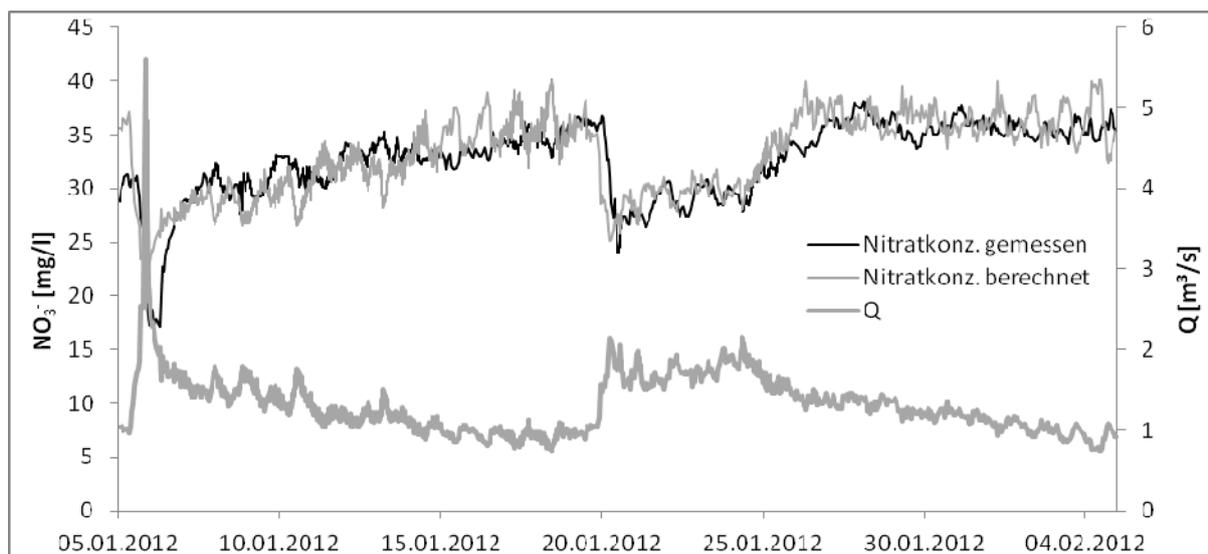


Abb. 3: Mittels einer online-Sonde gemessene Nitratkonzentrationen und Abfluss in der Ammer/Pfäffingen im Januar 2012. Zusätzlich wurden NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentrationen über eine einfache 2-Komponenten-Mischung berechnet.

Vergleichbare Datenreihen werden seit Februar 2012 ebenfalls an Steinlach und Goldersbach generiert. Bisher verfügbare Daten zeigen, dass in diesen Systemen klar positive Korrelationen zwischen Abfluss und Nitrat-Konzentrationen zu beobachten sind, was auf gänzlich andere Transportmechanismen und damit hydrologische Prozesse schließen lässt. Speziell im vollständig bewaldeten Goldersbach-Einzugsgebiet zeigen die ergänzenden monatlichen Probennahmen einen Zusammenhang zwischen Nitrat- und DOC-Konzentrationen. Im Gegensatz zum Ammergebiet ist hier die Vernetzung der Böden mit dem Gewässernetz mutmaßlich eine entscheidende Größe sowohl für das Abflussgeschehen als auch für den Stoffaustausch.

### Schlussfolgerung

Die zeitlich hoch aufgelösten Datenreihen, welche durch die online-Sondentechnik geliefert werden, ermöglichen ein verbessertes Verständnis der anthropogen überprägten Hydrologie im Ammer-Einzugsgebiet. Desweiteren deutet sich an, dass die Aquifere als die bedeutendsten Speicher einen Basisabfluss sehr konstanter Qualität liefern, was die vielfach kontrovers diskutierte Hypothese von Einzugsgebieten als chemostatische Systeme aufgreift. Parallel werden zwei Einzugsgebiete in unmittelbarer Nachbarschaft analog untersucht, welche in vieler Hinsicht kontrastierende Eigenschaften aufweisen. Eine fortgesetzte Sammlung und sorgfältige Analyse von Daten wird wichtige Hinweise

geben, welche hydrologischen Systemfunktionen den Stoffaustrag v.a. hinsichtlich seiner Dynamik steuern.

Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse sollen zudem mittelfristig in gekoppelte Prozessmodelle integriert werden, die derzeit von WESS in Zusammenarbeit mit Projektpartnern entwickelt werden.

## Danksagung

WESS wird gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (AZ Zu 33-721.3-2) und das Helmholtzzentrum für Umweltforschung, UFZ, Leipzig.

## Literatur

- Alvarez-Cobelas, M., D. G. Angeler, S. Sánchez-Carillo (2008): Export of nitrogen from catchments: A world-wide analysis. *Environmental Pollution* 156, 261-269.
- BMU (2008): Nitratbericht 2008. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- Bowes, M. J., J. T. Smith, C. Neal (2009): The value of high-resolution nutrient monitoring: A case study of the River Frome, Dorset, UK. *Journal of Hydrology* 378, 82-96.
- EEA (1999): Nutrients in European ecosystems. Environmental assessment report No 4, European Environment Agency, Copenhagen.
- Einsele, G., G. Angster, M. Elgner (1986): Niederschlag-Bodenwasser-Abflussbeziehung bei Hochwasserereignissen im Keuper-Lias-Bergland des Schönbuchs. *DFG Forschungsbericht* 1986: Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch., S. 209-234.
- Godsey, S. E., J. W. Kirchner, D. W. Clow, (2009): Concentration–discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes* 23, 1844-1864.
- Neal, C. B. Reynolds, P. Rowland, D. Norris, J.W. Kirchner, M. Neal, D. Sleep, A. Lawlor, C. Woods, S. Thacker, H. Guyatt, C. Vincent, K. Hockenhull, H. Wickham, S. Harman, L. Armstrong (2012): High-frequency water quality time series in precipitation and streamflow: From fragmentary signals to scientific challenge. *Science of the total Environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.072.

# **Dynamische Modellierung der Sorption von Substanzen in einem hydrologischen Einzugsgebietsmodell anhand des Beispiels Phosphor**

Matthias Gassmann und Oliver Olsson

Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie, Leuphana Universität Lüneburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

An Bodenpartikel sorbierte Substanzen, z.B. Phosphor, stellen einen Großteil des Gesamtaustrages dieser Stoffe aus Einzugsgebieten dar. Das Sorptionspotential eines Stoffes wird oft durch die Sorptionskonstante beschrieben. Jedoch ist diese Konstante im Allgemeinen nicht konstant, sondern hängt von der Konzentration des Stoffes ab. Diese Abhängigkeit wird durch Isothermen ausgedrückt, die die Sorptionskonstante als Steigung in einem bestimmten Punkt haben. Dieses Wissen wurde in der Vergangenheit in populären Einzugsgebietsmodellen nicht für die Sorptionsberechnung von P genutzt.

In dieser Studie wurde das hydrologische Modell ZIN-Sed 2D um ein Modul zur Abbildung des Phosphoraustrages aus der Fläche und dessen Verhalten im Einzugsgebiet erweitert. Sorption wurde dabei mit einer Langmuir Isotherme berechnet. Das erweiterte Modell wurde für das Enxoe Einzugsgebiet in Portugal anhand von Messdaten und Literaturwerten aufgesetzt. Durch Kalibrierung der Parameterwerte konnte erreicht werden, dass die modellierte Verteilung zwischen gelöstem und sorbiertem Phosphor sich der gemessenen stark annäherte. Eine Austragsberechnung für die Jahre 2001-2010 brachte einen mittleren P-Austrag von 1.3 kg/ha/a.

Diese Studie verbindet überwiegend im Labor gewonnenes chemisches Prozessverständnis mit der Einzugsgebietshydrologie und bewegt sich daher im Grenzbereich zwischen Chemie und Hydrologie.

## **Einleitung**

Die Wasserqualität von Vorflutern wie Seen, Stauseen und Lagunen hängt stark von der Wasserqualität ihrer Zuflüsse ab (z.B. Velasco et al., 2006). Der Eintrag von Phosphor in Gewässer aus diffusen und Punktquellen ist besonders kritisch zu sehen, da Phosphor (P) als Minimumfaktor für die Primärproduktion eine wichtige Größe für die Eutrophierung eines Gewässers darstellt. Um den Beitrag eines Einzugsgebietes zur Eutrophierung eines Vorfluters abzuschätzen, bietet sich in erster Linie an, Zeitreihen von Wasserqualitätsparametern auszuwerten. Jedoch sind solche Zeitreihen nicht für alle Gewässer in ausreichender Länge und Qualität verfügbar. In solch einem Falle können Abschätzmethoden (Modelle) zur Quantifizierung der Substanzinträge beitragen.

Besonders prozessbasierte Modelle wurden in den letzten Jahren für diese Zwecke benutzt (z.B. SWAT, Chahinian et al., 2011 oder AnnAGNPS, Baginska et al., 2003). Die Repräsentation der Sorption von P ist ein zentraler Punkt bei der prozessbasierten Modellierung, da P stark an Bodenpartikel adsorbiert. Smil (2000) z.B. zeigte auf, dass ca. 70 % des Gesamtphosphoraustrages aus Einzugsgebieten in adsorbierter Form geschieht. Ein Blick auf die Gleichungen zur Berechnung der Sorption in populären Modellen zeigt, dass fast alle Einzugsgebietsmodelle einen linearen Sorptionsansatz benutzen. Viele im Labor gewonnene Studien fanden jedoch heraus, dass die Sorption von Phosphor einer nicht-linearen Sorptionsisotherme (Beziehung zwischen gelöstem und sorbiertem P) folgt. Vor Allem

eine Langmuir-Isotherme ließ sich oft am besten an gemessene Werte anpassen (z.B. House et al., 1995; Zhou and Li, 2001). Im Gegensatz zur linearen Isotherme besitzt die Langmuir-Isotherme eine maximale Sorptionskapazität, d.h. bei hohen Konzentrationen bleibt mehr P in Lösung.

Diese Studie versucht den Phosphorausstrages eines Einzugsgebiets mit begrenzter Datenverfügbarkeit anhand des Modells ZIN-Sed 2D nachzubilden. Dieser Modellansatz benutzt im Gegensatz zu etablierten Modellen eine Langmuir Isotherme zur Beschreibung der Sorption. Mit dem kalibrierten Modell wird anschließend der langjährige Eintrag von Phosphor in ein flussabwärts gelegenes Reservoir abgeschätzt.

## Das Einzugsgebiet

Das Enxoe Einzugsgebiet liegt im Südosten Portugals. Es hat eine Fläche von 61 km<sup>2</sup> und speist das Enxoe Reservoir, welches für die Trinkwasserversorgung genutzt wird (Abbildung 1). Die Gegend liegt unter einem mediterranen Klima mit heißen und trockenen Sommern sowie milden und feuchten Wintern. Der mittlere jährliche Niederschlag war zwischen 2001 und 2011 ca. 480 mm und die mittlere Lufttemperatur im gleichen Zeitraum 16.3 °C. Die Landnutzung im Einzugsgebiet wird dominiert von Landwirtschaft (72 %) und Wald (27%). Lediglich 1 % der Fläche entfallen auf urbane Gebiete. 27 % der Böden sind (schluffige und sandige) Tonböden und 73 % ist toniger Lehm.

In den vergangenen Jahren litt das Enxoe Reservoir unter einer starken Blaualgenblüte. (Coelho et al., 2008) stellten die Hypothese auf, dass der Eintrag von Phosphor aus dem landwirtschaftlich genutzten Enxoe Einzugsgebiet die Primärproduktion anregt und so entscheidend zur Eutrophierung beiträgt. In dieser Studie wird ein 37 km<sup>2</sup> großes Teileinzugsgebiet untersucht (Abbildung 1). Von 2009-2011 wurden am Teileinzugsgebietsauslass acht Ereignisse auf Suspensionsfrachtkonzentration (SSC), gelösten Phosphor (DP) und sorbierten Phosphor (PP) beprobt. Diese Proben wurden im Folgenden benutzt um das Modell zu kalibrieren. Alle hydrologischen und meteorologischen Daten die in dieser Studie für die Modellierung benutzt wurden, wurden der freien Datenbank „Sistema Nacional de Informação“ (snirh.pt) entnommen.

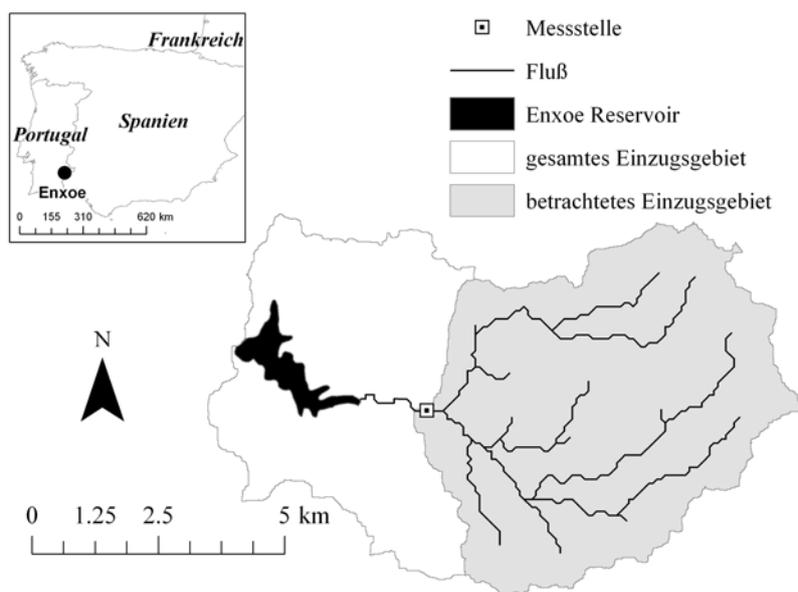


Abb. 1: Das Enxoe Einzugsgebiet.

## Methode

Das Modell ZIN-Sed 2D ist eine Weiterentwicklung von ZIN (Lange et al., 1999) und ZIN-Sed (Gassmann et al., in press). Es ist ein flächenverteiltes deterministisches Modell, das mit kleinen Zeitschritten (1h und weniger) arbeitet und somit geeignet ist auch Konzentrationsspitzen darzustellen. Die Modellierung des Phosphoraustrages geschieht aufbauend auf einer hydrologischen und einer Erosionsmodellierung, jedoch werden alle Prozesse innerhalb eines Zeitschritts ausgeführt.

Die Kalibrierung des Modells für das Enxoe Einzugsgebiet erfolgte in drei Schritten: (i) Kalibrierung des hydrologischen Modells, (ii) Kalibrierung des Erosionsmodells und (iii) Kalibrierung des Phosphormodells. Da keine Abflussmessungen für das Einzugsgebiet vorlagen, wurde eine indirekt Methode zur Kalibrierung des hydrologischen Modells angewandt. Abflussdaten aus umliegenden Einzugsgebieten wurden dazu benutzt eine synthetische Abflussdauerkurve (ADK) zu erstellen (Yu and Yang, 2000). Dafür wurden die ADK der einzelnen Einzugsgebiete erstellt und an verschiedenen Punkten einer Kurve mit der Einzugsgebietsfläche korreliert. Die entstehenden Regressionsgeraden wurden dann benutzt um eine ADK für das gesuchte Einzugsgebiet (anhand der Fläche) zu erstellen.

Die Modellierung der Sorption in ZIN-Sed 2D wird dynamisch anhand von Isothermen, d.h. der Beziehung zwischen gelöstem P und sorbiertem P, berechnet. Der Verteilungskoeffizient (oder Sorptionskonstante)  $K_d$  genannte Faktor ist dabei die Steigung in einem bestimmten Punkt der Isotherme. Da Isothermen im Allgemeinen nicht-linear sind, ist auch  $K_d$  normalerweise nicht konstant. In ZIN-Sed 2D wird eine Langmuir-Isotherme mit der Langmuir Konstante  $K_L$  (l/mg) und der maximalen Sedimentkonzentration  $c_{max}$  (mg/g) benutzt:

$$c_{sorbed} = \frac{K_L \cdot c_{max} \cdot c_{solved}}{1 + K_L \cdot c_{solved}} \quad (1)$$

Zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort im Modell kann davon ausgegangen werden, dass die gelöste und sorbierte P-Konzentration durch Misch-, Erosions- und Depositionsprozesse im Allgemeinen nicht im Gleichgewicht sind. Die sorbierte Gleichgewichtskonzentration  $c_{e,sorbed}$  kann dann anhand der Gesamtkonzentration  $c_{total}$ , der Suspensionsfracht SSC und der gelösten Gleichgewichtskonzentration  $c_{e,solved}$  analytisch bestimmt werden:

$$c_{e,sorbed} = \frac{c_{total} - c_{e,solved}}{SSC} \quad (2)$$

wobei

$$c_{e,solved} = \mu + \sqrt{\mu^2 + \frac{c_{total}}{K_L}} \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{K_L \cdot c_{total} - 1 - K_L \cdot c_{max} \cdot SSC}{2K_L} \quad (3)$$

Um die zeitliche Verzögerung zu berechnen, die es braucht bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat, wird in ZIN-Sed 2D eine Pseudo-Ratengleichung erster Ordnung (Lagergren, 1898) benutzt:

$$\frac{dc_{sorbed}}{dt} = r \cdot (c_{e,sorbed} - c_{e,solved}) \quad (4)$$

$r$  ist die Ratenkonstante (1/min) und  $dt$  der Zeitschritt. Da Adsorptions- und Desorptionsgeschwindigkeit oft verschieden sind, wird  $r$  entsprechend Adsorption oder Desorption unterschiedlich gewählt.

Die Anreicherung von sorbiertem P in erodiertem Sediment aufgrund der vorzugsweisen Erosion feiner Partikel und deren höherer P-Aufnahmefähigkeit wird mit einem Ansatz berechnet der für das Modell CREAMS (Menzel, 1980) entwickelt wurde. Der Anreicherungsfaktor PER ist abhängig von der Erosion SSY (kg/ha):

$$PER = 7.39 \cdot SSY^{-0.2} \quad (5)$$

Die für die Modellierung benötigten Parameter wurden aus der Literatur gewonnen oder innerhalb vertretbarer Grenzen kalibriert. Für die Langmuir Isotherme wurden durch Kalibrierung Werte von  $K_L=0.6$  (l/mg) und  $c_{max}=4.0$  (mg/g) ermittelt. Die Adsorptionsrate wurden kalibriert zu 4.0 (1/d) und die Desorptionsrate zu 3.0 (1/d).

## Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die synthetische für das Einzugsgebiet gewonnen ADK sowie die mit ZIN-Sed 2D modellierte ADK. Die Nash-Sutcliffe Modelleffizienz  $N_{eff}$  (Nash and Sutcliffe, 1970) für die Modellierung der ADK lag bei 0.98 und das Bestimmtheitsmaß bei 0.99 (Steigung der Geraden: 1.05).

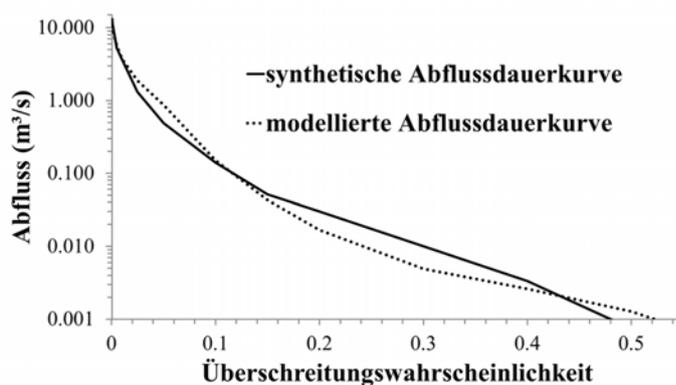


Abb. 2: Synthetische und mit ZIN-Sed 2D modellierte Abflussdauerlinie im Enxoe Einzugsgebiet.

Die Ereignismittelwerte der 8 gemessenen Ereignisse sowie die mit ZIN-Sed 2D modellierten Mittelwerte für DP, PP sowie Gesamtphosphor (TP) sind in Abbildung 3 dargestellt, die zugehörigen Gütemaße der Modellierung in Tabelle 1. Die modellierten mittleren Anteile von DP am TP aller Events stimmten mit den gemessenen überein und betragen 29 %.

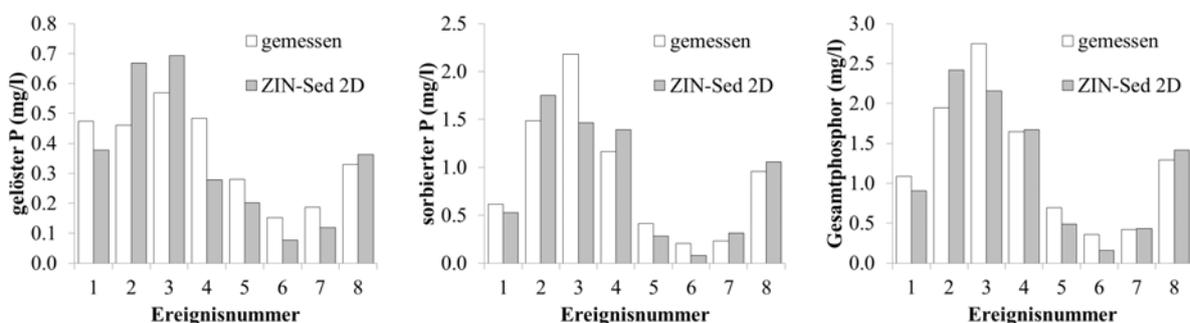


Abb. 3: Gemessene und modellierte mittlere Ereigniskonzentrationen von gelöstem und sorbiertem Phosphor für die Modellläufe mit einer Langmuir und einer linearen Isotherme.

Tab. 1: Gütemaße der Modellierung. SSC – Suspensionsfracht, DP – gelöster Phosphor, PP – sorbierter Phosphor, TP – Gesamtphosphor.

	SSC	DP	PP	TP
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> :	0.43	0.70	0.80	0.87
Steigung der Regressionsgeraden:	0.68	1.27	0.83	0.95
Wurzel aus mittlerem quadratischen Fehler :	0.18 g/l	0.13 mg/l	0.29 mg/l	0.30 mg/l
Nash-Sutcliffe Modelleffizienz:	0.28	0.21	0.79	0.85

Anhand des kalibrierten Modells wurde für das Enxoe Reservoir eine jährliche Eintragsberechnung für die Jahre 2001-2011 vorgenommen um die aus dem Einzugsgebiet kommende Belastung für das Reservoir abzuschätzen (Abbildung 4). Demnach variierte der Eintrag von Gesamtphosphor zwischen 0.19 und 2.98 kg/ha/a und der langjährige Mittelwert des Gesamtphosphoreintrags wurde zu 1.3 kg/ha/a bestimmt. Die hydrologischen Jahre 2001/02, 2009/10 und 2010/11 haben dabei besonders hohe Werte zwischen 2 und 3 kg/ha/a. Die höchsten mittleren jährlichen Konzentrationen von TP sind in den Jahren 2004/2005 und 2006/07 zu finden (Abbildung 4).

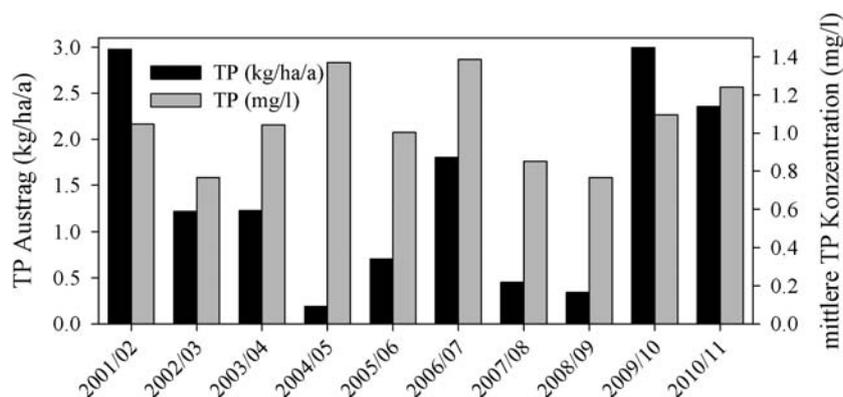


Abb. 4: Mit Zin-Sed 2D abgeschätzte jährliche Austräge und mittlere Konzentrationen von Gesamtphosphor (TP) aus dem Teileinzugsgebiet in das Enxoe Reservoir.

## Diskussion

Die Ergebnisse der Modellierung mit ZIN-Sed 2D haben gezeigt, dass die Verteilung zwischen gelöstem und sorbierendem P sowie die Gesamtkonzentration anhand einer Langmuir Isotherme erfolgreich abgebildet werden kann (Abbildung 3). Dies konnte durch die insgesamt hohen Gütemaße und kleinen absoluten Abweichungen (Tabelle 1) belegt werden. Jedoch muss erwähnt werden, dass die Güte von SSC und DP hinter PP und TP zurück bleiben. Bei insgesamt kleinen mittleren quadratischen Abweichungen können jedoch auch diese Berechnungen positiv bewertet werden.

Die erfolgreiche Kalibrierung wurde weiter benutzt um den P-Eintrag in das Enxoe-Reservoir über die letzten 10 Jahre abzuschätzen. Die hohe Variabilität der jährlichen Einträge korreliert dabei stark mit der Variabilität der Abflüsse ( $R^2=0.95$ ) und Sedimenteinträge ( $R^2=0.98$ ). Dies ist durch den hohen mittleren Anteil (ca. 73 %) an partikulär gebundenem P zu erklären. Verglichen mit den abgeschätzten mittleren Werten für Phosphoreintrag im mediterranen Raum in der Literatur (Grizzetti et al., 2012), ist die mittlere berechnete Menge dieser Studie in etwa doppelt so hoch. Dem gegenüber stehen jedoch die mittleren jährlichen Konzentrationen, die ihre Maxima nicht in den Jahren des höchsten Eintrags erreichen. Deshalb sollte eine Beurteilung des Beitrags des Enxoe Einzugsgebietes zur Eutrophierung

anhand einer Betrachtung des Verhaltens von P (z.B. Sedimentation oder Rücklösung aus dem Sediment) im Reservoir geschehen.

Die Tatsache der nicht-linearität der Sorption von Phosphor ist lange bekannt. Umso erstaunlicher, dass diese Ansätze bisher nicht in Einzugsgebietsmodelle integriert wurden. Dies mag zum einen daran liegen, dass die mathematische Formulierung nicht-linearer Ansätze einen Zuwachs an Parametern mit sich bringt. Zum anderen gibt es Konzentrationsbereiche der nicht-linearen Isothermen, die sich nur wenig vom linearen Ansatz unterscheiden. Erst wenn diese Konzentrationsbereiche verlassen werden, unterscheiden sich auch die Ergebnisse beider Berechnungen signifikant.

## Schlussfolgerung

In dieser Studie wurde ein im kleinen Maßstab in der Hydrochemie lange bekannter Prozess, die nicht-lineare Sorption von P an Bodenpartikel, in ein hydrologisches Einzugsgebietsmodell integriert. Es wurde gezeigt, dass die Isotherme auch auf Einzugsgebietsebene in der Lage ist die Verteilung zwischen gelöstem und sorbiertem Phosphor darzustellen. Dies lässt den Schluss zu, dass Umweltmodelle die Repräsentation der Sorption an den aktuellen Stand der Forschung anpassen und damit Ergebnisse anderer Disziplinen mehr in eigene Forschung einfließen lassen sollten.

## Literatur

- Baginska B., Milne-Home W. und Cornish P. S. (2003): Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST. *Environmental Modelling & Software* 18, 801–8.
- Chahinian N., Tournoud M.-G., Perrin J.-L. und Picot B. (2011): Flow and nutrient transport in intermittent rivers: A modelling case-study on the Vene River using SWAT 2005. *Hydrological Sciences Journal* 56, 268–87.
- Coelho H., Silva A., Chambel Leitão P. und Obermann M. (2008): On the origin of cyanobacteria blooms in the Enxoé reservoir. *Proceedings of the 13th IWRA World Water Congress*.
- Gassmann M., Lange J. und Schuetz T. (in press): Erosion modelling designed for water quality simulation. *Ecohydrology*.
- Grizzetti B., Bouraoui F. und Aloe A. (2012): Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas. *Glob Change Biol* 18, 769–82.
- House W. A., Denison F. H. und Armitage P. D. (1995): Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment. *Water Research* 29, 767–79.
- Lagergren S. (1898): Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. *Handlingar, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens* 24 (4), 1–39.
- Lange J., Leibundgut C., Greenbaum N. und Schick A. P. (1999): A noncalibrated rainfall-runoff model for large, arid catchments. *Water Resources Research* 35, 2161–72.
- Menzel R. G. (1980): CREAMS a field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, 486–92.
- Nash J. und Sutcliffe J. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–90.
- Smil V. (2000): Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment* 25, 53–88.
- Velasco J., Lloret J., Millan A., Marin A., Barahona J. und Abellan P. et al. (2006): Nutrient and particulate inputs into the Mar Menor lagoon (Se Spain) from an intensive agricultural watershed. *Water, Air, and Soil Pollution* 176, 37–56.
- Yu P.-S. und Yang T.-C. (2000): Using synthetic flow duration curves for rainfall-runoff model calibration at ungauged sites. *Hydrological Processes* 14, 117–33.
- Zhou M. und Li Y. (2001): Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1404–12.

# **Transport und Umsetzung von reaktivem Stickstoff auf der Hangskala: Ein prozessorientierter Modellansatz**

Philipp Kraft<sup>1</sup>, Edwin Haas<sup>2</sup>, Steffen Klatt<sup>2</sup>, Klaus Butterbach-Bahl<sup>2</sup>, Hans-Georg Frede<sup>1</sup>  
und Lutz Breuer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Landschaftsökologie und Ressourcen Management, Justus-Liebig-Universität Gießen, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Meteorologie und Klimaforschung, KIT, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Stickstoffeinträge am Oberhang führen zu erhöhten Stickstoffumsatzraten am Unterhang: Obwohl diese Beobachtung trivial erscheint, sind prozessorientierte Modelle, die sowohl Transport als auch Umsatz von Stickstoff entlang eines Hanges berechnen können, selten. Die Simulation von wassergetragenen Nährstoffverlagerungen erfordert die Kopplung eines hydrologischen Modells mit einem biogeochemischen Modell. Hierfür müssen nicht nur die Grenzen zwischen verschiedenen Computer-codes durch Datenaustauschstrategien überwunden werden, sondern auch disziplinäre Grenzen. Im Rahmen dieser Studie haben wir ein prozessorientiertes Boden-Pflanze-Ökosystemmodell (LandscapeDNDC) mit einem zweidimensionalen Wasser- und Stofftransportmodell gekoppelt. Das Transportmodell wurde mit Hilfe des Catchment Modelling Framework (CMF) erstellt. Beide Modelle tauschen Zustandsvariablen, Stoffflüsse und Parameter in einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung aus. Die Datenkommunikation wurde über die Programmiersprache Python realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht einen direkten Austausch von Ökosystemzuständen (Bodenfeuchte, Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz, Transpiration, etc.) und damit eine realitätsnahe Simulation des lateralen Transports von Nährstoffen, so dass Nährstoffumsätze auf Landschafts- und Einzugsgebietsebene dargestellt werden können.

In einem virtuellen Experiment werden die Folgen von landwirtschaftlicher Stickstoff-Düngung auf Stickstoffflüsse entlang eines hypothetischen Hangtransektes mit sequentieller Landnutzung von Acker über Wiese bis hin zu Brachflächen im Auenbereich modelliert. Das gekoppelte biogeochemische-hydrologische Modellsystem zeigt dabei sehr deutlich den Zusammenhang zwischen dem Eintrag von reaktivem Stickstoff durch Düngung am Oberhang mit erhöhter Emission von N<sub>2</sub>O im extensiv genutzten Auenbereich auf. Die Ergebnisse des virtuellen Experimentes zeigen, dass neben der erwarteten räumlichen Trennung von Ursache und Wirkung durch den Transport von Nitrat und anderen Stickstoffverbindungen durch das Wasser auch eine zeitliche Verzögerung der Wirkung in der Größenordnung von Monaten bis Jahren eintreten kann.

## **Einleitung**

Der Nährstoffhaushalt einer Landschaft trägt fundamental zur Bewertung Nachhaltigkeit von Landnutzungen bei. Hydrologische oder biogeochemische Transport- und Umwandlungsprozesse sind in der Literatur gut dargestellt. Sowohl empirisch konzeptionelle als auch prozessorientierte Modellansätze wurden in der Vergangenheit entwickelt und angewendet. Allerdings sind die einzelnen Landschaftskompartimente durch laterale Flüsse eng miteinander verwoben (Cellier et al., 2011; Durand et

al., 2011). Diese intrinsischen Interaktionen führen zu „hot spots“ (im Raum) und „hot moments“ (in der Zeit), die den Wasser, Kohlenstoff und Stickstoffhaushalt einer Landschaft substantiell beeinflussen können (McClain et al., 2003; Groffman et al., 2009).

Können derart komplexe Interaktionen zwischen Landschaftswasser- und -stoffhaushalt mit derzeit zur Verfügung stehenden Modellansätzen simuliert werden? Die vorhandenen Modellansätze lassen sich in drei verschiedene Klassen einteilen: (1) Modelle ohne explizit raumverorteten Wassertransport, (2) Ansätze mit expliziten Wassertransport, aber ohne lateralem Stofftransport und (3) vollständig räumlich explizite Modelle. Die erste Klasse enthält alle konzeptionellen und semi-verteilten hydrologische Modellansätze, die mit biogeochemischen Routinen erweitert wurden. Die biogeochemischen Ansätze können einfache empirische Transformationsfunktionen wie in MONERIS (Behrendt et al., 2000) oder stark vereinfachte konzeptionelle Ansätze wie in INCA (Whitehead et al., 1998), HBV-N (Arheimer and Brandt, 1998) oder LASCAM (Sivapalan et al., 1996) sein. SWAT (Arnold et al., 1998) verwendet einen komplexeren Ansatz für den Stickstoffkreislauf, hat allerdings in einem Multi-Modell-Ensemble generell eine schlechtere Vorhersage des Stickstoffs getroffen, als die einfacheren zuvor genannten Modelle (Exbrayat et al., 2010, 2011). Li et al. (2004) und Pohlert et al. (2007) haben den Stickstoffhaushalt der bekannten biogeochemischen Modelle DAYCENT bzw. Teile von DNDC in SWAT integriert und so eine Verbesserung des Modellansatzes erreicht. Die zweite Klasse enthält einfache Modellkopplungen, in denen der Bodenwassergehalt und der Grundwasserstand in der Landschaft mit einem vollverteiltem hydrologischen Modell gerechnet und diese Werte anschließend als Modelltreiber in die plot-skaligen biogeochemischen Modelle übernommen werden. Beispiele für diesen Ansatz sind AHM/CENTURY (Meixner and Bales, 2003) und eine Kombination von MIKE-SHE mit DNDC (Cui et al., 2005). Tatsächlich vollverteilte Berechnungen von Wasser- und Stofftransport (3) werden bisher hauptsächlich von RHESSys (Tague and Band, 2004) und TNT2 (Beaujouan et al., 2001) geleistet. Beide Modelle kombinieren fest im Modellcode verankerte biogeochemische Modelle mittlerer Komplexität mit vollverteilten hydrologischen Modellen.

Wie in jedem Modell sind in den hydrologischen Modellen von RHESSys und TNT2 eine Vielzahl von Hypothesen und Annahmen verankert, die nicht explizit und getrennt getestet werden können (Clark et al., 2011). In beiden Modellen wird angenommen, dass das gesamte Wasser immer mit dem topographischen Gradienten oberflächennah über ein dichtes Grundgestein fließt. Clark et al. (2011) fordern deshalb die Entwicklung modularer Modell-Systeme für die Hydrologie, um verschiedene Hypothesen zur Abflussbildung testen zu können.

Die Möglichkeit der gleichzeitige Betrachtung von lateralem Transport und dem Umsatz von Nährstoffen wird begrenzt durch die Komplexität der Vorhersage der Fließpfade entlang der Hangskala (Sivapalan, 2003). Zudem stellen die komplexen biogeochemischen Reaktionen auf der Standortskala mit unbekanntem Quellen und Senken unter Flur eine weitere Erschwernis dar. Gefordert sind daher flexible Modellansätze, die zum einen die hohe Komplexität von Wasser- und Stoffhaushalt berücksichtigen und zudem so variabel gehalten sind, dass unterschiedliche hydrologische Abflussentstehungsprozesse simuliert werden können. In dieser Studie wird ein derartiges integriertes Modellkonzept vorgestellt, das das modulare hydrologische Modellsystem Catchment Modelling Framework CMF (Kraft et al., 2011) mit dem plot-skaligen komplexen biogeochemischen Modell Landscape-DNDC (Haas et al., 2011) koppelt. Die Modelle verwenden die Programmiersprache Python als Basis, um Stoffflüsse, Zustände und Parameter in einer hohen Frequenz während der Modelllaufzeit auszutauschen.

## Methoden

Das Catchment Modelling Framework CMF (Kraft, 2011; Kraft et al., 2010, 2011) ist eine freie Bibliothek für die Programmiersprache Python zum Erstellen einer Vielzahl verschiedener hydrologischer Modelltypen. Es stellt Bausteine wie Wasserspeicher, Randbedingungen und Fließgleichungen zur Verfügung, basierend auf der finiten Volumen-Methode (Qu and Duffy, 2007). Durch die unterschiedliche Verknüpfung der Bausteine zu einem Wassertransport-Netzwerk können verschiedene Modelltypen realisiert werden und einzelne Annahmen zur Abflussbildung überprüft werden. Das Landscape-DNDC Modell (Haas et al., 2011) ist eine modularisierte und erweiterte Form der DNDC-Modells (Li et al., 1992). Das Modell stellt den C- und N-Haushalt auf der Plotskala dar, mit einem besonderem Augenmerk auf die Emission von Spurengasen. Es besteht aus Modulen zum Pflanzenwachstum, zur Bodenchemie und zum vertikalen Wasser- und Stofftransport. Es berücksichtigt eine große Anzahl an mikrobiologisch gesteuerten Prozessen, wie Nitrifikation, Denitrifikation und Methanogenese. Zudem berechnet es die Energiebilanz des Kronenraums und des Bodens. In dieser Studie wird das Wasser- und Stofftransportmodell von LandscapeDNDC nicht verwendet, stattdessen modelliert CMF den Transport. Beide Modelle sind mit einer Programmierschnittstelle für Python ausgestattet, über die auf alle Zustände und Parameter der Modelle sowohl lesend als auch schreibend zugegriffen werden kann. Außerdem können die Modelle über die Schnittstelle inkrementell für einen Zeitschritt ausgeführt werden. Dadurch können die Modelle einerseits unabhängig voneinander weiter entwickelt werden, und andererseits in hoher zeitlicher Auflösung Zustände, Stoffflüsse und Parameter miteinander synchronisieren.

Um die Wirkung eines solchen gekoppelten Ansatzes zu demonstrieren, werden die Umsetzung und der Transport von Stickstoffverbindungen in einem hypothetischen Hang simuliert. Dieser hypothetische Hang hat eine Länge von 50 m, der Bodentyp ist lehmiger Sand mit einem gut drainierendem Makroporen-System ( $K_{sat} > 20$  m/Tag). Die untere Hangzone wird als extensive, ungedüngte Mähwiese genutzt, der obere Teil wird in den ersten 10 Jahren der Modelllaufzeit zum Maisanbau genutzt und mit 233 kg N/ha/a gedüngt, teils mit Wirtschaftsdünger und teils mit Mineraldünger. Für die folgenden 10 Jahre der Modelllaufzeit wird der obere Hang als Brache offen gelassen. Die Klimadaten wurden mit Hilfe eines Wettergenerators erstellt. Einstrahlung und Temperaturverlauf entsprechen dem deutschen Voralpenland und es fallen durchschnittlich 926 mm Niederschlag pro Jahr.

## Ergebnisse

Als Beispiel für die vielen Daten, die bereits an einem einzelnen Hang berechnet werden, wird im Folgenden nur die Emission von Lachgas betrachtet, obwohl die Emissionen in diesem Modelllauf ausgesprochen niedrig sind. Um den Einfluss der stochastischen Klimadaten von Trendeffekten durch die Landnutzung zu trennen, wird die Modelllaufzeit von 20 Jahren in 5 Jahresabschnitte unterteilt: die Initialphase 1994-98, die spätere Anbauphase 1999-2003, die Überhangsphase nach dem Landnutzungswechsel, 2004-2008, und die Abklingphase 2009-2013.

Bei der Analyse der Daten lassen sich drei verschiedenen Zonen im Hang ausmachen, die sehr ähnlich reagieren: den Bereich direkt am Auslass des Hangtransekts, der ungedüngte Grünlandstreifen am Hangfuß und der in der ersten Hälfte des Modelllaufs zum intensiven Maisanbau genutzte Acker.

Abb.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der modellierten N<sub>2</sub>O-Emission aus den drei Zonen in den jeweiligen Phasen. Dabei ist zu sehen, dass in den ersten beiden Phasen des Modelllaufs nahezu keine N<sub>2</sub>O-Emission im unteren Hangbereich, also der Bachzone und dem Grünland, entstehen.

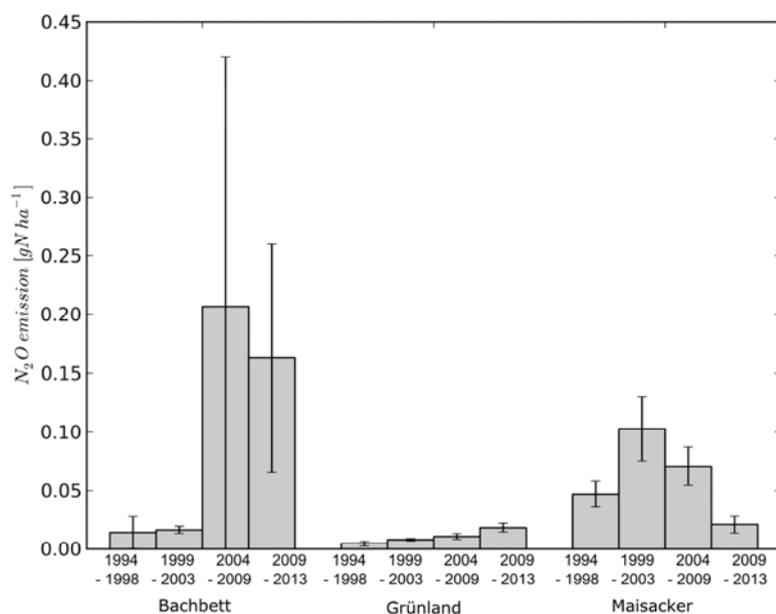


Abb. 1: Verteilung der N<sub>2</sub>O Emission aus den drei Hangzonen und den drei Phasen der Modellierung. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Emission der einzelnen Jahre einer Phase.

Im gedüngten Oberhang dagegen steigt die Emission zusammen mit dem Wert des im Boden gebundenen Stickstoff während der Initialphase an. Während der zweiten Phase nimmt die Mineralisierung aus dem Humus zu, und damit auch die Emission von Lachgas. Die Varianz zwischen den modellierten Jahren ist relativ gering. Erst nach dem Landnutzungswechsel im Jahr 2004 erreicht gelöster Stickstoff als Nitrat und Ammonium den Bereich des Baches, die Folge sind stark erhöhte Lachgas-Emissionen in diesem Bereich, allerdings mit sehr starken jährlichen Schwankungen. Trotz des Ausbleibens der Düngung, sind die Emissionen aus dem Oberhang höher als in der Initialphase. Die Mineralisierung von Stickstoff ist sehr hoch, während andererseits die Aufnahme durch Vegetation ausbleibt. In der vierten Phase sinkt die Mineralisierung und damit der Nachschub für die Denitrifikation im Unterhang ab, generell bleibt die Emission von Lachgas aus dem Unterhang im Vergleich zu den anderen Orten und Zeiten hoch.

## Diskussion

Das wichtigste Ergebnis dieses Experiments ist die deutliche zeitliche Verzögerung zwischen Ursache (der Düngung im Oberhang) und Wirkung (der Emission im Unterhang). Lokal beginnen die Emissionen direkt mit Modelstart und erreichen nach wenigen Jahren einen relativ stabilen Zustand. Die indirekten Emissionen am Bach setzen allerdings erst 10 Jahre nach dem Startzeitpunkt ein, und schwanken, je nach spezifischen klimatischen Bedingungen erheblich zwischen einzelnen Jahren. Ob diese erhöhten Emissionen ausschließlich durch den Landnutzungswechsel herbeigeführt werden, oder die Kombination aus Transport- und Umwandlung zu solchen Verzögerungen führt, kann durch diesen einzelnen ad-hoc Modelllauf nicht beantwortet werden. Andere, hier nicht gezeigte virtuelle Hänge mit anderer Topographie und Bodeneigenschaften zeigen allerdings ähnliche Verzögerungs-Effekte.

Eine systematische Sensitivitätsanalyse dieses Hangmodells steht noch aus, um die tatsächlichen Einflussfaktoren auf die lange Verzögerung zwischen Ursache und Wirkung aufzuklären, und wird Teil einer späteren Studie sein.

Die wichtigste Frage bleibt jedoch, inwieweit die simulierten Ergebnisse sich in der Art überhaupt in der Realität wiederfinden lassen – oder ob es sich hierbei um reine Modellartefakte handelt. Die meisten experimentellen Prozessstudien wurden absichtlich so geplant, das laterale Flüsse vernachlässigt werden können, um die Randbedingungen besser kontrollieren zu können, und sind üblicherweise auf nur 3 Jahre angelegt. Wir denken, dass ein Prozessmodell, wie es in dieser Studie gezeigt wurde, dazu beitragen kann, in Kombination mit einem entsprechend geplanten Feldexperiment die raumzeitliche Dynamik von Nährstoffen in der Hangskala besser zu verstehen.

## Literatur

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R.: (1998): Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development, *J.Am. Water Res.Assoc.*, 34(1), 73–88
- Beaujouan, V., Durand, P. and Ruiz, L.: (2001): Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments, *Ecol.Model.*, 137, 93–105
- Cellier, P., Durand, P., Hutchings, N., Dragosits, U., Theobald, M., Drouet, J.-L., Oenema, O., Bleeker, A., Breuer, L., Dalgaard, T., Duret, S., et al.: (2011): Nitrogen flows and fate in rural landscapes, , 229–248
- Clark, M. P., Kavetski, D. and Fenicia, F.: (2011): Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling, *Water Resour.Res.*, 47(9), doi:10.1029/2010WR009827
- Durand, P., Breuer, L., Johnes, P. J., Billen, G., Butturini, A., Pinay, G., van Grinsven, H., Garnier, J., Rivett, M., Reay, D. S., Curtis, C., et al.: (2011): Nitrogen processes in aquatic ecosystems, , 126–146
- Exbrayat, J.-F., Viney, N. R., Frede, H.-G. and Breuer, L.: (2011): Probabilistic multi-model ensemble predictions of nitrogen concentrations in river systems, *Geophys. Res. Lett.*, 38, 5 PP., doi:201110.1029/2011GL047522
- Exbrayat, J.-F., Viney, N. R., Seibert, J., Wrede, S., Frede, H.-G. and Breuer, L.: (2010): Ensemble modelling of nitrogen fluxes: data fusion for a Swedish meso-scale catchment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2383–2397, doi:10.5194/hess-14-2383-2010
- Groffman, P. M., Butterbach-Bahl, K., Fulweiler, R. W., Gold, A. J., Morse, J. L., Stander, E. K., Tague, C., Tonitto, C. and Vidon, P.: (2009): Challenges to incorporating spatially and temporally explicit phenomena (hotspots and hot moments) in denitrification models, *Biogeochemistry*, 93(1-2), 49–77
- Haas, E., Klatt, S., Fröhlich, A., Kraft, P., Werner, C., Kiese, R., Grote, R., Breuer, L. and Butterbach-Bahl, K.: (2011): Towards a new approach to simulating regional N<sub>2</sub>O emissions - the LandscapeDNDC Model, *Landscape Ecol.*, submitted
- Kraft, P.: (2011): Manual and download of the Catchment Modelling Framework - CMF, [online] Available from: <http://www.uni-giessen.de/cms/ilr-download> (Accessed 27 February 2012)
- Kraft, P., Multsch, S., Vache, K. B., Frede, H.-G. and Breuer, L.: (2010): Using Python as a coupling platform for integrated catchment models, *Advances in Geosciences*, 27, 51–56
- Kraft, P., Vache, K. B., Frede, H.-G. and Breuer, L.: (2011): A hydrological programming language extension for integrated catchment models, *Environ.Modell.Softw.*, 26, 828–830, doi:10.1016/j.envsoft.2010.12.009

- Li, C., Frolking, S. and Frolking, T. A.: (1992): A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity, *J.Geophys.Res.*, 97(D9), 9759–9776
- Li, X., Ambrose, R. B. and Araujo, R.: (2004): Modelling mineral nitrogen export from a forest terrestrial ecosystem to streams, *Trans.Am.Soc.Agricult.Eng.*, 47(3), 727–739
- McClain, M. E., Boyer, E. W., Dent, C. L., Gergel, S. E., Grimm, N. B., Groffman, P. M., Hart, S. C., Harvey, J. W., Johnston, C. A., Mayorga, E., McDowell, W. H., et al.: (2003): Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems, *Ecosystems*, 6(4), 301–312
- Pohlert, T., Huisman, J. A., Breuer, L. and Frede, H. G.: (2007): Integration of a detailed biogeochemical model into SWAT for improved nitrogen predictions - Model development, sensitivity, and GLUE analysis, *Ecol.Model.*, 203(3-4), 215–228
- Qu, Y. Z. and Duffy, C. J.: (2007): A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation, *Water Resour.Res.*, 43(8), W08419, doi:10.1029/2006WR005752.
- Tague, C. L. and Band, L. E.: (2004): RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System-An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling, *Earth Interact.*, 8

# **Tracer-basierte Modellkalibrierung von Abflussprozessen in einem vergletscherten Einzugsgebiet in den Alpen**

Michael Engel<sup>1,2</sup>, Daniele Penna<sup>1,3</sup>, Giacomo Bertoldi<sup>2</sup> und Francesco Comiti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultät für Naturwissenschaften und Technik, Freie Universität Bozen, Italien

<sup>2</sup>Institut für Alpine Umwelt, EURAC – Bozen, Italien

<sup>3</sup>Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Universität Padua, Italien

## **Zusammenfassung**

Gletscher besitzen einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserhaushalt alpiner Einzugsgebiete. Insbesondere für Täler mit relativ geringem Jahresniederschlag und steigendem Wasserverbrauch in der Landwirtschaft ist es von großer Bedeutung, den Einfluss von Niederschlag, Schnee- und Eisschmelzwasser auf den Gewässerabfluss und die Grundwasserneubildung zu verstehen.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, mithilfe von  $\delta^{18}\text{O}$  - Isotopen und elektrischer Leitfähigkeit den Anteil von ober- und unterirdischem Abfluss am Gesamtabfluss im Gewässer eines vergletscherten Einzugsgebiets zu bestimmen. Die Kenntnisse über die das Einzugsgebiet dominierenden hydrologischen Prozesse dienen der Parameterkalibrierung des hydrologischen Modells GEOtop 1.2.

Die Gelände- und Modellierungsarbeiten wurden im Einzugsgebiet des Saldurbachs in den östlichen italienischen Alpen (Fläche: 62 km<sup>2</sup>) ausgeführt. Gemessene Abflussdaten eines Teileinzugsgebiets (WG3, Fläche: 11 km<sup>2</sup>) wurden mit simulierten Abflussdaten für einen Kalibrierungszeitraum von 4 Tagen im August 2011 verglichen.

Die Studie hebt hervor, dass das Schneeschmelzwasser am Oberflächenabfluss und an der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet des Saldurbachs einen dominierenden Einfluss hat. Erste Simulationsergebnisse zeigen die wichtigsten Parameter wie Temperaturgradient, Schneereflektion im sichtbaren und IR-Spektrum, Oberflächenrauheit und laterale Bodendurchlässigkeit an, die die Tagesabflussschwankungen kontrollieren.

## **Einleitung**

Gletscher spielen eine wichtige Rolle im Wasserhaushalt alpiner Einzugsgebiete und reagieren daher besonders sensibel auf Klimaschwankungen (Viviroli et al., 2011). Insbesondere Täler mit relativ geringem Jahresniederschlag und steigendem Wasserverbrauch in der Landwirtschaft sind gefährdet. Da es aufgrund des Klimawandels zu einer Niederschlagsneuverteilung und einem Anstieg der Temperatur kommen kann, können Schnee- und Eisschmelze bereits im Frühjahr stattfinden und somit zu einer jahreszeitlichen Verlagerung des höchsten Schmelzabflusses im Gebirge führen (Barnett et al., 2005). In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, das komplexe Zusammenspiel von Niederschlag sowie den Anteil von Schnee- und Eisschmelze am Gewässerabfluss und der Grundwasserneubildung zu verstehen (Escher-Vetter und Siebers, 2007; Huss, 2011).

Die Verwendung der Umweltisotope von Wasserstoff und Sauerstoff als Tracer ist zur Erkennung von Entstehungsorten und Verbreitung von Grundwasser weit verbreitet. Der Isotopengehalt des Niederschlags im Gebirge wird beträchtlich durch einen Höheneffekt bestimmt, der zu einer Auszehrung an

schwereren Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen in Neuschnee und Schneeschmelzwasser gegenüber des Niederschlagswassers führt (Jeelani et al., 2010). Demzufolge ist es mithilfe der charakteristischen Isotopensignatur von Wasser verschiedenen Ursprungs möglich, den relativen Anteil von Niederschlagswasser sowie Schnee- und Eisschmelzwasser am Gewässerabfluss und am neugebildeten Grundwasser zu bestimmen (Taylor et al., 2002).

Weiterhin sind Tracer-basierte Untersuchungen in der Lage, als so genannte „multi-response data“ zur Erstellung und Validierung hydrologischer Modelle zu dienen (Uhlenbrook und Leibundgut, 2002).

## Methoden

Gelände- und Modellierungsarbeiten wurden für das Einzugsgebiet (EZG) des Saldurbachs, in den östlichen italienischen Alpen nahe der italienisch-österreichischen Grenze gelegen, durchgeführt. In dem EZG (WG1, Fläche: 62 km<sup>2</sup>, Höhen: 1600- 3700 m ü.A.) befindet sich auf Höhen zwischen 2700 und 3700 m ü.A. der Weisskugelferner mit einer derzeitigen Ausdehnung von 3,3 km<sup>2</sup> (Abb.1).

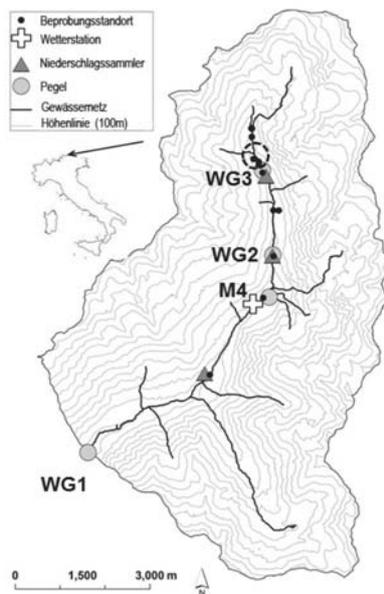


Abb.1: Das EZG des Saldurbachs mit Lage der Pegel, Isotopen-Beprobungsstandorte und Wetterstation. Die beprobten Quellstandorte befinden sich innerhalb des gestrichelten Kreises.

Durch zwei installierte Druckaufnehmer auf 2150 m ü.A. (WG2, Fläche: 20 km<sup>2</sup>) und auf 2350 m ü.A. (WG3, Fläche: 11 km<sup>2</sup>) erfolgte die kontinuierliche Messung des Wasserstands. Auf der Grundlage der mittels Salzverdünnungsmethode durchgeführten Abflussmessungen konnte eine Pegelschlüsselkurve erstellt werden. Das Messintervall beider Druckaufnehmer lag bei 10 Minuten. Lufttemperatur, Niederschlag und weitere meteorologische Daten wurden durch die EURAC-Wetterstation M4 zur Verfügung gestellt (Abb. 1). Bulk-Niederschlagsnehmer für die Isotopenanalyse wurden auf 1800 m ü.A. und in der Nähe der Pegel WG2 und WG3 errichtet (Abb. 1). Dazu wurden 5L-PVC-Behälter mit einer 2 - 3 cm dicken Paraffinschicht zur Vermeidung von Evaporationsverlusten benutzt (IAEA, 2009). Die Niederschlagsbeprobung fand im Zeitraum von April bis Ende Oktober 2011 im Intervall von

ungefähr 45 Tagen (6.5. - 29.6.2011, 29.6. - 9.8.2011, 9.8. - 27.9.2011, 27.9. - 18.10.2011) statt. Die Isotopenbeprobung von Oberflächen- und Grundwasser erfolgte im Zeitraum vom späten Frühjahr bis zum frühen Herbst 2011: Beprobungen im monatlichen oder zweiwöchigen Rhythmus wurden am Saldurbach sowie an verschiedenen Zuflüssen in Höhen von 1800 m bis 2400 m ü.A. (18 Beprobungsstandorte inklusiv 3 Quellstandorte) ausgeführt (Abb. 1).

Ergänzend zu den Isotopenbeprobungen wurde die elektrische Leitfähigkeit mittels tragbarem Leitfähigkeitsmessgerät COND110 (Eutech Instruments) vor Ort bestimmt.

Alle Isotopenuntersuchungen wurden mit einem „Delta V Advantage“-Massenspektrometer (Thermo Scientific) in den Laboratorien der Freien Universität Bozen, Italien, durchgeführt. Die Lagerung der Wasserproben wurde in einem Kühlschrank bei 4°C gewährleistet. Das  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnis wurde mittels standardisierter He-CO<sub>2</sub>-Äquilibrationstechnik ausgeführt (Epstein und Mayeda, 1953). Das Isotopenverhältnis jeder Probe wurde aus dem Mittelwert von 3 Repliken berechnet.

Modellsimulationen wurden mit dem hydrologischen Modell GEOtop 1.2 ausgeführt (Zanotti et al., 2004, Rigon et al., 2006). GEOtop 1.2 berechnet die Wasserhaushaltsbilanz und bindet alle Terme der Energiehaushaltsgleichung für komplexe Geländetopographie ein. Die hier vorgestellten Analysen gelten für den oberen Talbereich (WG3), der sich hauptsächlich aus blankem Fels und Boden (54 %) sowie aus Eis und Schnee (28 %) zusammensetzt. Alpine Wiesen bedecken nur 7,5 % der Fläche.

Das Modell verwendet eine auf Geländehöhendaten basierende Diskretisierung der Landschaft. Eingangsdaten setzen sich aus einem Geländehöhenmodell des TeilEZG WG3 mit einer 100 m-Auflösung, Landnutzungsdaten und der derzeitigen Gletscherausdehnung zusammen. Simulationsläufe wurden mit einem einstündigen Zeitschritt und einem angemessenen spin-off von 15 Monaten definiert. Um die Abflusssimulationen des Modells zur Berechnung der täglichen Abflussschwankungen zu überprüfen, wurde der Zeitraum der Isotopenbeprobung im August 2011 als Kontrollzeitraum gewählt (10.8. - 14.8.2011). Eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Parameter wie Temperaturgradient, Schneereflektion, Oberflächenrauheit und laterale Bodendurchlässigkeit, die die Tagesabflussschwankungen kontrollieren, wurde durchgeführt.

## Ergebnisse

Der Abfluss am Pegel WG3 wird überwiegend durch saisonale Temperaturschwankungen und Niederschlagshöhen im Jahr 2011 bestimmt (Abb. 2). Die täglichen Abflussamplituden und Niedrigwasserstände hängen von wechselnden wärmeren und kühleren Wetterlagen (wöchentliche Skala) sowie von der Jahreszeit (monatliche Skala) ab. Erhöhte Tagestemperaturen führen zu Abflussmaxima von bis zu 2,5 m<sup>3</sup>/s während des Sommers. Das höchste gemessene Abflussmaximum wird mit 3,9 m<sup>3</sup>/s für den 4.9.2011 verzeichnet und ist auf ein Niederschlagsereignis mit einer Intensität von 7,8 mm/h zurückzuführen.

Der für 3 Stationen gemittelte Beprobungsniederschlag zeigt wie erwartet die höchsten  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenkonzentrationen im August (wärmster Monat für 2011) und die niedrigsten Werte für Oktober (kühlster Monat im Messzeitraum).

Die elektrische Leitfähigkeit und Isotopenkonzentration des monatlichen oder zweiwöchigen Beprobungsrhythmus verdeutlichen für die Quellwässer einen leichten Anstieg der Leitfähigkeit von Sommer bis Herbst bei gleichzeitiger  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenanreicherung. Dies ist wahrscheinlich auf den jah-

reszeitlich abnehmenden Anteil an Schneeschmelzwasser im Grundwasser zurückzuführen. Quellwässer weisen eine im Vergleich zum flüssigen Niederschlag geringere Isotopenkonzentration auf und verdeutlichen somit den wichtigen Einfluss von Schnee und Schneeschmelzwasser bei der Grundwasserneubildung. Während die Quellwässer SPR1 und SPR3 einen relativ ähnlichen Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit und der Isotopenkonzentration anzeigen, können für die Quellwässer von SPR2 niedrigere Leitfähigkeitswerte sowie eine steigende Anreicherung an schwereren  $\delta^{18}\text{O}$ -Molekülen beobachtet werden (Abb. 2). Die räumliche Variabilität der Quellwässer in einem kleinen Gebiet (ca. 200 m nördlich des Pegels WG3) ist vermutlich Ursache unterschiedlicher Grundwasser-Fließwege.

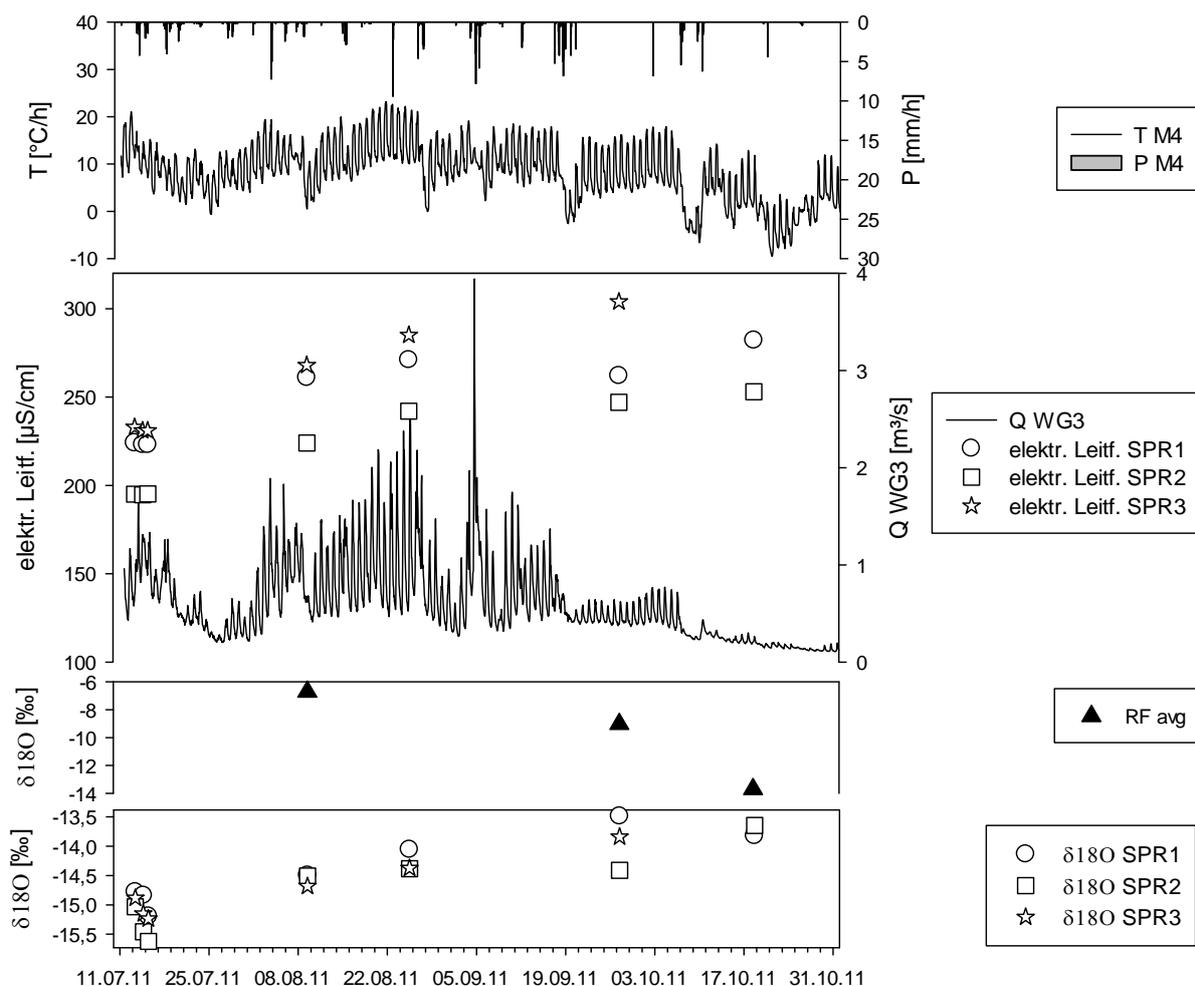


Abb. 2: Niederschlag (P) und Lufttemperatur (T) der Wetterstation M4, Abfluss am Pegel WG3, elektrische Leitfähigkeit und  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenkonzentration der Quellen nahe WG3 (SPR1, SPR2, SPR3). Gemittelte  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenkonzentrationen der Niederschlagsproben (RF avg) sind dargestellt. Niederschlagsproben sind für den Tag der Probenentnahme dargestellt.

Versuchsergebnisse der Isotopenkonzentration unterstreichen die Bedeutung des Anteils der Schneeschmelze an der Grundwasserneubildung. Dies lässt daher vermuten, dass die abflussbildungsrelevanten und zur Kalibrierung notwendigen Parameter des hydrologischen Modells GEOTop 1.2 auch Schneeschmelz- und Abflussprozesse im EZG steuern. Die Modellsensitivitätsanalyse im Hinblick auf jene Parameter wurde durchgeführt und ist für die sensitivsten Parameter und ihren Effekt auf die täglichen Abflussschwankungen dargestellt (Abb. 3).

Die GEOtop-Simulationsergebnisse verdeutlichen hauptsächlich eine Parametersensitivität für den Temperaturgradienten sowie die Oberflächenrauheit: während der Temperaturgradient die Abflussganglinienamplitude bestimmt, wirkt sich die Oberflächenrauheit auf die Form der Abflussganglinie aus. Als Standardparametrisierung gilt daher ein Temperaturgradient von  $9,8\text{ °C}/100\text{m}$  in Kombination mit einer Oberflächenrauheit von  $0,5\text{ m/s}$  (sim80). Eine steigende Reflektivität frischen Schnees verlangsamt die Schneeschmelzprozesse, so dass die täglichen Abflussmaxima sinken (sim95). Geringfügige Änderungen der lateralen Bodendurchlässigkeit beeinflussen die Abflussamplitude (sim92, sim93). Während der simulierte Abfluss für den Kalibrierungszeitraum gleichermaßen überschätzt wird (sim80, sim92), zeigen die anderen Simulationen einen zweideutigen Verlauf von leicht unterschätztem bis leicht überschätztem Abfluss (sim93, sim95).

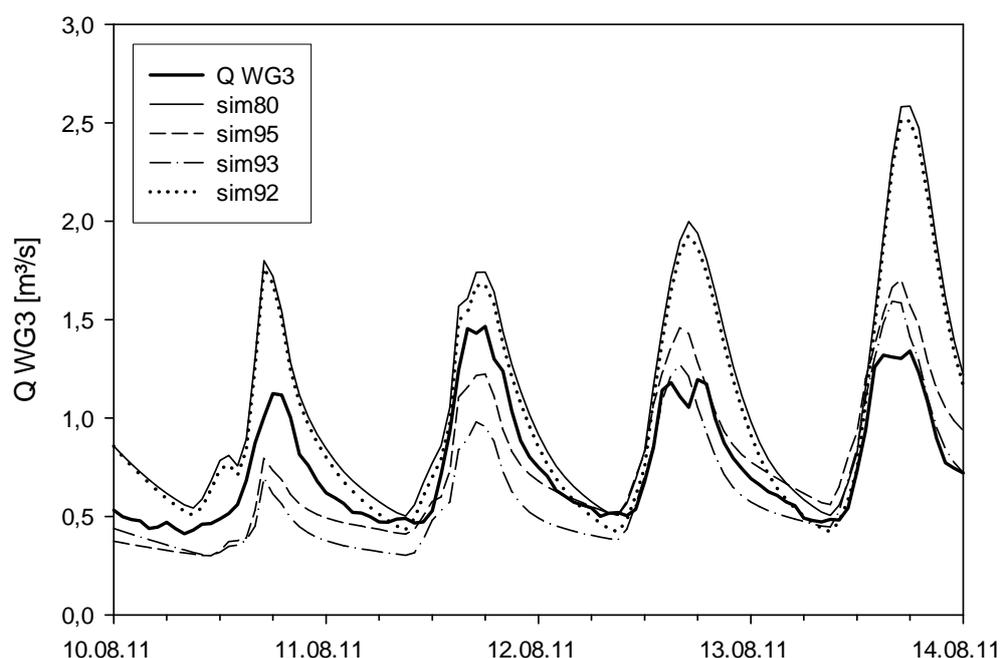


Fig.3: Gemessener Abfluss am Pegel WG3 während des Kalibrierzeitraums (10.8. - 14.8.2011) mit simuliertem Abfluss: sim80 (Temperaturgradient =  $9,8\text{ °C}/100\text{m}$ , Oberflächenrauheit =  $0,5\text{ m/s}$ ), sim95 (Schneereflektivität im sichtbaren Spektrum =  $0,95$ , Schneereflektivität im IR-Spektrum =  $0,8$ ), sim93 (laterale Bodendurchlässigkeit =  $0,0025\text{-}0,000025$ ) und sim92 (laterale Bodendurchlässigkeit =  $0,005\text{-}0,00005$ ).

## Schlussfolgerung

Diese Studie stellt erste Ergebnisse vor, wie komplexen hydrologischen Prozessen in einem GletscherEZG mithilfe von Geländeversuchen und Modellierung zu begegnen ist: Geländeerhebungen verdeutlichen die Bedeutung des Anteils des Schneeschmelzwassers in Quellwässern von Frühjahr bis Sommer 2011 und weisen auf die Bedeutung räumlicher Variabilität der Grundwasserneubildung hin.

Ein Kalibrierzeitraum von 4 Tagen im August 2011 mit aufeinanderfolgenden Abflusstageschwankungen wurde gewählt. Die darauf aufbauende Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die die Schneeeigenschaften (Temperaturgradient, Schneereflektivität) und die Abflusslenkung (Oberflächenrauheit, laterale Bodendurchlässigkeit) kontrollierenden Parameter deutlich die Abflussganglinie modifizieren.

Nachfolgende Arbeiten werden sich mit Modellkalibrierungen in neuen Testzeiträumen mit unterschiedlichen Abflusskonditionen befassen, um die Modellfähigkeiten zur Simulation von Niederschlags-, Schnee- und Eisschmelzeereignissen im Hinblick auf Gewässerabfluss und Grundwasserneubildung zu testen. Kürzlich errichtete Schneeschmelzsammler nahe des Pegels WG3 sollen Isotopenkonzentrationen zur Abflussganglinienauftrennung in Ereignis- und Vor-Ereignis-Komponenten des Gewässerabflusses während der Schneeschmelze ermöglichen. Bestandteil zukünftiger Untersuchungen könnte auch die Erfassung bevorzugter Wasserfließwege innerhalb des Festgesteins und der Talusstrukturen sein.

Wir möchten hiermit Dr. Christian Ceccon für seine umfangreiche Unterstützung bei der Laborarbeit danken. Wir danken weiterhin allen Mitgliedern des „Klimawandel“-Projekts am Institut für Alpine Umwelt der EURAC für die Bereitstellung meteorologischer Daten.

Die Herzog-Sellenberg-Stiftung und die Ritter-Stiftung haben innerhalb des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft dieses Projekt finanziert.

## Literatur

- Barnett, T. P., J.C. Adam und D.P. Lettenmaier (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438: 303–309. DOI: 10.1038/nature04141.
- Epstein S. und T. Mayeda (1953): Variation of O<sup>18</sup> content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 213–224. DOI: 10.1016/0016-7037(53)90051-9.
- Escher-Vetter, H. und M. Siebers (2007): Sensitivity of glacier runoff to summer snowfall events. *Annals of Glaciology* 46, 309-315.
- Huss, M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resour. Res.* 47. W07511, 14 pp., doi:10.1029/2010WR010299.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2009): IAEA-WMO programme on isotopic composition of precipitation: global network of isotopes in precipitation (GNIP) technical procedure for sampling. <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/userupdate/sampling.pdf> (abgerufen am 12.1.2012).
- Jeelani, G., A. Nadeem, A. Bhat und K. Shivanna (2010): Use of  $\delta^{18}\text{O}$  tracer to identify stream and spring origins of a mountainous catchment: A case study from Liddar watershed, Western Himalaya, India. *Journal of Hydrology* 393, 257–264.
- Rigon R., G. Bertoldi und T. M. Over (2006): GEOTop: A Distributed Hydrological Model with Coupled Water and Energy Budgets. *Journal of Hydrometeorology* 7, 371–388.
- Taylor, S., X. Feng, M. Williams und J. McNamara (2002): How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrol. Process.* 16, 3683–3690.
- Uhlenbrook, S. und Ch. Leibundgut (2002): Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation. *Hydrol. Process.* 16, 423–440.
- Viviroli, D., D. R. Archer, W. Buytaert, G. Fowler, G. B. Greenwood, A. F. Hamlet, Y. Huang, G. Koboltschnig, M. I. Litaor, J. I. López-Moreno, S. Lorentz, B. Schädler, H. Schreier, K. Schwaiger, M. Vuille und R. Woods (2011): Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 471–504.
- Zanotti, F., S. Endrizzi, G. Bertoldi und R. Rigon (2004): The GEOTOP snow module. *Hydrol. Process.* 18, 3667-3679.

# Bestimmung von Abflusswegen des Gletscherwassers in einer karstischen Umgebung

David Finger<sup>1</sup>, Martina Kauzlaric<sup>1</sup>, Andreas Hugentobler<sup>1</sup>, Andrea Wirz<sup>1</sup>, Daniela Fischer<sup>1</sup>, Pierre-Yves Jeannin<sup>2</sup>, Matthias Huss<sup>3</sup>, Hans Rudolf Wernli<sup>1</sup>, Eric Weber<sup>2</sup>, Emmanuel Rey<sup>1</sup>, Bruno Schädler<sup>1</sup>, Torsten Vennemann<sup>4</sup> und Rolf Weingartner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geographisches Institut, Universität Bern, Schweiz

<sup>2</sup> Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, La Chaux-de-Fonds, Schweiz

<sup>3</sup> Departements Geowissenschaften, Universität Fribourg, Schweiz

<sup>4</sup> Institut für Mineralogie und Geochemie, Universität Lausanne, Schweiz

## Zusammenfassung

Der weltweite Gletscherrückgang wird in diesem Jahrhundert die Wasserverfügbarkeit in vielen Bergregionen drastisch verändern. In karstischen Bergregionen können solche Veränderungen markante Auswirkungen haben, da wichtige Wasserquellen versiegen könnten. Deshalb ist es wichtig die Herkunft des Abflusswassers zu untersuchen. Um die Herkunft des Abflusses zu bestimmen, haben wir rund um den Glacier de la Plaine Morte (eine karstische Bergregion im Berner Oberland, Schweiz) Isotopen in Wasserproben gemessen und einen Tracerversuch mit drei fluoreszierenden Tracern durchgeführt. Mit dem Tracerversuch konnten die Fliesswege des Schmelzwassers bestimmt werden und mit den Isotopenmessungen konnten Hinweise auf die Herkunft des Abflusswassers gewonnen werden. Die vorläufigen Resultate deuten darauf hin, dass die Karstquellen rund um den Glacier de la Plaine Morte im Frühjahr von der Schneeschmelze gespeisen werden und im Herbst von der Gletscherschmelze. Der Tracerversuch zeigt, dass ein Grossteil des Schmelzwassers durch das glaziale Abflusssystem und über die Oberfläche Richtung Norden abfließt. Beachtliche Traceranteile wurden jedoch auch in den wichtigsten Karstquellen gefunden. Dem Tracerversuch ging eine Periode intensiver Schmelze und Ausbrüche von Gletscherrandseen voraus. Aufgrund dieser Faktoren war das glaziale Abflusssystem sehr gut ausgebildet, was die hohen Fliessgeschwindigkeiten erklärt. Es ist anzunehmen, dass früher im Jahr ein noch grösserer Anteil des Schmelzwassers ins Karstsystem einsickert. Da die Resultate zeigen, dass im Spätsommer einige Karstquellen vor allem von Gletscherwasser gespeisen werden, kann angenommen werden, dass bei einem Verschwinden des Gletschers einige Karstquellen am Ende des Sommers austrocknen werden.

## Einleitung

Im letzten Jahrhundert ist das Volumen von Gebirgsgletschern überall auf der Welt drastisch zurückgegangen. Der Gletscherrückzug wird das Wasserregime in vielen Bergregionen nachhaltig verändern und entsprechend die Wasserkraftproduktion verändern (Finger et al., 2012). Vorhersagen zu künftigen Wasserressourcen sind jedoch schwierig, insbesondere wenn die Schmelzwasserwege teilweise durch ein Karstsystem führen und daher die Abflussmengen nur schwer zu erfassen sind. Dabei kann die Klimaveränderung gerade in karstischen Gebieten bedeutende Auswirkungen für die Natur und die lokale Bevölkerung haben. Der Rückgang der Gletscher wegen der Klimaveränderung kann dazu führen, dass einige Wasserquellen, die aus dem Karstsystem gespeisen werden, ganz austrocknen. In un-

wegsamem Gebirgsregionen kann dies gravierende Konsequenzen haben, da Ersatzwasser von weit her transportiert werden müsste.

Ein typisches Beispiel ist der Glacier de la Plaine Morte im Berner Oberland in der Schweiz. Das Schmelzwasser des Gletschers fließt sowohl nach Norden in den Kanton Bern, als auch in Süden in den Kanton Wallis ab. Das Wasser wird auf beiden Seiten für Wasserkraft, Tourismus, Trinkwasser und Landwirtschaft genutzt. Da ein beachtlicher Anteil des Schmelzwassers auch in das Karstsystem versickert, ist eine genaue Abschätzung des glazialen Abflussbeitrags schwierig. Vorläufige Prognosen zeigen, dass der Gletscher im Laufe des Jahrhunderts verschwinden wird (Huss, mündl. Mitteilung). Es ist zu vermuten, dass es dann zur Austrocknung einzelner Karstquellen kommt und somit die Existenzgrundlage betroffener Anwohner gefährdet würde.

Um die Abflüsse des Gletscherwassers zu definieren, haben wir eine Saison lang an allen wichtigen Quellen Abflussmessstationen installiert und Isotopensignale in Wasserproben gemessen. Zudem wurde im August fluoreszierender Tracer in das Schmelzwasser an der Gletscheroberfläche beigegeben, um die genauen Fließwege des Schmelzwassers zu identifizieren.

## Untersuchungsgebiet

Der Glacier de la Plaine Morte liegt an der Wasserscheide zwischen Bern und Wallis auf ca. 2,750 m ü M. Der Gletscher bedeckt eine Fläche von ca. 8 km<sup>2</sup> und ist stellenweise über 200 Meter mächtig (Abbildung 1). Im Süden liegt der Winterskiort Crans-Montana, der primär vom Wintertourismus abhängt. Im Norden des Gletschers liegt das Simmental, wo Landwirtschaftsbetriebe vom Schmelzwasser des Gletschers abhängen.

Die Geologie unterhalb und um den Gletscher ist vom Karst geprägt in den Schmelz- und Niederschlagswasser versickern kann. Zahlreiche Karstquellen südlich und nördlich des Gletschers deuten darauf hin, dass beachtliche Anteile des Schmelzwassers zuerst durch das Karstsystem und dann in die Oberflächengewässer gelangen. Das Wasser aus den Karstquellen ist jedoch eine unverzichtbare Ressource für die verschiedenen Interessengruppen. Ohne Wasser aus den Karstquellen gibt es keine Wasserkraftproduktion, können Weiden und Rebberge nicht bewässert werden, gibt es kein Trinkwasser für die vielen Touristen und die künstliche Schneeproduktion müsste eingestellt werden.

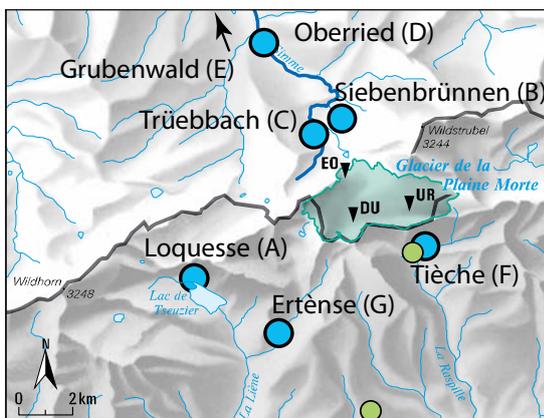


Abb. 1: Übersicht des Testgebietes mit dem Glacier de la Plaine Morte, dem Simmental und der Crans-Montana Region. Blaue Punkte lokalisieren Probenentnahmestellen. Die Probenentnahmestelle bei Grubenwald (E) liegt etwa 7 km flussabwärts im Norden. Kleinere grüne Punkte stellen Niederschlagssammler dar.

## Methode

Mit dem *Karst System Characterization* (KARSYS) Modell des Schweizerischen Instituts für Speläologie und Karstforschung (Vouillamoz et al., 2011) wurden die geologischen und hydrologischen Erkenntnisse des Testgebiets graphisch dargestellt. Dadurch konnte ein geeignetes Messnetz definiert werden und Hypothesen formuliert werden, wie Schmelzwasser vom Glacier de la Plaine Morte abfließt. Das Messnetz ist in vereinfachter Form in Abbildung 1 dargestellt.

Während der gesamten Schmelzphase (Juni - September) wurden zudem im Niederschlag, in der Schneeschmelze, im Gletscherwasser und in allen grösseren Karstquellen südlich des Gletschers die Isotopenzusammensetzungen ( $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  Werte) bestimmt. Die H- und O-Isotopie der beprobten Gewässer wurde an der Universität Lausanne mit einem Laser-Spektrometer System (Picarro L1102i) analysiert. Dabei werden die Messungen über drei unterschiedliche interne Standards kalibriert und über die internationale Skala von VSMOW und SLAP der IAEA normiert. Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 0.07$  ‰ für O-Isotopie und  $\pm 0.4$  ‰ für H-Isotopie.

Um die Abflusswege des Schmelzwassers zu identifizieren, haben wir einen Tracerversuch mit drei fluoreszierenden Tracern durchgeführt. Am 22. August 2011 wurden 30 kg Eosin, 60 Liter Duasyn und 12 kg Uranin an drei Stellen auf dem Gletscher dem Schmelzwasser beigemischt. In den folgenden Wochen wurden an über 20 wichtigen Karstquellen und Oberflächenabflüssen die Abflussmenge und Konzentration der Tracer bestimmt.

Die Tracerkonzentration wurde anhand eines Fluoreszenzspektrometers (auch Lumineszenzspektrometer oder Spektralfluorimeter genannt) im Labor bestimmt. Dabei werden die Proben mittels einer Lichtquelle angeregt. Wird ein Tracer mit Licht angeregt so emittiert er bei einer bestimmten Wellenlänge Fluoreszenzlicht (für Uranin: Anregung bei 490 nm / Fluoreszenz bei 515 nm, für Eosin 512 nm / 537 nm und für Duasyn 449 nm / 474 nm). Anhand der Intensität der Emission kann die Tracerkonzentration bestimmt werden.

In Tabelle 1 sind alle verfügbaren Beobachtungen und Messungen zusammengefasst.

Tab. 1: Überblick der verfügbaren Daten

Parameter	Standort <sup>(1)</sup>	Sampling Periode	Einheit	Frequenz der Probenahme	Quelle
Tracerkonzentration (APEG)	A,B,C,D,E	22.8.11-31.8.11	mg m <sup>-3</sup>	1,4,6,8,12,24h	GIUB
Tracerkonzentration (Fluorimeter)	A	22.8.11-3.10.11	ppb	5min	ISSK
Abfluss	D,E	1993-2012	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	5min	BAFU
Abfluss	C	Jan. 1952-Dez. 1995	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>		BAFU
Pegelstand mittels Drucksonde	B	31.10.11-	cm	5min	GIUB
Abfluss	B	1973-1982	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Tagesmittel	Ingenieursgemeinschaft Rawil Bern
Pegelstand mittels Drucksonde	C	2012	cm	5min	GIUB
Abfluss	A	2012	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	stündlich	GIUB
Niederschlag	F	2012		~monatlich	GIUB
Isotopenmessungen	A, G, und F	Juni bis Oktober	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ $\delta\text{D}$ ‰	~monatlich	GIUB

1) A= Loquesse, B=Siebenbrünnen, C=Trüebbach, D=Oberried bei Lenk, E=ARA Grubenwald, F= Tièche, G = Ertense

## Ergebnisse

### Tracerversuch

Die vorläufigen Resultate des Tracerversuchs zeigen, dass im Sommer ein Grossteil des Schmelzwassers sehr schnell nach Norden abfließt, ohne ins Karstsystem zu infiltrieren. Ein beträchtlicher Anteil des Tracers von der westlichsten Injektionsstelle konnte jedoch durch das Karstsystem ins Wallis, also auf die andere Seite der Wasserscheide gelangen. Innerhalb 48 Stunden sind die eingesetzten Tracer an den verschiedenen Messstellen beobachtet worden (Abb. 2). In den folgenden drei Monaten konnten keine Tracerspuren in Wasserproben festgestellt werden. Dies zeigt, dass der gesamte Tracer innert zwei Tagen über die Oberfläche und durch das Karstsystem entwässert wurde.

In Tabelle 2 sind die vorläufigen Resultate des Tracer-Versuchs zusammengefasst.

Tab. 2: Schätzungen der abgeflossenen Mengen Tracer

Messort	Abk.		Duasyn	Uranin	Eosin
Total eingesetzte Menge			60 L	12 kg	36kg
Standort (Gewässertyp)		Kanton	Menge gefunden am jeweiligen Standort		
Lenk (Oberflächenabfluss)	D	BE	Etwa ein Drittel	Zwei Drittel	Gesamte Menge
Grubenwald (Oberflächenabfluss)	E	BE	Etwa ein Viertel	Zwei Drittel	Gesamte Menge
Loquess (Karstquelle)	A	VS	Etwa ein Viertel	Nichts	Nichts
Siebenbrünnen (Karstquelle)	B	BE	Duasynspuren	Uraninspuren	Eosinspuren
Rezliberg (Karstquelle)		BE	Duasynspuren	Uraninspuren	Eosinspuren
Mittlere Fliessgeschwindigkeiten [km h <sup>-1</sup> ]					
Trübbach bei Siebenbrunnen (Oberflächenabfluss)	C	BE	< 4	< 4	-
Lenk (Oberflächenabfluss)	D	BE	< 6	< 6	< 6
Grubenwald (Oberflächenabfluss)	E	BE	< 7	< 7	< 7
Loquess (Karstquelle)	A	VS	< 0.5	-	-
Siebenbrünnen (Karstquelle)	B	BE	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Rezliberg (Karstquelle)		BE	-	< 0.5	< 0.5

### Isotopenmessungen

Die Isotopenmessungen deuten darauf hin, dass ein beachtlicher Anteil des Schnee- und Gletscherwassers auch ins Karstsystem einsickert und darin sowohl nach Norden als auch nach Süden fließt. Die Isotopenzusammensetzung der Gewässer an den südlichen Standorten (A, G und F; siehe Abbildung 1) zeigen im Verlauf des Sommers eine deutliche Veränderung zu schwereren Isotopenzusammensetzungen (Abb. 2, linke Figuren). Dies deutet darauf hin, dass im Juni der Abfluss eher von der Schneeschmelze geprägt ist, welches mittlere  $\delta^{18}\text{O}$  Werte von -15 ‰ aufweist. Im August steigt das Signal leicht an und nähert sich den Werten, die Wildberger (1981) für Gletscherwasser gemessen hat. Die Messungen im September und Oktober weisen einen deutlichen Anstieg  $^2\text{H}$ - und  $^{18}\text{O}$ -Gehalts auf und nähern sich den gemessenen Werten des Sommerniederschlags. Messungen im gesammelten Niederschlag haben  $\delta^{18}\text{O}$  Werte von zwischen -6 und -9.

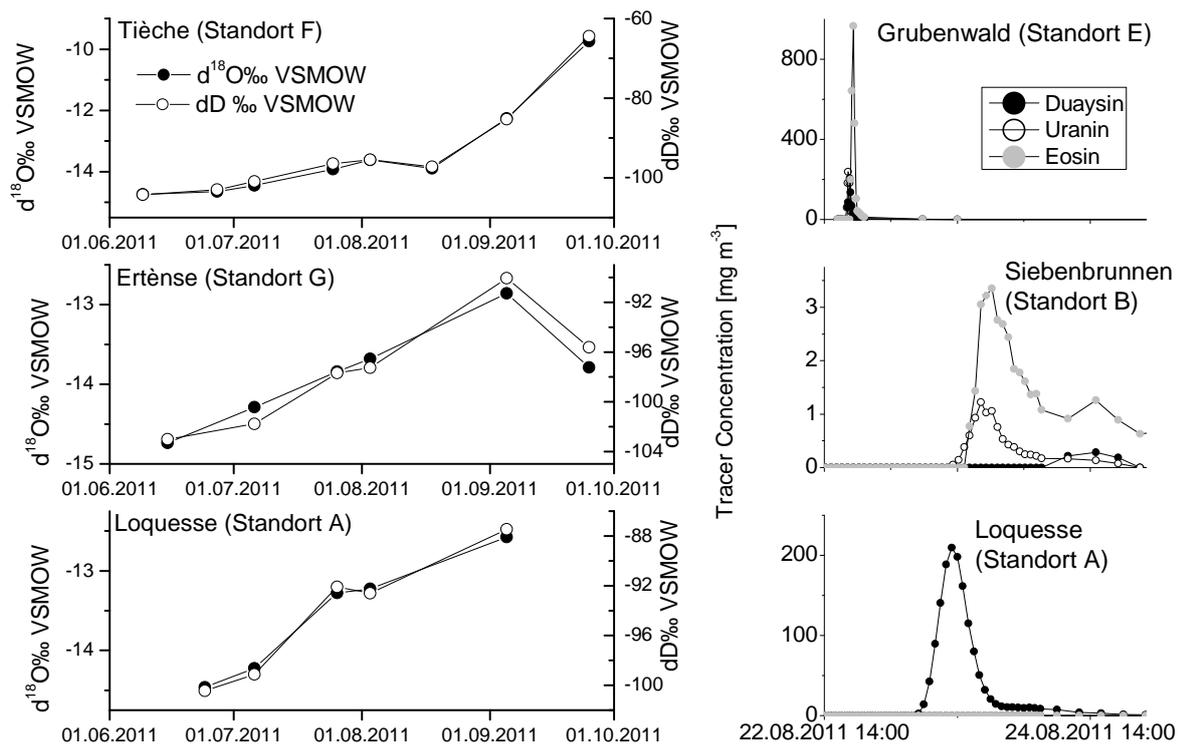


Abb. 2: Resultate der Isotopenmessungen und der Tracerkonzentrationen an den verschiedenen Standorten um das Testgebiet. Figuren auf der linken Seite zeigen den saisonalen Verlauf des Isotopenmessungen und Figuren auf der rechten Seite zeigen den Verlauf der Tracerkonzentration kurz nach der Tracereinspeisung.

## Diskussion

Die vorgestellten Resultate geben einen ersten Einblick in die Schmelzprozesse des Glaciers de la Plaine Morte und die Abflusswege im unterliegenden Karstsystem. Die periodischen Messungen der Isotopenzusammensetzung während der gesamten Schmelzphase des Jahres 2011 deuten darauf hin, dass in den meisten Karstquellen bis Ende Juni das Abflusswasser von der Schneeschmelze dominiert wird. Ab August steigen jedoch die  $\delta^2H$  und  $\delta^{18}O$  Werte in vielen Karstquellen an (Abb. 2). Dies deutet daraufhin, dass das Schmelzwasser mehrheitlich aus Gletscherschmelze besteht, da dann das ganze Einzugsgebiet schneefrei ist. Im September und Oktober wurde eine deutliche Zunahme der  $^2H$ - und  $^{18}O$ -Gehalte in den wichtigsten Karstquellen beobachtet. Gleichzeitig einsetzende Niederschläge deuten darauf hin, dass in dieser Jahreszeit der Abfluss vermehrt aus lokalem Niederschlag besteht.

Die Erkenntnisse aus den Isotopenmessungen werden bestätigt durch die Resultate des Tracerversuchs Ende August 2011. Der Tracerversuch zeigt klar, dass viel Gletscherschmelze aus allen Regionen des Glaciers über die Oberfläche Richtung Simmental entwässert wird. Aber auch das Karstsystem reagiert äusserst schnell. Sehr hohe Konzentrationen von Duaysin wurden bei der Loquessequelle gefunden, was die Hypothese, dass viel Wasser durch den Karst zur Loquesse-Quelle fliesst, bestätigt. Es wurden jedoch nur geringe Mengen an Tracer in der Karstquelle bei Siebenbrunnen gefunden. Das deutet daraufhin, dass zu dieser Zeit das meiste Schmelzwasser durch das glaziale Abflusssystem und über die Oberfläche Richtung Simmental fliesst. Die im Jahr 2011 erstmals beobachteten Gletscherseen am Rand des Glacier de la Plaine Morte werden sich in naher Zukunft wahrscheinlich vergrös-

sern. Gletscherseeausbrüche können das glaziale Abflusssystem sehr effizient erweitern und stellen ein ernstzunehmendes Gefahrenpotential für das Simmental dar. Unsere Versuche zeigen, dass bei einem guten entwickelten Abflusssystem im Gletscher, wie im August 2011, Schmelzwasser schnell in Richtung Berner Oberland geleitet wird und nur zu einem geringeren Anteil ins Karstsystem einsickert. Langfristig kann jedoch angenommen werden, dass Quellen, die heute hauptsächlich mit Gletscherwasser gespeisen werden, aufgrund des Gletscherrückganges gegen Ende des Sommers austrocknen werden.

## **Schlussfolgerung und Ausblick**

Aufgrund der vorläufigen Resultate können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden.

- 1) Der Tracerversuch hat gezeigt, dass nach einem warmen Sommer mit intensiver Gletscher- und Schneeschmelze der grössere Teil des Schmelzwassers aus allen Bereichen des Gletschers dem Talweg entlang über die Oberfläche Richtung Norden ins Simmental abfließt. Infolge des Gletscherrückganges und des intensiven Schmelzwassereintrags könnte die Gefahr durch Gletscherseeausbrüche am Glacier de la Plaine Morte weiter ansteigen. Der Gletscherschwund in den Alpen wird kurz- bis mittelfristig zu einem Anstieg des Abflusses aus vergletscherten Einzugsgebieten führen (Huss et al., 2008).
- 2) Die ersten Isotopenmessungen deuten darauf hin, dass im Frühjahr der Abfluss in den Karstquellen von Schneeschmelze dominiert wird und in der zweiten Sommerhälfte von Gletscherschmelze. Langfristig muss jedoch befürchtet werden, dass Karstquellen, welche in der zweiten Sommerhälfte von Gletscherschmelze dominiert sind, im Herbst austrocknen werden.
- 3) Der Tracerversuch hat auch gezeigt, dass das Karstsystem äusserst schnell reagiert und dass das meiste Schnee- und Gletscherwasser, welches ins Karstsystem einsickert, zur Loquesse-Quelle geleitet wird.

Generell sind die Entwässerungsvorgänge komplexer als angenommen. Unser Vorgehen am Glacier de la Plaine Morte kann jedoch als Modellfall für ähnliche Systeme angesehen werden. Um die Entwässerungsvorgänge besser zu beschreiben und umfassend zu quantifizieren werden wir unsere Messungen im kommenden Jahr weiterführen.

## **Literatur**

- Finger, D., G. Heinrich, A. Gobiet, and A. Bauder (2012), Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century, *Water Resour. Res.*, 48, W02521, doi:10.1029/2011WR010733.
- Huss, M., D. Farinotti, A. Bauder, & M. Funk (2008), Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate, *Hydrol. Processes*, 22(19), 3888–3902, doi:10.1002/hyp.7055.
- Vouillamoz J., Jeannin P-Y, Démary S., Weber E., Malard A. and U. Eichenberger (2011) KARSYS, un concept de caractérisation des systèmes karstiques pour une gestion durable des ressources en eau. 9th conference on limestone hydrogeology. Besançon, France
- Wildberger (1981) Beiträge zur Karsthydrologie des Rawil-Gebietes (helv. Kalkhochalpen zwischen Wildhorn und Wildstrubel), PhD, Universität Bern, Bern.

# Identifizierung und Evaluierung von Karstmodellen mittels systembeschreibender Zielfunktionen

Andreas Hartmann<sup>1</sup>, Alon Rimmer<sup>2</sup>, Jens Lange<sup>1</sup>, Thorsten Wagener<sup>3</sup> und Markus Weiler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup> Israel Oceanographic and Limnological Research Ltd., The Yigal Alon Kinneret Limnological Laboratory, Israel

<sup>3</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA

## Zusammenfassung

In dieser Studie stellen wir einen neuartigen Ansatz vor, in dem verschiedene physikalisch sinnvolle, flächenkonzentrierte Modelle auf ein Karstgebiet angewandt werden. Wir definieren Zielfunktionen, die das typische Verhalten des Karstgebietes beschreiben und testen, ob die Modelle fähig sind, diese Zielfunktionen wiederzugeben. Dabei werden nicht nur Abflussbeobachtungen, sondern auch NO<sub>3</sub>- und SO<sub>4</sub>-Konzentrationen des Abflusses herangezogen. Desweiteren werden die kalibrierten Parameter der ausgewählten Modelle auf ihre Identifizierbarkeit und Plausibilität untersucht. Dies geschieht durch eine Sobol-Sensitivitätsanalyse und eine Plausibilitätskontrolle der kalibrierten Parameter. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Modelle bezüglich der Zielfunktionen, die die Hydrodynamik des Systems beschreiben, gut abschneiden, jedoch ein Modell bezüglich einer Zielfunktion, die sich auf die Hydrochemie bezieht, durchfällt. Zudem wird deutlich, dass manche Modelle zwar sensitive Parameter besitzen, diese jedoch je nach verwendeter Zielfunktion verschiedene Werte annehmen, was auf strukturelle Fehler hindeutet. Die Analyse der Fehler erlaubt eine Bewertung der Modelle hinsichtlich der Bedingungen unter denen sie eingesetzt werden können. Zudem ergeben sich detaillierte Fragestellungen für neue Messkampagnen.

## Einleitung

Die hydrologische Modellierung von Karstgebieten stellt seither Wissenschaftler und Ingenieure vor große Probleme: Aufgrund der hohen Heterogenität von unterirdischen Speicher- und Fließprozessen ist eine eindeutige Auswahl von Modellstrukturen und deren Parametrisierung äußerst schwierig. Nicht selten führen zusätzlichen Messungen von hydrochemische Daten oder geophysikalische Verfahren (Goldscheider et al., 2007) zur Falsifizierung von vorerst als realistisch geltenden Modellstrukturen oder Parametersätzen.

Mit dieser Studie stellen wir einen neuen Ansatz vor, der eine objektive Bewertung und Auswahl von Modellstrukturen ermöglicht. Mehrere plausible Modellstrukturen werden mittels mehrerer Zielfunktionen, die sich auf systemcharakteristische Merkmale beziehen und die das hydrochemische Verhalten mit berücksichtigen, verglichen. Die Anwendung automatischer Kalibrierungsroutinen und Sensitivitätsanalyse ermöglichen eine Bewertung der Strukturen und Empfehlungen für die Wahl eines angemessenen Modells für die Vorhersage können gegeben werden.

## Methode

Unser Ansatz folgt im Kern den von Wagener et al. (2003) empfohlenen Schritten zur Reduzierung von Unsicherheiten von flächenkonzentrierten hydrologischen Modellen: (1) Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Modells, (2) Abschätzung der Identifizierbarkeit der Kalibrierungsparameter und

(3) Evaluierung der Plausibilität der kalibrierten und identifizierbaren Parameter. Das Studiengebiet, an dem der neue Ansatz demonstriert werden soll, ist der Berg Hermon, der im Grenzgebiet von Libanon, Syrien und Israel liegt. Zwei naheliegende Quellen, die Dan- und die Baniassquelle, liefern einen Großteil des Abflusses des Gebiets, welcher letztendlich im Zusammenfluss den Oberen Jordan bildet.

Das hydrologische System des Bergs Hermon wurde bereits in der Vergangenheit modelliert (Rimmer et al., 2006), jedoch basierte die Auswahl der Modellstruktur nur auf der Betrachtung von Abflusszeitreihen. Feldstudien (Briemann, 2008; Gur et al., 2003) deuten an, dass Prozesse und Speicher existieren, die die originale Modellstruktur nicht berücksichtigte. Daher wurden für diese Studie vier verschiedene Modelle betrachtet (Abb. 1). Die Routinen für Boden/Epikarst und die ungesättigte Zone sind für alle Modelle dieselben und näher in Rimmer und Salingar (2006) erläutert. Die Grundwasserroutinen folgen dem Linearitätsprinzip, wobei der Austausch zwischen den Grundwassersystemen für die Modelle 2VZ und 3VZ in Rimmer und Hartmann (2012) beschrieben werden. Alle Modelle erlauben durch die Hinzunahme von Mischungsgleichungen zudem die Modellierung des Stofftransports von  $\text{NO}_3$  und  $\text{SO}_4$  und die Lösung von geogenem  $\text{SO}_4$  im langsamen Grundwassersystem (bis auf Modell Orig). Eine Aufzählung der Parameter und deren Beschreibung ist in Tab. 1 zu finden.

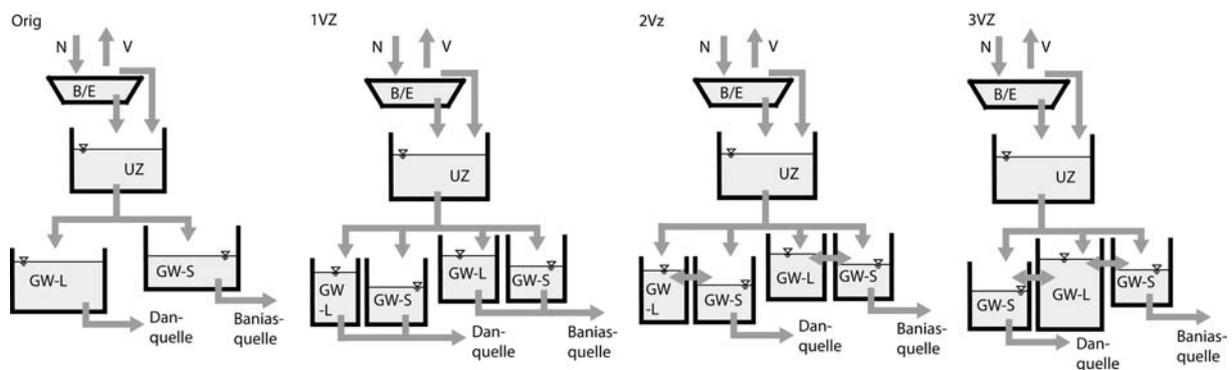


Abb. 1: Ausgewählte Modelle; Orig: Ausgangsmodell entwickelt von Rimmer und Salingar (2006), 1VZ: Modell mit zwei separaten Grundwassersystemen ohne Austausch, 2VZ: Modell mit zwei separaten Grundwassersystemen mit Austausch und 3VZ: Modell mit separaten schnellen Grundwassersystemen und gemeinsamen langsamen Grundwassersystem (N: Niederschlag, V: Verdunstung, B/E: Boden/Epikarst, UZ: ungesättigte Zone, GW-L: langsames Grundwassersystem, GW-S: schnelles Grundwassersystem)

Zur Analyse definieren wir Zielfunktionen (Tab. 2), die das typische Verhalten des Karstgebietes beschreiben (Abb. 2). Dabei werden nicht nur Abflussbeobachtungen, sondern auch  $\text{NO}_3$ - und  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen herangezogen. Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Modelle werden alle Modelle auf jeweils eine der systembeschreibenden Zielfunktionen kalibriert, um zu testen, ob sie strukturell fähig sind, das charakteristische Verhalten der Quellen zu reproduzieren. Als Kalibrierungsalgorithmus dient der Shuffled Complex Evolution Metropolis Ansatz der Universität von Kalifornien (Vrugt et al., 2003).

Zur Abschätzung der Identifizierbarkeit der Parameter werden die Modelle, die Überprüfung der Leistungsfähigkeit bestehen, durch eine Sobol-Sensitivitätsanalyse evaluiert (Saltelli et al., 2008). Die Sobol-Analyse gilt als besonders robust (Tang et al., 2007) und ermöglicht zudem mittels Sensitivitätsindices die Sensitivität aufgrund eines einzelnen Parameters (Sensitivität 1. Grades,  $\text{SI}_{1.\text{Grad}}$ ) und aufgrund von Parameterinteraktionen (totale Sensitivität,  $\text{SI}_{\text{total}}$ ) zu unterscheiden

( $0 \leq SI_{1,Grad}/SI_{total} \leq 1$ ). Vergangene Studien zeigten, dass ein Parameter mit  $SI \geq 0,2$  als sensitiv betrachtet werden kann (van Werkhoven et al., 2008).

Tab. 1: Parametertabelle mit Beschreibung der Parameter, Zuordnung zu den Modellen, Einheiten und deren Kalibrierungsgrenzen

Parameter	Beschreibung	Modell	Einheit	Grenzen	
				Untere	Obere
A	Beitragende Fläche	Orig/1VZ/2VZ/3VZ	km <sup>2</sup>	300	500
f <sub>D,sep</sub>	Beitrag zum Dan Grundwassersystem (1-f <sub>D,sep</sub> zum Banias Grundwassersystem)	Orig/1VZ/2VZ	-	0	1
f <sub>S,sep</sub>	Beitrag zu den schnellen Grundwassersystemen (1-f <sub>S,sep</sub> zum langsamen Grundwassersystem)	3VZ	-	0	1
f <sub>DS,sep</sub>	Beitrag zum schnellen Dan Grundwassersystem (1-f <sub>DS,sep</sub> zum langsamen Dan Grundwassersystem)	1VZ/2VZ	-	0	1
f <sub>BS,sep</sub>	Beitrag zum schnellen Banias Grundwassersystem (1-f <sub>BS,sep</sub> zum langsamen Banias Grundwassersystem)	1VZ/2VZ/3VZ	-	0	1
K <sub>VZ</sub>	Dynamik der ungesättigten Zone*	Orig/1VZ/2VZ/3VZ	d	1	100
K <sub>DS</sub>	Dynamik des schnellen Dan Grundwassersystem*	1VZ/2VZ/3VZ	d	1	400
K <sub>BS</sub>	Dynamik des schnellen Banias Grundwassersystem*	Orig/1VZ/2VZ/3VZ	d	1	50
K <sub>DL</sub>	Dynamik des langsamen Dan Grundwassersystem*	Orig/1VZ	d	100	500
K <sub>BL</sub>	Dynamik des langsamen Banias Grundwassersystem*	1VZ	d	100	500
K <sub>E</sub>	Dynamik des linearen Austausch zwischen schnellem und langsamen Grundwassersystems*	2VZ/3VZ	d	100	500
f <sub>P</sub>	Dynamik des Austauschs zwischen schnellem und langsamen Grundwassersystems kontrolliert durch das Verhältnis der Porositäten**	2VZ/3VZ	-	1	100
D <sub>V</sub>	Wasservolumen zwischen Dan- und Baniasquelle	3VZ	Mio. m <sup>3</sup>	500	5000
In <sub>NO3</sub>	NO <sub>3</sub> Konzentration im Niederschlag	Orig/1VZ/2VZ/3VZ	mg l <sup>-1</sup>	0.5	2.5
In <sub>SO4</sub>	SO <sub>4</sub> Konzentration im Niederschlag	Orig/1VZ/2VZ/3VZ	mg l <sup>-1</sup>	2	4
Geo <sub>SO4</sub>	SO <sub>4</sub> Lösungsrate im langsamen Banias Grundwassersystem	1VZ/2VZ/3VZ	kg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	0	1

\* entspricht dem Speicherkoeffizienten, je kleiner desto dynamischer

\*\* entspricht dem Verhältnis der Porosität des langsamen Grundwassersystems durch die Porosität des schnellen Grundwassersystems, je größer, desto dynamischer der Austausch

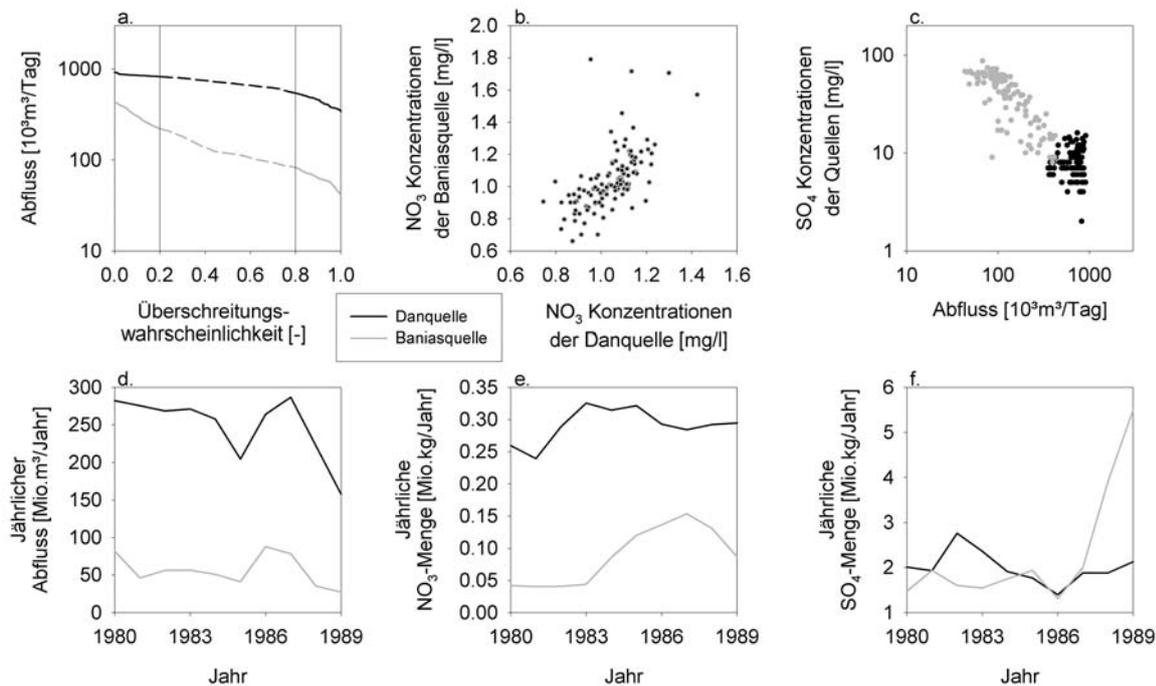


Abb. 2: Charakteristisches Verhalten der Quellen beschrieben durch (a) die Abschnitte der Abflussdauerlinie (Hochwasser 0-0,2; mittlerer Abfluss: 0,2-0,8; Niedrigwasser: 0,8-1 der Überschreitungs-

wahrscheinlichkeit), (b) den linearen Zusammenhang der NO<sub>3</sub> Konzentrationen der beiden Quellen, (c) den linearen Zusammenhang (loglog) zwischen Abfluss und SO<sub>4</sub>-Konzentrationen, (d) den jährlichen Abfluss, (e) die jährliche NO<sub>3</sub>-Menge und (f) die jährliche SO<sub>4</sub>-Menge.

Zuletzt werden die kalibrierten sensitiven Parameter einer Plausibilitätsanalyse unterzogen. Da für die Kalibrierungsgrenzen der Parameter (Tab. 1) bereits realistische Werte gesetzt wurden, konzentriert sich diese Analyse hauptsächlich auf den Vergleich der durch die verschiedenen Zielfunktionen erhaltenen Parameter. Ist ein kalibrierter Parameter sensitiv (SI<sub>1,Grad</sub>) für mehrere Zielfunktionen, so spricht es für eine angemessene Wahl der Modellstruktur, wenn er immer an der selben Position sein Optimum findet. Liegen seine Optima an verschiedenen Positionen, kann auf strukturelle Fehler im Modell geschlossen werden. Zudem wird beachtet, ob die Sensitivitäten (SI<sub>total</sub>) plausibel bezüglich der entsprechenden Zielfunktion sind (siehe Beschreibung in Tab. 2). So wird beispielsweise erwartet, dass für R<sup>2</sup><sub>HW</sub> die Parameter sensitiv werden, die für die schnellen Fließprozesse verantwortlich sind.

Tab. 2: Systembeschreibende Zielfunktionen, die Zeitskala in der sie berechnet werden und ihre Beschreibung (O: Beobachtungen, S: Simulationen, Q,: Abfluss, r: Korrelationskoeffizient, St: Steigung des mittleren Teils der Abflussdauerlinie, log: dekadischer Logarithmus; Indices beschreiben die betrachtete Größe, bzw. den betrachteten Abschnitt der Abflussdauerlinie)

Zielfunktion	Formel	Zeitskala	Beschreibung
Hochwasser	$R_{HW}^2 = r(O_{Q,0-0,2}, S_{Q,0-0,2})^2$	Tag	Charakterisiert die schnellen Fließwege
Mittlerer Abfluss	$S_{MQ} = \frac{St(\log O_{Q,0,2-0,8}) - St(\log S_{Q,0,2-0,8})}{S(\log O_{Q,0,2-0,8})}$	Tag	Charakterisiert das mittlere Abflussverhalten
Niedrigwasser	$R_{NW}^2 = r(O_{0,8-1}, S_{0,8-1})^2$	Tag	Charakterisiert das Auslaufverhalten
NO <sub>3</sub> -Korrelation	$R_{NO_3} = \left  \frac{r(O_{NO_3}) - r(S_{NO_3})}{r(O_{NO_3})} \right $	Monat	Charakterisiert den schnellen Transport von Boden/Epikarst
SO <sub>4</sub> -Abfluss-Korrelation	$R_{SO_4} = \left  \frac{r(\log(O_Q, O_{SO_4})) - r(\log(S_Q, S_{SO_4}))}{r(\log(O_Q, O_{SO_4}))} \right $	Monat	Charakterisiert die Interaktion zwischen langsamen und schnellem Grundwasser
Jährlicher Abfluss	$B_W = \frac{ \sum(O_Q - S_Q) }{\sum O_Q}$	Jahr	Beschreibt den Eintrag von Wasser ins System
Jährliche NO <sub>3</sub> -Menge	$B_{NO_3} = \frac{ \sum(O_{NO_3} - S_{NO_3}) }{\sum O_{NO_3}}$	Jahr	Beschreibt den Eintrag von NO <sub>3</sub> ins System
Jährliche SO <sub>4</sub> -Menge	$B_{SO_4} = \frac{ \sum(O_{SO_4} - S_{SO_4}) }{\sum O_{SO_4}}$	Jahr	Beschreibt den Eintrag von SO <sub>4</sub> ins System

## Ergebnisse und Diskussion

Der Test der Leistungsfähigkeit der Modelle zeigt, dass alle vier Modelle fähig sind, die hydrodynamischen Charakteristika beider Quellen wiederzugeben. Betrachtet man jedoch die hydrochemischen Charakteristika, so fällt das Modell Orig durch. Aufgrund des Fehlens einer geogenen Quelle an SO<sub>4</sub> (Parameter Geo<sub>SO<sub>4</sub></sub>, Tab. 1), kann die SO<sub>4</sub>-Bilanz nicht geschlossen werden (B<sub>SO<sub>4</sub></sub>, Tab. 2). Im Gegensatz dazu sind die anderen drei Modelle strukturell fähig, die hydrodynamischen als auch die hydrochemischen Systemcharakteristika wiederzugeben.

Betrachtet man die Identifizierbarkeit der Parameter (Abb. 3), so fällt auf, dass der SO<sub>4</sub>-Eintrag durch den Niederschlag, In<sub>SO<sub>4</sub></sub>, für alle übrigen Modelle nicht sensitiv ist, was darauf hindeutet, dass der

wichtigste Prozess für die  $\text{SO}_4$ -Dynamik die geogene Lösung von  $\text{SO}_4$  im langsamen Fließsystem ist. Ebenso ist der lineare Austauschkoefizient  $K_E$  in den Modellen 2VZ und 3VZ kaum sensitiv. Der Parameter  $f_p$ , der für den Austausch der Grundwassersysteme verantwortlich ist, scheint diesen Prozess zu dominieren. In Modell 1VZ bleiben die Parameter, die für die schnellen Fließprozesse verantwortlich sind,  $K_{DS}$  und  $K_{BS}$ , nicht sensitiv ( $SI_{\text{total}}$ ). Es erscheint als nicht plausibel, dass die schnellen Fließwege gerade bei Hochwasser, sowie bei der  $\text{NO}_3$ -Korrelation, keine Rolle spielen. Da die kalibrierten sensitiven ( $SI_{1,\text{Grad}}$ ) Parameter stark unterschiedliche Positionen annehmen, scheint das Modell 1VZ strukturell nicht in der Lage zu sein die Systemcharakteristika simultan wiederzugeben und kann als unpassend für das zum modellierende System betrachtet werden.

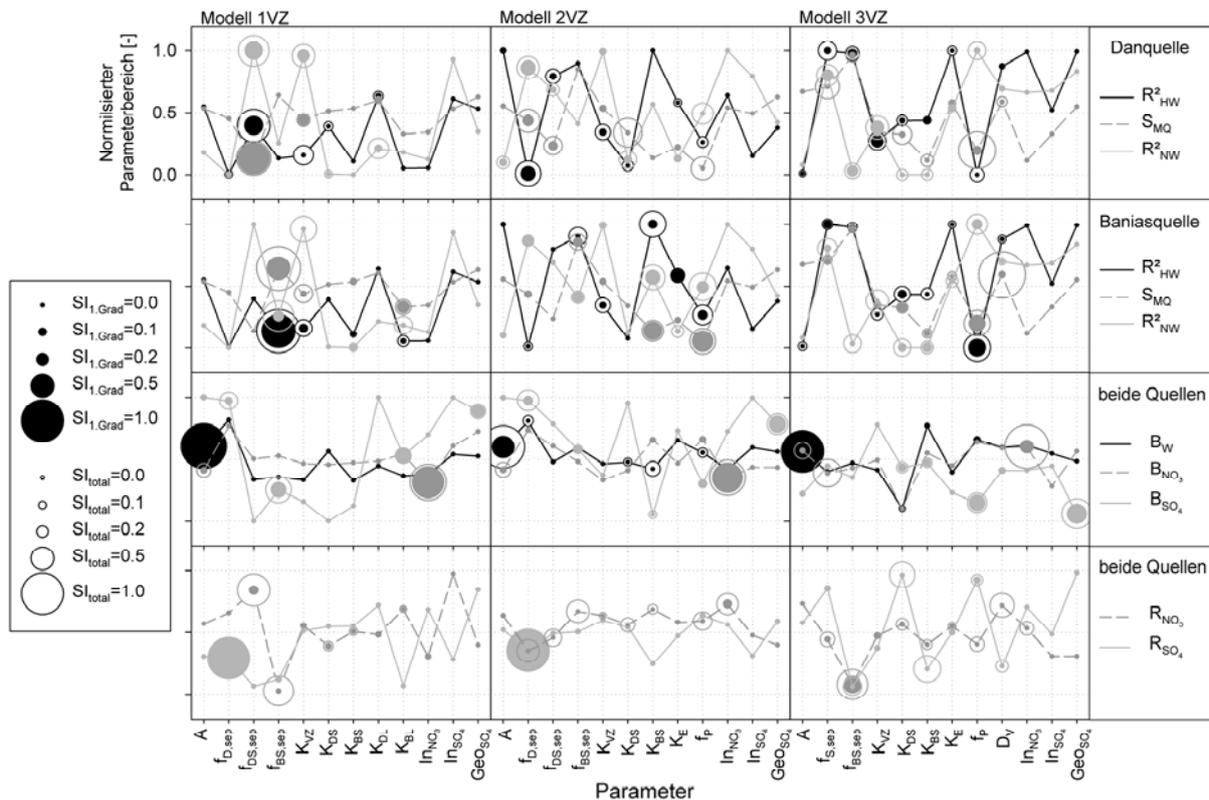


Abb. 3: Totale ( $SI_{\text{total}}$ ) und 1. Grad ( $SI_{1,\text{Grad}}$ ) Sensitivitäten der Modelle 1VZ, 2VZ und 3VZ, so wie die Positionen der auf die verschiedenen Zielfunktionen individuell kalibrierten Parameter (normalisiert mit den Parametergrenzen, siehe Tab. 1)

Im Gegensatz dazu zeigt das Modell 2VZ plausible totale Sensitivitäten. So werden die schnellen Fließprozesse,  $K_{DS}$  und  $K_{BS}$ , bei Hochwasser und die  $\text{NO}_3$ -Korrelation sensitiv, während für Niedrigwasser die langsamen Fließprozesse des Grundwasseraustausches, Parameter  $f_p$ , eine höhere Sensitivität aufweisen. Jedoch zeigen die Positionen der kalibrierten sensitiven ( $SI_{1,\text{Grad}}$ ) Parameter, besonders  $f_{\text{sep}}$ ,  $K_{BS}$  und  $f_p$ , dass optimale Simulationsergebnisse nicht für alle Systemcharakteristika gleichzeitig erreicht werden können. Interpretiert man die Positionen der Parameter für Hoch- und Niedrigwasser, zeigt sich, dass das Grundwassersystem der Danquelle während der Trockenzeit mehr Neubildung braucht, als während der Regenzeit. Dies kann als Indikator für die Notwendigkeit von Wasseraustausch zwischen den Grundwassersystemen der beiden Quellen angesehen werden.

Ähnlich wie Modell 2VZ zeigt das Modell 3VZ plausible totale Sensitivitäten. Doch plotten diesmal auch die sensitiven ( $SI_{1,\text{Grad}}$ ) kalibrierten Parameter für die Zielfunktionen  $R^2_{\text{HW}}$ ,  $S_{\text{MQ}}$  und  $B_{\text{SO}_4}$  näher

beieinander. Dabei fallen die kalibrierten Niedrigwasserparameter deutlich heraus: So werden gute Niedrigwasservorhersagen durch ein kleines  $f_{BS,sep}$  und ein hohes  $f_p$  erzeugt, was auch durch die Kalibrierung mit der  $NO_3$ -Korrelation unterstützt wird. Diese Parameterkombination sorgt für mehr direkte Neubildung das schnelle Dan Grundwassersystem und schnelleres Auslaufen des langsamen Systems, während die Parameterkombinationen für  $R^2_{HW}$ ,  $S_{MQ}$  und  $B_{SO4}$  mehr direkte Neubildung in das schnelle Banias Grundwassersystem Systemen favorisieren. Ein Modelllauf nur mit den Parametern aus  $R^2_{HW}$ ,  $S_{MQ}$  und  $B_{SO4}$  (gemittelt, nach  $SI_{1.Grad}$  gewichtet), zeigt, dass mit diesen Parametern auch gute Vorhersagen für  $R^2_{NW}$  möglich sind. Es könnte also das Niedrigwasserverhalten der Quellen auch durch Austausch zwischen dem Dan und dem Banias Grundwassersystem über ein gemeinsames langsames System erklärt werden. Um dies zu überprüfen, sind weitere Messungen im Gebiet notwendig.

## Schlussfolgerung

Der in dieser Studie vorgestellte Ansatz erlaubte uns die ausgewählten Modelle schrittweise und objektiv auf ihre Leistungsfähigkeit, Unsicherheit und Plausibilität zu prüfen. Die Betrachtung verschiedener Modellstrukturen ermöglichte die Identifizierung von fehlenden Prozessen, wie die geogene Lösung von  $SO_4$  in einem langsamen Grundwassersystem oder den Austausch zwischen den Grundwassersystemen der beiden Quellen. Die Betrachtung verschiedener systembeschreibender Zielfunktionen zeigte, unter welchen Bedingungen die Modellstrukturen plausibel funktionieren und wann sie Probleme aufweisen, wie beispielsweise Modell 3VZ bei Niedrigwasser. Dabei wären manche Defizite in den Modellstrukturen ohne die Berücksichtigung von hydrochemischen Daten verborgen geblieben. So erleichtert unser Ansatz die Modellauswahl und es können gezielt Empfehlungen für Modellstrukturverbesserungen, sowie weitere Datenerhebungen im Feld, gegeben werden.

## Literatur

- Briemann, H. (2008): Recharge and discharge mechanisms and dynamics in the mountainous northern Upper Jordan River Catchment, *Ludwig-Maximilians-University, Munich*.
- Goldscheider, N., D. Drew (2007): *Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis Group*.
- Gur, D., M. Bar-Matthews, E. Sass (2003): Hydrochemistry of the main Jordan River sources: Dan, Banias, and Kezinim springs, north Hula Valley, Israel. *Israel Journal of Earth Science*, 52: 155-178.
- Rimmer, A., A. Hartmann (2012): Simplified conceptual structures and analytical solutions for groundwater discharge using reservoir equations. In: Nayak, D.P.C. (Ed.), *Water Resources Management and Modeling. National Institute of Hydrology, Kakinada, India*.979-953-307-369-8.
- Rimmer, A., Y. Salinger (2006): Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology*, 331: 524-542.
- Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola (2008): *Global Sensitivity Analysis: The Primer. Wiley-Interscience*.
- Tang, Y., P. Reed, T. Wagener, K. van Werkhoven (2007): Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(2): 793-817.10.5194/hess-11-793-2007.
- van Werkhoven, K., T. Wagener, P. Reed, Y. Tang (2008): Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. *Water Resources Research*, 44(1).10.1029/2007wr006271.
- Vrugt, J.A., H.V. Gupta, W. Bouten, S. Sorooshian (2003): A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 39(8).10.1029/2002WR001642.
- Wagener, T., N. McIntyre, M.J. Lees, H.S. Wheater, H.V. Gupta (2003): Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, 17(2): 455-476.

# **Erweiterte Hauptkomponentenanalyse – ein nützliches Werkzeug um Prozesse zu verstehen, die die Wassergüte in Flusseinzugsgebieten steuern**

Benny Selle und Marc Schwientek

Water & Earth System Science (WESS), Universität Tübingen, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Wassergüte von Grund- und Oberflächenwässern in Flusseinzugsgebieten wird durch verschiedene Einzelprozesse beeinflusst, deren Zusammenwirken und Bedeutung auf der Einzugsgebietsebene oft unbekannt sind. Für viele Flusseinzugsgebiete gibt es umfangreiche, aber heterogene, Monitoringdaten zur Wassergüte, die zwar umfassende Prozessinformationen enthalten, aber selten integriert ausgewertet werden. Die Hauptkomponentenanalyse (HKA) ermöglicht eine solche integrierte Auswertung. Durch nachträgliche Korrelation der errechneten Hauptkomponentenwerte mit anderen, nicht in der HKA berücksichtigten Variablen sowie Gebieteigenschaften können Prozesse auf der Einzugsgebietsebene besser verstanden werden. In dieser Studie wurde das 170 km<sup>2</sup> große Ammereinzugsgebiet in SW Deutschland untersucht. Bei der vorliegenden HKA wurden Stoffkonzentrationen 1) in der Ammer und deren Nebenflüssen, 2) von Quellwässern und 3) Grundwässern aus Tiefbrunnen getrennt ausgewertet und dann jeweils um eine Analyse der Hauptkomponentenwerte erweitert. Dabei wurden gemessene Konzentrationen von Hauptionen und ausgewählten organischen Spurenstoffen sowie - für die Brunnen - auch redox-sensitive Größen und Umwelttracer zur Altersdatierung berücksichtigt. Im Allgemeinen pausten sich bei der Qualität von Grund- und Oberflächenwässern vor allem die landnutzungs- und geogen bedingten Stoffeinträge durch. Es konnte abgeleitet werden, dass die Wassergüte im Ammereinzugsgebiet - hinsichtlich der beobachteten Variablen - in erster Linie durch Mischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft und Alters und erst in zweiter Linie von reaktiven Prozessen entlang der Fließpfade gesteuert wird.

## **Einleitung**

Die Wassergüte in Flusseinzugsgebieten wird typischerweise durch eine Vielzahl von komplexen und wechselwirkenden Prozessen beeinflusst (Lischeid und Bittersohl, 2008). Während Einzelprozesse oft lokal gut untersucht sind, ist deren Zusammenwirken und Relevanz auf der Einzugsgebietsebene meistens unzureichend verstanden. Allerdings existieren für viele Flusseinzugsgebiete umfangreiche, aber heterogene, Monitoringdaten zur Wassergüte, die umfassende Prozessinformationen enthalten. Diese Informationen können nur gewonnen werden, wenn integrierte Auswertemethoden angewendet werden (Haag und Westrich, 2002). Die Hauptkomponentenanalyse (HKA) ermöglicht eine solche integrierte Auswertung, aber bei den meisten Anwendungen fehlt eine weiterführende Analyse der Hauptkomponentenwerte, welche ein wichtiges Ergebnis der HKA darstellen. Durch nachträgliche Korrelation der Hauptkomponentenwerte mit anderen - nicht in der HKA berücksichtigten - Variablen sowie Landnutzungsdaten oder Untergrundeigenschaften können Prozesse auf der Einzugsgebietsebene besser verstanden und oft auch lokalisiert werden (Kim et al., 2009). In dieser Studie wurde eine solche erweiterte HKA auf Daten des Ammereinzugsgebietes in SW Deutschland angewendet.

## Untersuchungsgebiet und Methode

In dieser Studie wurde das 170 km<sup>2</sup> große Ammereinzugsgebiet untersucht (Abbildung 1). Die Ammer, mit einem mittleren Abfluss von etwa 1 m<sup>3</sup>/s, wird vorwiegend aus Karst- und Kluftgrundwässern des Oberer Muschelkalk (*mo*) und Gipskeuper (*km1*) gespeist. Im Einzugsgebiet werden ca. 100 l/s Kluftgrundwasser aus Tiefbrunnen im gespannten Oberen Muschelkalk gefördert. Der Abwasseranteil in der Ammer ist fast dreimal so hoch wie im bundesweiten Durchschnitt. Das Einzugsgebiet hat einen hohen Anteil an Siedlungs- (17%) und Ackerflächen (71%). Bei der HKA wurde ein dreistufiges Verfahren angewendet, das jeweils um eine nachträgliche Analyse der Hauptkomponentenwerte erweitert wurde. Zuerst wurden gemessene Konzentrationen von Hauptionen und ausgewählten organische Spurenstoffen für die Ammer und deren Nebenflüsse analysiert. Danach wurden Daten dergleichen Variablen für neun ergiebige Quellen ausgewertet. Zuletzt wurde die HKA auf sieben Tiefbrunnen im Oberen Muschelkalk angewendet, wobei gemessene Konzentrationen von Chlorid, Nitrat, Sauerstoff, das Redoxpotential sowie Tritium und Schwefelhexafluorid Gehalte berücksichtigt wurden.

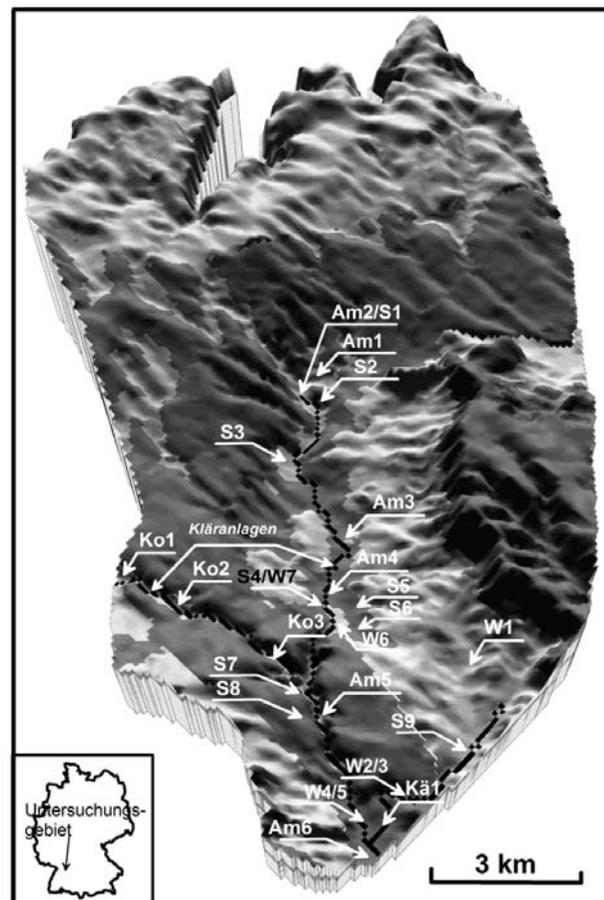


Abb. 1: Ammereinzugsgebiet mit Probenahmepunkten, Vorflutern und hydrogeologischen Einheiten. Hellgrau dargestellt sind Einheiten mit ergiebigen Quellen: *mo* (Oberer Muschelkalk im oberen Bildbereich) und *km1* (Gipskeuper im rechten Bildbereich). Dunkelgrau dargestellt sind Einheiten mit wenig ergiebigen Quellen: *ku* (Lettenkeuper im mittleren Bildbereich) und *km2,3,4* (Schilfsandstein, Bunte Mergel und Stubensandstein am rechten Bildrand). Probenahmepunkte sind im Einzelnen: Ammer (Am1...6) und die Nebenflüsse Kochart (Ko1,2,3) und Käsach (Kä1), Quellen (S1...9) und Tiefbrunnen im *mo* (W1...7).

Die HKA erlaubt prinzipiell die direkte Prozessidentifikation auf der Einzugsgebietsebene. Mathematische ausgedrückt, werden bei der HKA gemessene Variablen zur Wassergüte, z.B. Nitratkonzentrationen, als Linearkombination unabhängiger, nicht direkt beobachtbarer Prozesse dargestellt (Stoyan et al., 1997). Diese errechneten, nicht direkt beobachtbaren Einflussgrößen sind die Hauptkomponenten, deren Werte räumlich und zeitlich variieren. Die räumlich-zeitlich variierenden Hauptkomponentenwerte wurden nachträglich mit anderen, nicht in der HKA berücksichtigten Variablen, sowie Landnutzungs- und geologischen Informationen korreliert. Diese Analyse stellt eine Erweiterung der herkömmlichen HKA dar.

## Ergebnisse

Für die Ammer und deren Nebenflüsse wurde die Variabilität der gemessenen Konzentrationen durch vier interpretierte Prozesse erklärt (Abbildung 2). Diese Prozesse waren im Einzelnen: die Einleitung von geklärten Abwässern, Zutritte von hochmineralisiertem Grundwasser, Zutritte von landwirtschaftlich geprägten Wässern und episodisch auftretende Hochwasserabflüsse. Diese Interpretation der Ergebnisse der HKA wurde durch die Korrelation der ermittelten Hauptkomponentenwerte mit - anhand einer Mischungsrechnung ermittelten - Abflussanteilen abgesichert.

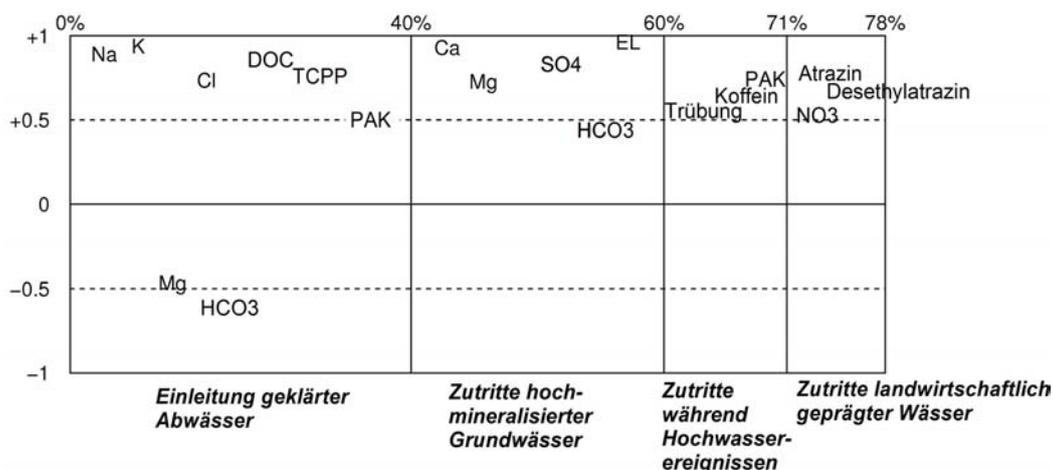


Abb. 2: Ergebnisse der HKA für die Ammer und Nebenflüsse einschließlich Interpretation der vier errechneten Hauptkomponenten, welche mit den entsprechenden Diagrammfeldern beschrieben werden. Auf der vertikalen Achse sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den Hauptkomponenten und gemessenen Wasserqualitätsvariablen abzulesen. Diese Korrelationskoeffizienten sind wichtig für die Interpretation der Hauptkomponenten. Auf der horizontalen Achse ist der Anteil der Varianz aller gemessenen Konzentrationen zu sehen, der durch die jeweiligen Hauptkomponenten erklärt wird. Beispielsweise erklärt die erste Hauptkomponente etwa 40 % der Varianz im Datensatz.

Die Wassergüte der Quellen wurde durch landwirtschaftliche Einträge, geklärte Abwässer sowie die Gipsverwitterung bei den *km1*-Quellwässern dominiert. Für die Hauptkomponentenwerte der einzelnen Quellwässer ergab sich deshalb ein Zusammenhang mit der Landnutzung bzw. der Geologie im Quelleinzugsgebiet (Abbildung 3).

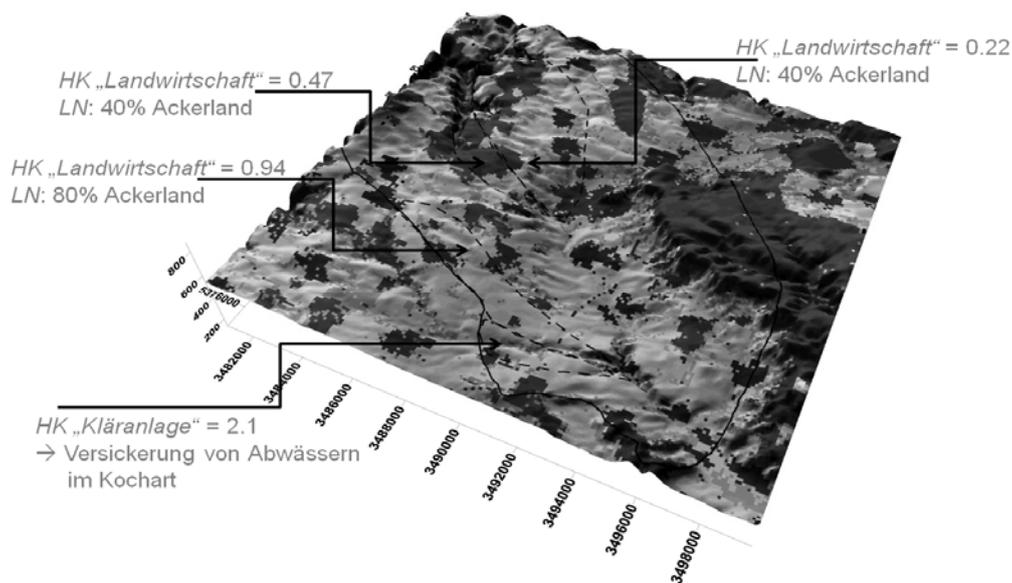


Abb. 3: Zusammenhang der berechneten Hauptkomponentenwerte mit der Landnutzung in den Einzugsgebieten ausgewählter *mo*-Quellen (gestrichelte Linie). Acker und Grünland sind hellgrau; Siedlungen und Wald dunkelgrau dargestellt. Hauptkomponentenwerte von 0,22 und 0,47 sind eher durchschnittlich; Werte von 0,94 und 2,1 zeigen eine überdurchschnittliche Ausprägung der jeweiligen Hauptkomponente an. Im Kochartgraben versickern offensichtlich geklärte Abwässer, die in den *mo*-Quellwässern nachgewiesen wurden.

Die Wassergüte in den Tiefbrunnen wird einerseits durch die Zumischung junger, landwirtschaftlich geprägter Grundwasserneubildung und andererseits durch mikrobielle Stoffumsätze gesteuert. Diese Umsätze scheinen mehr vom lokal unterschiedlichen Angebot an Elektronendonoren (z.B. organischer Kohlenstoff) als von den Fließzeiten zu den Brunnen abzuhängen, da die Hauptkomponente „Mikrobielle Aktivität“ statistisch unabhängig von gemessenen Tritium- und Schwefelhexafluorid- Gehalten war. Außerdem wurde keine signifikante Korrelation zwischen FCKW-Gehalten, einem nicht in der HKA berücksichtigten Altersindikator, und den entsprechenden Hauptkomponentenwerten festgestellt (Abbildung 4).

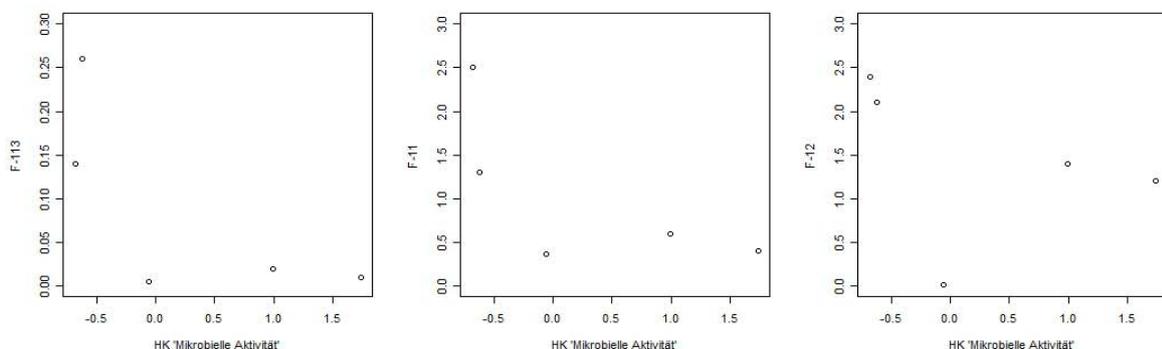


Abb. 4: Berechnete Werte für die Hauptkomponente „Mikrobielle Aktivität“ (negative und positive Werte zeigen unter bzw. überdurchschnittliche Ausprägung an) und FCKW-Gehalte (pmol/l) sind für verschiedene FCKW und fünf Tiefbrunnen gegeneinander aufgetragen. Zwei Tiefbrunnen ergaben anthropogen überhöhte F-12 Gehalte und wurden deshalb nicht berücksichtigt.

## Schlussfolgerung

Im Allgemeinen pausten sich bei der Qualität von Grund- und Oberflächenwässern vor allem die landnutzungs- und geogen bedingten Stoffeinträge durch. Es wurde abgeleitet, dass die Wassergüte im Ammereinzugsgebiet - hinsichtlich der beobachteten Variablen - in erster Linie durch Mischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft und Alters und erst in zweiter Linie von reaktiven Prozessen entlang der Fließpfade gesteuert wird. Allerdings muss diese Aussage etwas relativiert werden, da nur relativ wenige reaktive Substanzen untersucht wurden.

## Danksagung

WESS wird gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (AZ Zu 33-721.3-2) und das Helmholtzzentrum für Umweltforschung, UFZ, Leipzig.

## Literatur

- Haag, I. und B. Westrich (2002): Processes governing river water quality identified by principal component analysis. *Hydrological Processes* 16, 3113–3130.
- Kim, K.H, S.T. Yun, B.Y. Choi, G.T. Chae, Y. Joo, K. Kim und H. S. Kim (2009): Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). *Journal of Contaminant Hydrology* 107, 114-127.
- Lischeid, G. und J. Bittersohl (2008): Tracing biogeochemical processes in stream water and groundwater using nonlinear statistics, *Journal of Hydrology* 357, 11-28.
- Stoyan, D. , H. Stoyan und U. Jansen (1997): Umweltstatistik. Stuttgart und Leipzig, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft.

# Nachweis und Interpretation von Grundwasserqualitätsschwankungen in einem flussnahen Trinkwasserfördergebiet mittels multivariater Analyse

Rebecca M. Page<sup>1,2</sup>, Annette Affolter<sup>1</sup>, Jannis Epting<sup>1</sup>, Peter Huggenberger<sup>1</sup>, Roger Jaggi<sup>2</sup>, Karl Meier<sup>2</sup>, Stefan Scheidler<sup>1</sup>, Daniel Waldmann<sup>2</sup> und Stefan Wiesmeier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Angewandte und Umweltgeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Schweiz

<sup>2</sup> Endress+Hauser Metso AG, Reinach BL, Schweiz

## Zusammenfassung

Die Wasserqualität von flussnahen Trinkwasserversorgungen kann durch Infiltration von mikrobiell stark belastetem Flusswasser gefährdet werden. Grundwasserqualitätsschwankungen sind somit stark von der hydrogeologischen, hydrologischen und betrieblichen Randbedingungen abhängig und zeigen sowohl räumlich, wie auch zeitlich instationäres Verhalten. Eine multivariate Auswertung von kontinuierlich gemessenen Qualitäts-Proxies kann den Systemzustand, d.h. die momentane Grundwasserqualität, erfassen und die Grundlage für die Auslösung einer Warnung an Wasserversorger bieten. Dabei spielen Datenerfassung, -bewirtschaftung und -auswertung eine große Rolle. In diesem Beispiel werden Grundwasserpegel, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit von zwei flussnahen Grundwassermessstellen mittels einer Kombination von selbst-organisierenden Karten und Sammon's Projektion ausgewertet. Die Resultate der multivariaten Auswertung spiegeln die Grundwasserqualität wider und zeigen Veränderungen während eines Infiltrations-wirksamen Hochwassers. Je grösser die Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten in der Darstellung (Messzeitpunkte, Systemzustände) desto grösser ist auch die Veränderung. Somit wird der zeitliche Verlauf der Grundwasserqualität anhand von Proxies und multivariater Analyse erfasst. Diese Information kann dem Betreiber einer Wasserversorgung helfen bei Steuerungsfragen Entscheidungen rasch zu treffen und somit Zeit für den Eingriff in die Pumpensteuerung zu gewinnen und potentielle Verunreinigung des Trinkwassers vermeiden.

## Hygienische Belastung von Grundwasser

Mikrobiologische Trinkwasserverunreinigungen treten immer wieder auf und sind auf eine Reihe von Ursachen, z.B. undichte Abwasserkanäle oder Wiederverkeimungen, zurückzuführen. So kann die Wasserqualität von flussnahen Trinkwasserversorgungen während Hochwassersituationen durch Infiltration von mikrobiell belastetem Flusswasser gefährdet werden. Regelmäßige, punktuelle Kontrollen (Messungen von Indikatorkeimen) erfassen zwar die Basis-Belastung von einzelnen Brunnen, jedoch bieten sie wenige Anhaltspunkte zur Wasserqualität bei variierenden hydraulischen Situationen oder einen Beitrag zum Prozessverständnis. Der zeitliche Verlauf hinsichtlich hygienischer Aspekte der Wasserqualität während Hochwassersituationen ist bisher wenig untersucht worden. Die existierenden Studien zeigen eine hohe Instationarität bezüglich mikrobieller Belastung von Fluss- und Grundwasser (Grisey et al. 2010, tenVeldhuis et al. 2010, Page et al. 2012a). Unter Umständen kann auch ein Verdünnungseffekt während einem Hochwasser auftreten und zu einer Verringerung der mikrobiologischen Belastung führen (tenVeldhuis et al. 2010). Das Auftreten, oder Nicht-Auftreten einer hygieni-

schen Belastung des Grundwassers ist stark abhängig von hydrologischen, hydrogeologischen und betrieblichen Randbedingungen. Jedoch ermöglicht die frühe Erkennung einer potentiellen Gefährdung vor allem bei Hochwassersituationen, welche ein paar Mal im Jahr zur Infiltration von mikrobiell belastetem Flusswasser führen, eine differenzierte Begegnung der Ressourcen- und Trinkwasserbewirtschaftung (Regli et al. 2003).

## Messzeitreihen – Datenbewirtschaftung

Es ist heute möglich eine Vielzahl von Messdaten aufzuzeichnen. Oft sind jedoch die gewünschten Informationen, z.B. Parameter welche hygienische Aspekte der Wasserqualität beschreiben, nicht oder nicht online verfügbar und müssen durch stellvertretende Messungen beurteilt werden. Die kontinuierliche Messung von mehreren Parametern erlaubt die Definition von Proxies als Anzeiger für die momentane Qualität des Grundwassers (Page et al. 2012b). In diesem Fall sind Proxies einfach zu ermittelnde Parameter, deren Auswertung mittels multivariater statistischer Analyse zur Erkennung von Veränderungen der Grundwasserqualität herangezogen werden können. Die Messung und Analyse von Druck (zur Berechnung des Grundwasserpegels), Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit ermöglichen die Erfassung von systemrelevanten Veränderungen, z.B. durch die erhöhte Infiltration von Flusswasser während eines Hochwassers. Die Prozesse der Fluss-Grundwasser Interaktion sind sowohl zeitlich, wie auch räumlich stark instationär. Ein Beispiel für die Instationarität des zeitlichen Verlaufs der Messparameter und Randbedingungen, welche das Grundwasser im Untersuchungsgebiet beeinflussen, z.B. Trinkwasserförderung oder der Flusspegel, wird in Abbildung 1 gezeigt.

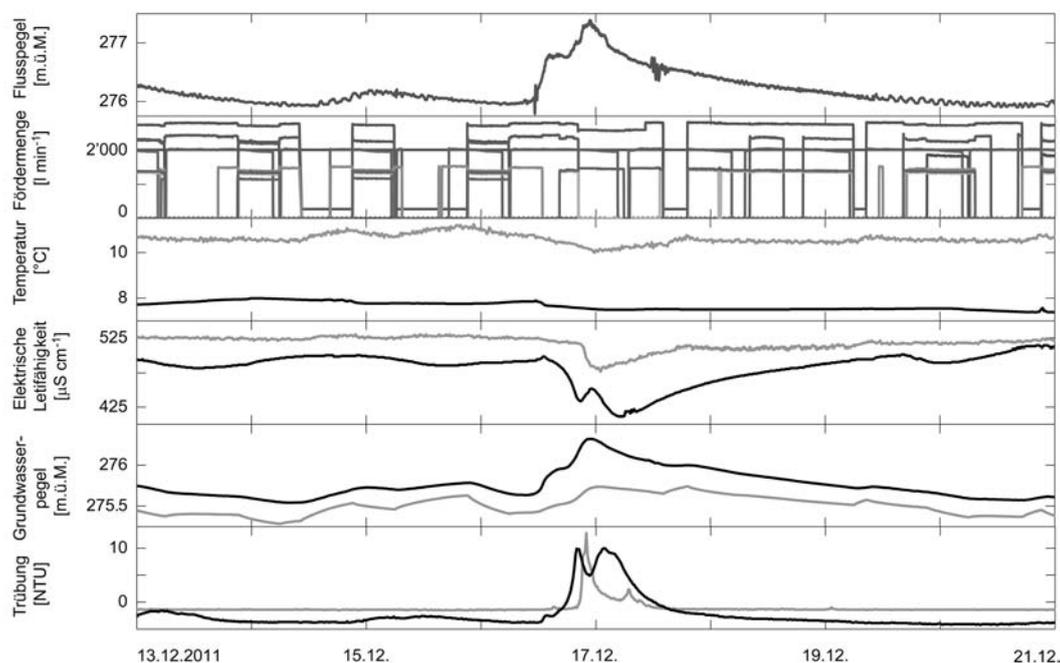


Abb. 1: Die dargestellten Zeitreihen umfassen eine Hochwassersituation im Dezember 2011. Flusspegel und Fördermengen (aufgezeigt sind acht Grundwasserbrunnen) tragen zur Instationarität in den Grundwassermessungen bei. Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Pegel und Trübung, gemessen in zwei Messstellen (W1 (grau) und W3 (schwarz), Abb. 2), zeigen unterschiedliche Schwankungen während dem Hochwasser.

Das Untersuchungsgebiet umfasst ein Naturschutzgebiet in der Nordwest Schweiz, südlich von Basel. Die Birs begrenzt den östlichen Rand des Naturschutzgebietes, in welchem aus acht Trinkwasserbrunnen jährlich ca.  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  Wasser gefördert werden. In der näheren Umgebung befinden sich neben der Naherholungszone, Siedlungs- und Industrieareale. Abbildung 1 zeigt die in der Analyse verwendeten Inputdaten: Grundwasserpegel, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (13. bis 21. Dezember 2011), sowie Trübung, als Zusatzmessung. Die Zeitreihen stammen von zwei flussnahen Messstellen, welche zugleich auch verschiedene Tiefen im Grundwasserleiter repräsentieren (Abb. 2). Die sechs Zeitreihen haben eine 30-Minuten Messauflösung. Der Grundwasserleiter besteht aus fluvialen Ablagerungen aus dem Einzugsgebiet der Birs (Jura). Zum größten Teil sind die Ablagerungen variabel sortierter Kies mit einzelnen Silt- und Tonlinsen. Die resultierende hydraulische Durchlässigkeit der Lockergesteine variiert zwischen  $3 \times 10^{-3}$  und  $10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ . Der Grundwasserstauer besteht aus Elsässer Molasse mit sehr geringer Durchlässigkeit ( $10^{-8} - 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ ) (Huggenberger et al. 2006). Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters beträgt in der Nähe der beiden Messstellen ca. 7 – 9 m und in der Nähe der Förderbrunnen ca. 16 m. Das Gebiet entspricht, in Anlehnung an die Wasserrahmenrichtlinie der EU, einem Grundwasserkörper, einer Verwaltungseinheit der Wasserversorgungen. Die Begrenzung des Grundwasserkörpers ist einerseits natürlich (Randbedingungen, z.B. Elsässer Molasse, Fluss) und andererseits durch die Grundwassernutzungen im unteren Birstal gegeben.

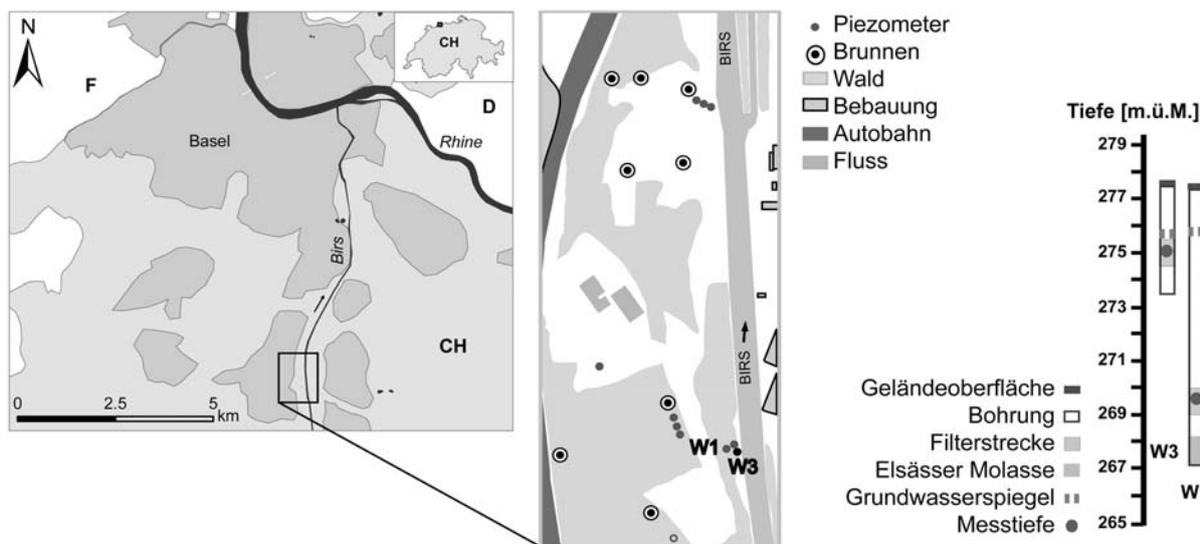


Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet liegt im Nordwesten der Schweiz, südlich der Stadt Basel. Die in dieser Auswertung verwendeten Messstellen (W1 und W3) befinden sich 4 und 9 m entfernt vom Flussufer, die Trinkwasserbrunnen ca. 40 - 500 m. Die Messstellen sind mit YSI multiparameter Sonden ausgerüstet. Die Aufzeichnungen in W1 und W3 stammen zudem aus verschiedenen Tiefen im Grundwasserleiter.

Die Bewirtschaftung, Auswertung und Interpretation von mehreren Parametern und Messstellen zugleich ist jedoch vor allem in Gefährdungssituationen schwierig wenn die Entscheidung für einen adäquaten betrieblichen Eingriff rasch getroffen werden muss. Bei flussnahen Trinkwasserbrunnen ist unter anderem die Reaktionszeit bei Beginn eines Hochwassers entscheidend für die Zusammensetzung der Wasserqualität des Rohwassers der Wasserversorgung: Eine frühzeitige Erkennung der potentiellen Gefährdung des Grundwassers ermöglicht eine differenzierte Analyse der Situation, erschafft mehr Zeit um einen geeigneten Eingriff in die Steuerung des Leitsystems vorzunehmen, und

trägt somit zur Verminderung des Potentials der Verunreinigung flussnaher Wasserversorgungen durch mikrobiell belastetes Flusswasser bei. Ein zentrales Datenbanksystem vereinfacht die Verwaltung der Messreihen, sowie deren Auswertungen. Neben kontinuierlichen Zeitreihen, können auch die Resultate von mikrobiologischen Routineuntersuchungen zusammen mit Informationen zu den Messstellen, z.B. Einbau, hydraulische Leitfähigkeit logisch gespeichert und automatisch abgerufen werden.

## **Multivariate Auswertungsverfahren**

In diesem Beitrag wird anhand eines Anwendungsbeispiels gezeigt, wie die Erkennung der aktuellen Gefährdung den Systemzustand erfassen kann. Die multivariate Analyse (SOM-SM) beruht auf selbstorganisierenden Karten (SOM, engl. Self-Organizing Map, Kohonen (2001)), welche zur Kategorie der unbeaufsichtigten neuronalen Netzwerke gehören, und einer Sammon's Projektion (SM, engl. Sammon's Mapping, Sammon (1969)) als graphische Erweiterung und Veranschaulichung der SOMs. Dabei werden Zeitreihen von Grundwasserpegel, elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur in mehreren Grundwassermessstellen aufgezeichnet und per Fernübertragung ausgelesen (Abbildung 1 und 2). Die anschließende SOM-SM Analyse reduziert die Dimension des Datensatzes und lässt Muster (z.B. 'potentielle Gefährdung') im aktuellen Systemzustand erkennen und entsprechende Empfehlungen zur Pumpensteuerung an die Betreiber einer Wasserversorgung weiterleiten.

Vor der SOM-SM Auswertung wird die Datenmatrize normalisiert um die Skalen der sechs Messreihen einander anzugleichen. Neben dem Hervorheben von intrinsischen Mustern aus der Datenmatrix (Inputdaten), wird auch eine Kompression der Dimension vorgenommen. In diesem Fall sind die Inputdaten sechs gemessene Parameter (Grundwasserpegel, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit von zwei Messstellen (W1 und W3)) und der Output sind zwei statistische Grössen, welche den Systemzustand beschreiben: Die SOM Auswertung fasst die einzelnen Messzeitpunkte aufgrund ihrer Ähnlichkeiten zusammen (*Best-Matching Units* (BMU)). Die Sammon's Projektion wird in Anschluss an die SOM Analyse anhand von den BMUs berechnet. Dabei erhält jeder Messzeitpunkt eine Zuordnung (XY-Koordinaten) in einer 2D Projektion (Abbildung 3). Die Ähnlichkeit der Zustände, d.h. der Messzeitpunkte, wird durch die (euklidische) Distanz zu anderen Punkten/Zuständen dargestellt. Somit sind sich Zustände mit geringer Distanz zueinander ähnlicher, als solche die weit entfernt voneinander sind. Ein Beispiel wird in Abbildung 3 gegeben, wobei Zustände A und T ähnlich sind, beide Zustände sich jedoch von Zustand P unterscheiden. Während dem Hochwasser (16./17.12.) befinden sich die Punkte (z.B. Zustand P) in einem anderen Bereich der Projektion, als während Situationen ohne Hochwasser (Zustände A und T).

Die Distanz zwischen Zuständen kann sowohl statisch genutzt werden, z.B. Abbildung 3, sie bietet jedoch auch die Möglichkeit die zeitliche Veränderung zu erfassen. Wird ein Grenzwert der Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten überschritten, deutet die Änderung des Systemzustandes auf eine potentielle qualitative Gefährdung des Grundwassers hin. Die hydrogeologischen Kenntnisse des Grundwassersystems ‚Reinacherheide‘ zeigen, dass größere Änderungen der Grundwasserqualität während dem Hochwasserereignis Mitte Dezember 2011 auf verstärkte Flusswasserinfiltration zurückzuführen sind.

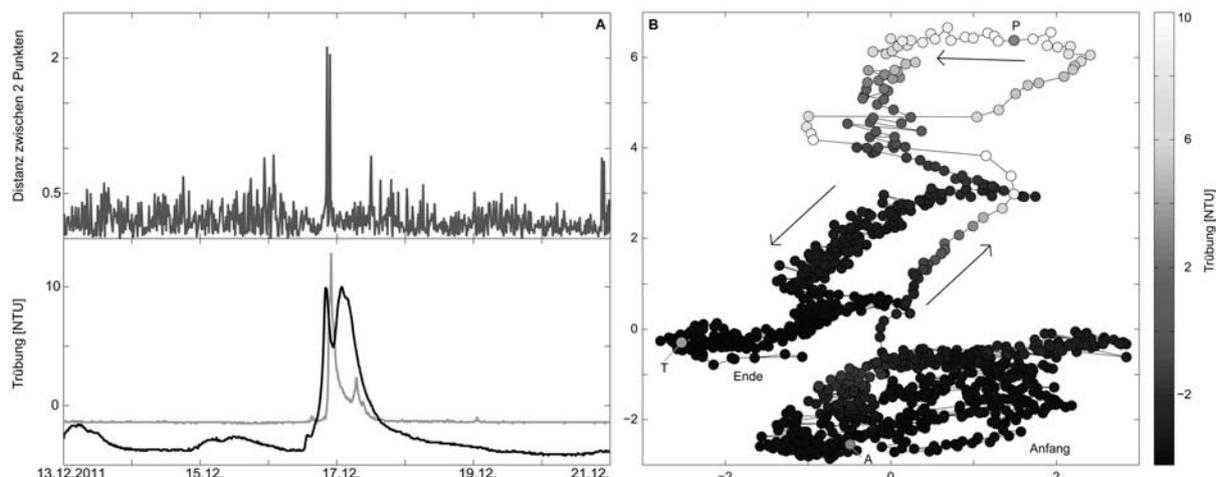


Abb. 3: A. Größere Änderungen zwischen zwei Messzeitpunkten (Distanz) finden während der Hochwassersituation und dem Anstieg der Trübung statt. B. Die Visualisierung der SOM-SM Ergebnisse. Die Pfeile zeigen die Entwicklung des Systems während dem gesamten Zeitraum (12. - 21.12.). Die Hochwassersituation ist anhand von den erhöhten Trübungswerten, dem grösseren Abstand zwischen Punkten und der geringeren Dichte der Punkte deutlich zu erkennen. P, T und A zeigen unterschiedliche Situationen: A und T sind vor und nach dem Hochwasserereignis, P währenddessen.

## Schlussfolgerung

Ziel dieses Ansatzes ist es Fachwissen aus verschiedenen Bereichen der Prozesskette der Trinkwasserproduktion, z.B. hydrogeologische Kenntnisse, Aufbau und Betrieb eines Messnetzes, sowie Bewirtschaftung und Steuerung einer Trinkwasserversorgung, anhand von einem integrativen Leitsystem-Element, zu kombinieren um die Wasserressourcenbewirtschaftung zu optimieren. Die Optimierung beruht auf einem Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) für die Steuerung der Pumpen bei potentieller Gefährdung der Trinkwasserqualität. Die multivariate Auswertung ermöglicht die Weitergabe von Informationen bezüglich dem Anfang einer potentiellen Gefährdung, deren Ausmaß und Dauer, respektive Entwarnungszeitpunkt. Dieser Ansatz ist nicht unabhängig von Prozessverständnis, vielmehr ermöglicht die SOM-SM Auswertung das Prozessverständnis zusammen mit kontinuierlichen Messungen automatisiert zu interpretieren und somit eine Warnung bei potentieller Gefährdung des Trinkwassers auszulösen, ohne auf einer aufwendigen und zeit-intensiven manuellen Interpretation zu beruhen.

## Literatur

- Grisey, E., E. Belle, J. Dat, J. Mudry and L. Aleya (2010): Survival of pathogenic and indicator organisms and landfill leachate through coupling bacterial enumeration with tracer tests. *Desalination*, 261 (1-2), 162-168
- Huggenberger, P., J. Epting, I. Spottke, C.Regli, E. Zechner (2006): INTERREG III A-Projekt MoNit: Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Kohonen, T. (2001): Self-Organizing Maps. Springer

- Page, R. M., S. Scheidler, E. Polat, P. Svoboda and P. Huggenberger (2012a): Faecal Indicator Bacteria: Groundwater Dynamics and Transport Following Precipitation and River Water Infiltration. *Water, Air & Soil Pollution*, doi: 10.1007/s11270-011-1065-5
- Page, R. M., G. Lischeid, J. Epting and P. Huggenberger (2012b): Principal Component Analysis of Time-series for Identifying Indicator Variables for Riverine-groundwater Extraction Management. *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.025
- Regli, C., M. Rauber and P. Huggenberger (2003): Analysis of aquifer heterogeneity within a well capture zone, comparison of model data with field experiments: A case study from the river Wiese, Switzerland. *Aquatic Sciences* 65 (2), 111-128
- Sammon, J. (1969): A Nonlinear Mapping for Data Structure Analysis. *IEEE Transactions on Computers*, C-18(5), 401-409
- tenVeldhuis, J. A. E., F. H. L. R. Clemens, G. Sterk and B. R. Berends (2010): Microbial risk associated with exposure to pathogens in contaminated urban flood water. *Water Research* 44, 2910-2918

# **Effekte lateraler bodennaher Austauschprozesse auf die Evapotranspiration in strukturierten Landschaften**

Gunnar Lischeid

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg, Deutschland

Die Evapotranspiration (ET) stellt nach dem Niederschlag die zweitgrößte Flussgröße des Wasserhaushalts in Norddeutschland dar. Eine direkte Bestimmung der ET ist jedoch nur mit hohem Aufwand möglich. Messdaten bodengestützter Erfassungen liegen dementsprechend in der Regel entweder in sehr grober zeitlicher und räumlicher Auflösung (z.B. Bilanzierung in Einzugsgebieten), oder aber für relativ kleine, möglichst homogene Landschaftsausschnitte (z.B. Eddy-Kovarianz-Methode, wägbare Lysimeter) vor. Entsprechend wird die ET in hydrologischen Modellen typischerweise ohne Berücksichtigung lateraler Austauschprozesse in den bodennahen Luftschichten abgebildet. Es ist allerdings davon auszugehen, dass letztere in abwechslungsreichen Landschaften mit einem ausgeprägten Relief und einem Mosaik terrestrischer und aquatischer Bereiche, unterschiedlicher Landnutzungen, Vegetationstypen, Grundwasserflurabstände und Böden eine wichtige Rolle spielen.

Die Bedeutung dieser lateralen bodennahen Austauschprozesse wurde für zwei jeweils ca. 500 km<sup>2</sup> großer Landschaftsausschnitte in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern untersucht. Für diese Regionen lagen Satelliten-gestützte Abschätzungen des Stroms der latenten Wärme für vier bzw. drei verschiedene Termine und mit einer Auflösung von 30 m vor. Mittels Hauptkomponentenanalyse wurden die Daten auf Länge und Richtung räumlicher Korrelationen untersucht und letztere mit der jeweiligen Windrichtung des Aufnahmetages verglichen. Zur Abschätzung der charakteristischen Raumskala der Austauschprozesse wurden die Analysen mit verschiedenen Aggregierungsstufen durchgeführt. Der Anteil der räumlichen Varianz, der auf diese bodennahen lateralen Austauschprozesse zurückzuführen war, betrug für einzelne Termine bis zu 10%. Diese Effekte waren über eine Entfernung von bis zu einigen km nachzuweisen. Offensichtlich sind diese Austauschprozesse auch für die hydrologische Modellierung nicht zu vernachlässigen, insbesondere für die im Zuge des Klimawandels vermutlich zukünftig häufiger zu erwartenden Perioden starker Trockenheit.

# Multikriterielle Kalibrierung gekoppelter Boden-Pflanze-Atmosphäre Modelle

Sebastian Gayler<sup>1</sup>, Thomas Wöhling<sup>1</sup>, Eckart Priesack<sup>2</sup>, Joachim Ingwersen<sup>3</sup>,  
Hans-Dieter Wizemann<sup>4</sup>, Petra Högy<sup>5</sup>, Andreas Fangmeier<sup>5</sup>, Volker Wulfmeyer<sup>1,4</sup> und Thilo Streck<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Water & Earth System Science (WESS), Universität Tübingen, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Bodenökologie, Helmholtz-Zentrum München, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Deutschland

<sup>4</sup> Institut für Physik und Meteorologie, Universität Hohenheim, Deutschland

<sup>5</sup> Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie, Universität Hohenheim, Deutschland

## Zusammenfassung

Wir verwenden das modulare Modellsystem Expert-N, um den Einfluss der strukturellen Modellkomplexität von vier Boden-Pflanzen-Modellen auf die Kalibrierungsergebnisse zu analysieren. Wir untersuchen die Fähigkeit dieser Modelle, simultan gemessene Zeitreihen von Bodenwassergehalt, Blattflächenentwicklung und aktueller Evapotranspiration (Eddy-Kovarianz) zu reproduzieren. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt in einem multikriteriellen Verfahren mit drei Zielfunktionen, die die Diskrepanz zwischen Messungen und Simulation der verschiedenen Zustandsgrößen beschreiben. Dabei verwenden wir den evolutionären Suchalgorithmus AMALGAM, um simultan die wichtigsten Pflanzenwachstums- und bodenhydraulischen Parameter zu schätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der simultanen Simulation der unterschiedlichen Zustandsgrößen beträchtliche Kompromisse bei der Kalibrierung der Modelle einzugehen sind. Diese Kompromisse reduzieren sich jedoch erheblich, wenn mechanistische Modellbeschreibungen des Pflanzenwachstums verwendet werden.

## Einleitung

Die Bodenfeuchte, die Energiebilanz an der Landoberfläche und der Zustand der unteren Atmosphäre sind durch verschiedene Prozesse eng miteinander verbunden. Insbesondere die Vegetation spielt als Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre eine besondere Rolle in diesem gekoppelten System. Um das komplexe Zusammenspiel der beteiligten Prozesse besser zu verstehen, wurden deshalb in den letzten Jahrzehnten zahlreiche physikalisch basierte numerische Boden-Pflanze-Atmosphäre Systemmodelle entwickelt. Da diese Modelle mit unterschiedlichen Zielsetzungen entwickelt wurden, unterscheidet sich der Komplexitätsgrad ihrer Prozessdarstellungen erheblich. In Modellen, die entwickelt wurden, um die Dynamik der Bodenfeuchte vorherzusagen, werden Pflanzen häufig als abstrakter Senken-Term dargestellt. Für die Kalibrierung solcher Modelle wird manchmal nur eine Zustandsgröße verwendet, z.B. Bodenwassergehalt oder Saugspannung. Rückkopplungen zwischen Bodenfeuchte, Pflanzenwachstum und stomatärer Leitfähigkeit werden ignoriert oder durch empirische Beziehungen ersetzt. Für eine gekoppelte Betrachtung des Boden-Pflanze-Atmosphäre Systems muss die Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre jedoch in alle Richtungen konsistent sein. Da verschiedene Zustandsgrößen wie Bodenfeuchte, Blattflächenindex und Evapotranspiration jedoch verschiedene, zum Teil widersprüchliche Informationen über das System beinhalten können, führt die Anpassung an nur eine Zustandsgröße oft zu einer schlechten Übereinstimmung mit den anderen Zustandsgrößen.

In diesem Beitrag analysieren wir den Einfluss der strukturellen Komplexität in der Beschreibung von Pflanzenprozessen auf die Fähigkeit gekoppelter Boden-Pflanzen-Modelle, verschiedene Komponenten des ökohydrologischen Systems simultan zu beschreiben. Dabei nutzen wir das modulare Modellsystem Expert-N, um vier unterschiedliche Pflanzenmodelle an ein Bodenwassermodell zu koppeln. Für die Kalibrierung der Modelle verwenden wir Zeitreihen des Bodenwassergehalts, des Blattflächenindex und der Evapotranspiration, die in zwei mit Winterweizen bestandenen Versuchsfeldern im Kraichgau und auf der Schwäbischen Alb gemessen wurden. Die Anpassung der Modelle erfolgt durch simultane Abschätzung der wichtigsten Pflanzenwachstums- und bodenhydraulischen Parameter mit Hilfe des multi-methoden Suchalgorithmus AMALGAM (Vrugt und Robinson, 2007).

## **Verwendete Daten und Methoden**

### *Feldexperimente und Methoden*

Die Daten wurden im Rahmen des DFG-Verbundprojektes PAK 346 im Jahr 2009 an zwei Messstationen im Kraichgau (EC1) und auf der Mittleren Schwäbischen Alb (EC6) gemessen. Die beiden Standorte kontrastieren in ihren klimatischen Bedingungen und Böden. Während der Kraichgau durch ein mildes Klima mit vergleichsweise hohen Temperaturen und moderatem Niederschlag gekennzeichnet ist (Jahresmitteltemperatur 9,3°C, mittlerer Niederschlag 777 mm), ist das Klima auf der Mittleren Schwäbischen Alb kühler und niederschlagsreicher (6,5°C, 962 mm). Die Messstationen sind jeweils in einem offenen, flachen 15 ha (EC1) bzw. 13 ha (EC6) großen Feld platziert, die im betrachteten Zeitraum mit Winterweizen bestanden waren. Die Aussaat des Winterweizen erfolgte im Herbst 2008, die Ernte am 6. August (EC1) bzw. 21. August 2009 (EC6). Der Bodentyp am Standort EC1 ist eine Pararendzina, die sich aus einer mehrere Meter dicken Löss-Schicht entwickelt hat, während sich am Standort EC6 eine Rendzina aus Weißjura-Kalken findet (Bodenmächtigkeit 21 cm). Auf fünf ca. 4 m<sup>2</sup> großen Teilflächen wurde jeweils der Blattflächenindex (LAI) zu acht verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Zur Bestimmung der fühlbaren und latenten Wärmeflüsse (aktuelle Evapotranspiration, ETA) wurden an beiden Standorten im Frühjahr 2009 Eddy-Kovarianz-Stationen installiert (EC1: 17.4., EC6: 30.4.). Zur Bestimmung der Energiebilanz an der Landoberfläche wurden die einfallende und abgestrahlte kurz- und langwellige Strahlung sowie der Bodenwärmefluss gemessen. Darüber hinaus wurden Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Niederschlag aufgezeichnet. Die Bestimmung der Bodenfeuchte ( $\theta$ ) erfolgte über TDR-Sonden, die an der Station EC1 in 5, 15, 30, 45 und 75 cm und an der Station EC6 in 5 und 15 cm Bodentiefe installiert wurden. Die Eddy-Kovarianz-Daten wurden mit Hilfe der Methode von Foken (2008) ausgewertet und zu Wochenmittelwerten aggregiert. Die meteorologischen Daten und die Bodenfeuchte wurden zu Tageswerten aggregiert. Eine detaillierte Beschreibung der Instrumentierung ist in Ingwersen et al. (2011) erschienen.

### *Gekoppelte Boden-Pflanze-Atmosphäre Systemmodelle*

Zur Simulation der Wasserflüsse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre verwenden wir das Modellsystem Expert-N. Expert-N umfasst mehrere Modelle zur Simulation des vertikalen Transports von Wasser, Stickstoff und Wärme und des Umsatzes des organischen Materials im Boden sowie des Wachstums von Pflanzen (Priesack, 2006). Durch die Aufteilung dieser Modelle in modulare Teilmodelle ermöglicht Expert-N den Austausch verschiedener Modellansätze zum gleichen Einzelprozess. Die in Expert-N integrierten Modelle umfassen sowohl veröffentlichte Modelle wie LEACHN 3.0 (Hutson und Wagenet 1992), SOILN (Johnsson et al. 1987), HYDRUS (Šimůnek et al., 2005), CERES-Wheat 2.0 (Ritchie 1988), SUCROS (Goudriaan und van Laar 1994) und GECROS (Yin und

Laar 2005), als auch Modelle, die vom Expert-N-Team selbst entwickelt wurden wie das Pflanzenwachstumsmodell SPASS (Wang 1997; Gayler et al. 2002). In dieser Studie kombinieren wir die vier Pflanzenmodelle SUCROS, CERES, SPASS und GECROS mit identischen Modulen zur Simulation der Bodenprozesse und der potentiellen Evapotranspiration. Bodenwasserflüsse werden durch eine HYDRUS-1D entsprechende Lösung der Richardsgleichung simuliert, Wärme- und Stickstofftransport im Boden gemäß LEACHN. Für die Umsetzungsprozesse des organischen Materials im Boden verwenden wir Module aus SOILN. Die Berechnung der Potentiellen Transpiration erfolgt nach Penman-Monteith unter Verwendung der Pflanzenfaktoren für Winterweizen (Allen 2000). Die vier Pflanzenmodelle unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Komplexität. Große Unterschiede bestehen vor allem in der Beschreibung der Bestandesphotosynthese, der Wurzeldynamik und der Wurzelwasseraufnahme (Priesack und Gayler, 2009). Die Modelle SPASS und GECROS zeichnen sich dabei durch eine höhere Anzahl betrachteter Teilprozesse und eine mechanistischere Beschreibung der simulierten Prozesse aus als die einfacheren Modelle SUCROS und CERES, die weniger Teilprozesse simulieren und in denen Prozesse häufiger durch empirische Gleichungen beschrieben werden.

### *2.3. Multikriterielle Modellkalibrierung*

Die Kalibrierung der Modelle erfolgt durch eine multikriterielle Optimierung unter Verwendung von drei Zielfunktionen (Summe der quadratischen Abweichungen), mittels derer die Abweichung zwischen Simulation und Messung von Bodenfeuchte (F1), LAI (F2) und ETA (F3) evaluiert werden. Wir verwenden AMALGAM (Vrugt und Robinson, 2007), um Kompromisse bei der simultanen Minimierung der verschiedenen Zielfunktionen zu analysieren. AMALGAM verwendet eine Multimethodensuche, um eine zuverlässige und recheneffiziente Lösung des multikriteriellen Optimierungsproblems zu gewährleisten (Wöhling et al., 2008). Die Startpopulation von 100 zufälligen Parameterkombinationen wird mit Hilfe einer Latin-Hypercube Stichprobe erzeugt. Wir beenden die Optimierungsläufe nach 100.000 Modellevaluierungen, wobei die Konvergenz zu einer stabilen Pareto-Oberfläche typischerweise bereits deutlich früher erreicht wird. Nach der Kalibrierung bewerten wir die Performance der Modelle mit Hilfe der Nash-Sutcliff-Effizienz (NSE), die bei optimaler Übereinstimmung von Simulation und Messung den Wert eins annimmt.

Für jeden Bodenhorizont schätzen wir fünf Parameter des van Genuchten-Mualem Modells: den Sättigungswassergehalt, die Formparameter der Wasserspannungskurve  $\alpha$  und  $n$ , die gesättigte Wasserleitfähigkeit und den Poren-Konnektivitätsparameter  $l$ . Zusätzlich beziehen wir vier Parameter der Pflanzenmodelle ein, die sich am sensitivsten bezüglich der Wurzelaktivität und der Blattflächenentwicklung herausgestellt haben. Bei den Modellen SPASS und CERES sind das die maximale Wurzelwachstumsrate, die spezifische Wurzellänge, die maximale Wurzelwasseraufnahmerate und das spezifische Blattgewicht. Bei SUCROS entfällt die maximale Wurzelwachstumsrate, da diese hier nicht über eine Input-Datei verändert werden kann. Im Falle von GECROS werden neben dem spezifischen Blattgewicht die kritische Wurzelgewichtsdichte, der minimale Blattstickstoff und die Steigung der Carboxylierungsrate gegenüber dem Blattstickstoffgehalt variiert.

## **3. Ergebnisse und Diskussion**

Aus jeder Simulation, die mit einer AMALGAM realisierten Modellparametrisierung durchgeführt wird, resultiert ein Punkt im dreidimensionalen Zielfunktionsraum. Die Pareto-Lösungen sind definiert als diejenigen Punkte, bei denen eine Verbesserung einer Zielfunktion nur auf Kosten einer anderen Zielfunktion möglich ist. Somit ergibt sich bei drei Zielfunktionen, wie in unserem Fall, eine dreidi-

mensionale Pareto-Fläche, deren Punkte alle Lösungen der multikriteriellen Optimierung sind. Welche dieser Lösungen als optimal im Sinne eines Kompromisses zwischen den einzelnen Zielfunktionen erachtet wird, hängt von der Gewichtung der Zielfunktionen ab. Paretoextreme sind diejenigen Lösungen, bei denen nur eine der Zielfunktionen berücksichtigt wurde, und die folglich die besten erreichbaren Kalibrierungen auf eine Zustandsgröße bei Vernachlässigung der anderen Zustandsgrößen darstellen. Abb. 1 zeigt am Beispiel des Standorts ‚EC1‘ für die vier Modelle die Projektion aller Modellrealisierungen in die F1-F3-Ebene. Die eher eckige Form der Pareto-Front für die Modelle SPASS und GECROS zeigt, dass hier ein geringerer Kompromiss zwischen den Zielfunktionen für Bodenfeuchte und Evapotranspiration einzugehen ist als bei den einfacheren Modellen SUCROS und CERES. Hier zeigt die flachere Form der Pareto-Front, dass keine Modellparametrisierungen existieren, die einen vergleichbar gute Anpassung an beide Zustandsgrößen erreichen.

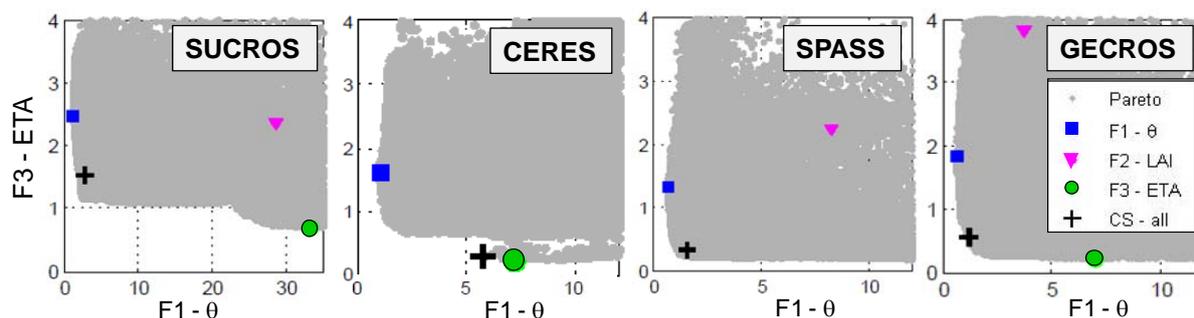


Abb. 1 : Projektion der Modellrealisierungen in die F1-F3-Ebene. Gefüllte Symbole bezeichnen den besten erreichbaren Fit zur jeweiligen Zielfunktion (Paretoextreme). Die Kompromisslösung, die bei gleicher Gewichtung aller drei Zielfunktionen erreicht wird, ist als schwarzes Kreuz dargestellt.

Werden die Modelle auf nur eine hin Zielgröße kalibriert, lassen sich an beiden Standorten die jeweiligen Zeitreihen mit hoher Genauigkeit reproduzieren (Tab. 1). Während sich am Standort EC6 kein Zusammenhang zwischen struktureller Modellkomplexität und den erzielten Einzellösungen erkennen lässt, ist dies am Standort EC1 zumindest für die Bodenfeuchte der Fall. Hier zeigt sich, dass sich die Dynamik und vertikale Verteilung der Bodenfeuchte mit SUCROS und CERES weniger gut simulieren lässt als mit den detaillierteren Modellen SPASS und GECROS. Auch bei der Simulation der aktuellen Evapotranspiration fällt das wenig detaillierte Modell SUCROS hinter die anderen Modelle zurück. Der Grund hierfür ist eine deutliche Überschätzung der Transpiration am Ende der Vegetationsperiode, die durch eine zu geringe Wurzelsensenz im Modell bedingt ist (Abb. 2).

Die Simulationen von Bodenfeuchte, LAI und ETA unter Verwendung der Kompromisslösung zwischen allen Zielfunktionen zeigen Abb.2 und 3. Zusammen mit den NSE-Werten in Tab. 1 ergibt sich an der Versuchsstation EC1 eine deutlich bessere Performance der komplexeren Modelle im Vergleich zu den einfacheren Modellen. Während SPASS und GECROS alle drei Zustandsgrößen simultan mit hoher Genauigkeit simulieren können, ist das mit CERES und SUCROS nicht möglich. Am Versuchsstandort EC6 liegen die Simulationsergebnisse deutlich näher beieinander, wobei alle Modelle bis auf GECROS höhere NSE-Werte erzielen als am Standort EC1. Dies ist durch die geringere Bodentiefe und die damit geringere Anzahl an Bodenfeuchtesensoren bedingt. Die beste Performance erzielt das Modell SPASS, das in keinem der Kriterien stark vom optimalen Fit abweicht. Die schlechte Reproduktion der Blattentwicklung durch das Modell GECROS bei gleichzeitig guter Wiedergabe der Bodenfeuchte und Evapotranspiration weist auf strukturelle Schwächen dieses Modells hin.

Tab. 1: Nash-Sutcliff-Effizienzen für die Kalibrierung der Modelle auf die einzelnen Kriterien F1, F2 bzw. F3 und für die Kompromisslösung an den Versuchsstandorten EC1 und EC6.

Modell	EC1						EC6					
	$\theta$		LAI		ETA		$\theta$		LAI		ETA	
	F1	Kompr.	F2	Kompr.	F3	Kompr.	F1	Kompr.	F2	Kompr.	F3	Kompr.
SUCROS	0.68	0.23	0.95	0.91	0.60	0.09	0.90	0.89	0.83	0.80	0.86	0.76
CERES	0.69	-0.69	0.96	0.88	0.88	0.83	0.93	0.83	0.89	0.78	0.94	0.85
SPASS	0.81	0.56	0.96	0.77	0.90	0.70	0.91	0.85	0.92	0.87	0.91	0.88
GECROS	0.82	0.65	0.96	0.84	0.87	0.67	0.91	0.86	0.93	0.35	0.84	0.77

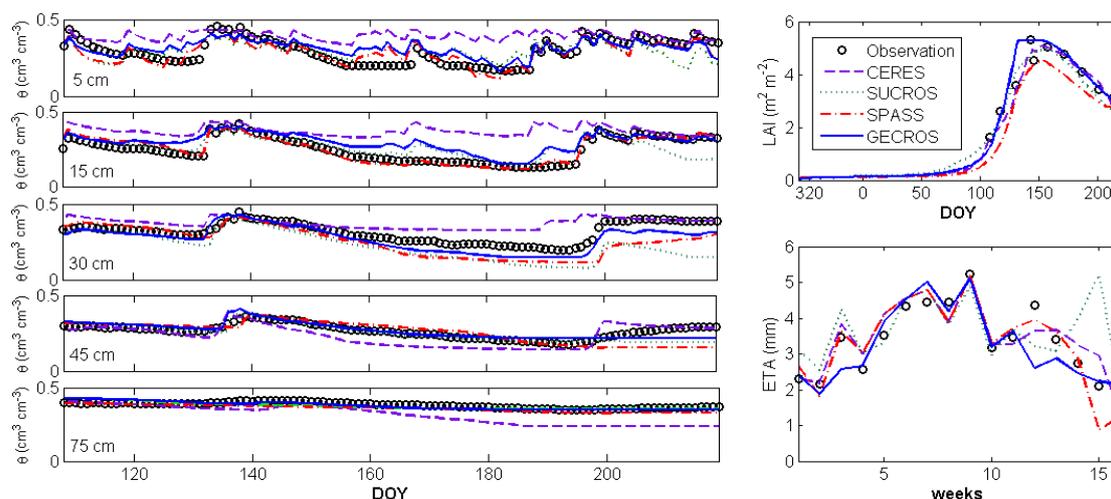


Abb. 2: Simulation von Bodenfeuchte, Blattflächenentwicklung und Evapotranspiration am Standort EC1 unter Verwendung der Kompromisslösung zwischen allen Zielfunktionen

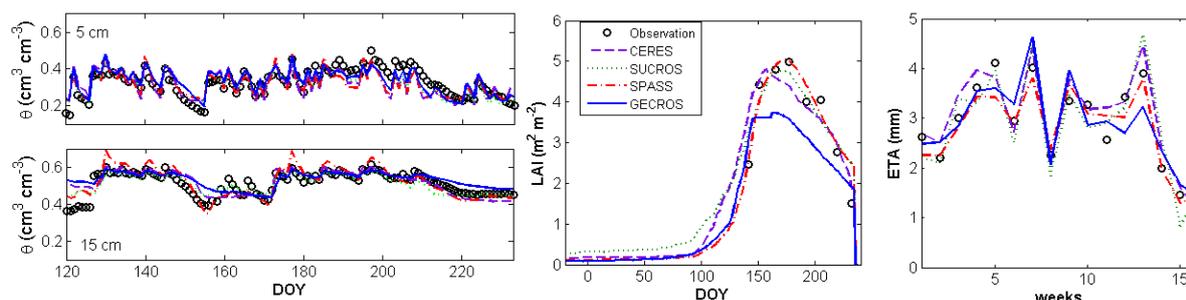


Abb. 3: Simulation von Bodenfeuchte, Blattflächenentwicklung und Evapotranspiration am Standort EC6 unter Verwendung der Kompromisslösung zwischen allen Zielfunktionen .

## Schlussfolgerung

Mit Hilfe der multikriteriellen Modellkalibrierung können bei allen Modellen Parametrisierungen gefunden werden, die zu guter Übereinstimmung mit den einzelnen Zustandsgrößen führen. Allerdings müssen für die simultane Simulation von Bodenfeuchte, LAI und Evapotranspiration Kompromisse bei der Parametrisierung eingegangen werden. Diese Kompromisse können bei Verwendung eher einfacher Modelle wie SUCROS und CERES sehr groß sein. Dies hat zur Folge, dass es in oftmals nicht

möglichsein wird, durch Kalibrierung eines gekoppelten Modells auf eine gemessene Zustandsgröße nicht gemessene Komponenten des ökohydrologischen Systems abzuschätzen. Die Kompromisse lassen sich jedoch verkleinern, wenn mechanistische Beschreibungen des Pflanzenwachstums verwendet werden, selbst wenn die Zahl der angepassten Parameter gleich bleibt. Die deutlich unterschiedliche Performance der einfacheren Modelle SUCROS und CERES gegenüber den mechanistischeren Modellen SPASS und GECROS, die sich am Standort EC1 zeigt, verringert sich am Standort EC6, der durch eine geringere Bodentiefe gekennzeichnet ist.

## Literatur

- Allen, R.G. (2000): Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology* 229, 27–41.
- Foken, T.T. (2008): The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* 18, 1351–1367.
- Gayler, S., E. Wang, E. Priesack, T. Schaaf und F.-X. Maidl (2002): Modeling biomass growth, N-Uptake and phenological development of potato crop. *Geoderma* 105, 367–383.
- van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Goudriaan, J., H.H. van Laar (1994): Modelling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Hutson, J.L. and Wagenet, R.J. (1992): LEACHM Version 3.0. Cornell University. *Research Series* 93, (3).
- Ingwersen, J., K. Steffens, P. Högy, K. Warrach-Sagi, D. Zhunusbayeva, M. Poltoradnev, R. Gäbler, H.-D. Wizemann, A. Fangmeier, V. Wulfmeyer und T. Streck (2011): Comparison of Noah simulations with eddy covariance and soil water measurements at a winter wheat stand. *Agric. For. Met.*, 151, 345–355.
- Johnsson, H., Bergström, L., P.E. Jansson und K. Paustian (1987): Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agric. Ecosys. Environ.* 18, 333–356.
- Priesack, E. (2006): Expert-N Dokumentation der Modell-Bibliothek. *FAM Bericht* 60. Hieronymus, München.
- Priesack, E. und S. Gayler (2009): Agricultural Crop Models: Concepts of Resource Acquisition and Assimilate Partitioning. U.E. Lüttge et al. (eds.), *Progress in Botany* 70, 195, Springer Berlin, Germany.
- Ritchie, J.T., D.C. Godwin und S. Otter-Nacke (1988): CERES-Wheat. A simulation model of wheat growth and development. University of Texas Press, P.O. Box 7819, Austin, Texas, USA.
- Šimůnek, J., M.Th. van Genuchten und M. Šejna (2005): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0, Dep. of Env. Sci., University of California Riverside, Riverside, CA, 92521, USA.
- Vrugt, J.A. und B.A. Robinson (2007): Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multi-method search. *Proc. of the Nat. Academy of Sci. of the United States of America (PNAS)*, 104, 708–711.
- Wang, E. (1997): Development of a Generic Process-Oriented Model for Simulation of Crop Growth. München, Herbert Utz Verlag Wissenschaft. 195 pp.
- Wöhling, Th., G.F. Barkle und J.A. Vrugt (2008): Comparison of three multiobjective optimization algorithms for inverse modeling of vadose zone hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. of America J.*, 72, 305–319.
- Yin, X. und H.H. van Laar (2005): Crop Systems Dynamics: An ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions. Wageningen, Wageningen Academic Publishers. 155 pp.

# **Sensitivität der Abflussprozesse kleiner alpiner Einzugsgebiete auf Klimaänderungen**

Gertraud Meißl<sup>1</sup>, Klaus Klebinder<sup>2</sup>, Clemens Geitner<sup>1</sup>, Friedrich Schöberl<sup>1</sup>, Bernhard Kohl<sup>2</sup>,  
Gerhard Markart<sup>2</sup>, Herbert Formayer<sup>3</sup>, Theresa Gorgas<sup>3</sup> und Axel Bronstert<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Österreich

<sup>2</sup> Bundesforschungszentrum für Wald, Innsbruck, Österreich

<sup>3</sup> Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich

<sup>4</sup> Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Der vorliegende Beitrag stellt das Konzept und erste Ergebnisse des Projekts SeRAC-CC (Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change) vor. Forschungsobjekt sind kleine alpine Einzugsgebiete, deren Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse sehr stark von der a) kleinräumigen und b) zeitlichen Variabilität der Gebieteigenschaften gesteuert wird (ad a: geologischer Untergrund, Relief, Boden, Vegetation/Landnutzung; ad b: aktueller Systemzustand, z.B. Hydrophobizität der organischen Auflage, Verdichtung, Bodenvorfeuchte, Bodenfrost, Schneedecke). Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss der Änderungen von Temperatur- und Niederschlagsbedingungen auf den Systemzustand und damit auf die resultierende Abflussreaktion und deren Jährlichkeit zu beurteilen. Erkenntnisse aus dem Projekt bieten Grundlagen für zukünftige Anpassungsstrategien an Klimaänderungen sowie für konkrete Maßnahmen im Bereich der Risikoprävention.

Da Klimaprojektionen für kleine Einzugsgebiete mit großen Unsicherheiten behaftet sind, wird eine zweistufige Vorgangsweise gewählt: Im ersten Schritt wird mit Hilfe eines kontinuierlichen hydrologischen Modells abgeschätzt, wie saisonale Systemzustandsmuster zukünftig aussehen können. Im zweiten Schritt werden durch sequenzielle Variation der Modelleingangsdaten innerhalb realistischer Bandbreiten kritische Kombinationen von Niederschlagsereignissen und Systemzuständen identifiziert, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten auf Basis regionaler Klimamodelle abgeschätzt werden sollen. Erste Ergebnisse der begleitenden, zur Plausibilisierung verwendeten Berechnungsversuche mit einer Starkregenanlage zeigen, dass Vorniederschläge den Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen deutlich erhöhen können. Unter welchen Bedingungen (Niederschlagsmenge und Zeitabstand des Vorregens) und mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Effekt auftritt, wird noch näher untersucht.

## **Einleitung**

Hochwässer und/oder Murgänge aus kleinen alpinen Einzugsgebieten stellen eine Bedrohung für Siedlungen, die sich häufig am Talausgang auf den Schwemmkegeln befinden, dar. Problematisch ist insbesondere die geringe Vorwarnzeit im Ereignisfall, bedingt durch die kurze Zeitspanne zwischen dem Niederschlagsereignis und dem Eintreffen der Hochwasserwelle.

Die Abflussreaktion kleiner alpiner Einzugsgebiete (< 10 km<sup>2</sup>) auf Niederschlagsereignisse hängt vor allem von drei Einflussfaktoren ab:

- (a) den Niederschlagseigenschaften (Regendauer und -intensität, räumliche Ausdehnung der Regenzelle, Schneefallgrenze),
- (b) der naturräumlichen Ausstattung (geologischer Untergrund, Relief, Boden, Vegetation/Landnutzung) und
- (c) dem aktuellen Systemzustand der Einzugsgebietsteilflächen (z.B. Hydrophobizität der organischen Auflage, Bodenverdichtung, Bodenvorfeuchte, Bodenfrost, Schneedecke),

wobei die dritte Faktorengruppe in unterschiedlichen Zeitskalen (episodisch, periodisch/saisonal, langfristig) betrachtet werden muss. Ihr Einfluss und ihre Variabilität werden in dem vom österreichischen Klima- und Energiefonds (ACRP-Programm) geförderten Projekt SeRAC-CC (Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change) untersucht. Ziel ist es, den Einfluss von Änderungen der Temperatur- und Niederschlagsbedingungen auf den Systemzustand und damit auf die resultierende Abflussreaktion kleiner alpiner Einzugsgebiete zu beurteilen. Dazu sollen kritische Kombinationen von Niederschlagseigenschaften und Systemzuständen identifiziert und ihre zukünftigen Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden. Die Projektergebnisse werden auch die Identifizierung verschiedener Abflussreaktionsmuster in Abhängigkeit von Höhenlage sowie Niederschlagsregime und Klimaprojektionen für die drei ausgewählten Testgebiete umfassen. Weiters soll eine Beurteilung der Eignung regionaler Klimamodelle zur Reproduktion von Starkregenereignissen in kleinen alpinen Einzugsgebieten erfolgen. Der vorliegende Beitrag stellt das Projektkonzept und erste Ergebnisse aus den Feldmessungen vor.

## Vorgangsweise und Methoden

Die Forschungsfrage wird am Beispiel von drei kleinen Einzugsgebieten unterschiedlicher Höhenlage und abweichender Niederschlagsregime bearbeitet (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Charakteristika der Untersuchungsgebiete, Klima- und Abflussdaten: Hydrographischer Dienst des Landes Tirol (HD Tirol), Landeswasserbauamt Vorarlberg (LWB Vbg.)

	Ruggbachtal	Brixenbachtal	Längental
Einzugsgebietsgröße	6,6 km <sup>2</sup>	9,3 km <sup>2</sup>	9,2 km <sup>2</sup>
Höhenlage	400 – 1100 m	880 – 2000 m	1900 – 3000 m
Gemeinde, Bundesland	Eichenberg, Vorarlberg, Österreich	Brixen im Thale, Tirol, Österreich	Silz, Tirol, Österreich
Topographische Lage	Alpennordrand (Bregenzer Wald)	Nördlich des Alpenhauptkamms	Am Alpenhauptkamm
Geologische Zone	Molassezone	Grauwackenzone	Zentralalpen
Jahresniederschlags-summe	1600 mm	1400 mm	1200 mm
Pegel seit (Betreiber)	1967 (LWB Vbg.)	2004 (HD Tirol)	1981 (TIWAG)
Größtes gemessenes Abflussereignis	65 m <sup>3</sup> /s 18.7.1974	4,5 m <sup>3</sup> /s 27.8.2005	7,0 m <sup>3</sup> /s 23.8.2005

Während die Höhenlage vom Ruggbachtal zum Längental zunimmt, sinkt die Jahresniederschlags-summe von der Nordstaulage Richtung Alpenhauptkamm. Die Einzugsgebiete sind mit Abflussmessstationen ausgestattet und hinsichtlich ihrer naturräumlichen Ausstattung und Landnutzung repräsentativ für andere Täler der jeweiligen Region.

Klimaprojektionen für kleine alpine Einzugsgebiete sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Aufgrund des Windeinflusses zeigen Niederschlagsmessungen in den Höhenlagen oft große Messfehler.

Häufig werden Starkniederschläge aus lokalen konvektiven Zellen, die in kleinen alpinen Einzugsgebieten meist die größten Abflüsse erzeugen, aufgrund von fehlenden Messstationen oder Messausfällen gar nicht oder nur fehlerhaft aufgezeichnet. Niederschlagsprojektionen auf Basis dieser Messdaten haben daher nur begrenzten Wert. Deshalb wird für das Projekt SeRAC-CC eine mehrstufige Vorgehensweise gewählt, bei der die Niederschlagsmesswerte erst in die abschließende Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten einfließen:

Im ersten Schritt werden hydrologische Modelle für die drei Untersuchungsgebiete mit Hilfe von Niederschlags-/Abflussmessreihen kalibriert. Dazu wird einerseits ein auch für kontinuierliche Simulationen geeignetes Niederschlags-Abfluss-Modell (HQSIm – Kleindienst, 1996, Achleitner et al., 2011 bzw. WaSiM-ETH – Gurtz et al., 2003) verwendet, andererseits das Ereignismodell ZEMOKOST, das sich bei der Ermittlung von Bemessungsereignissen in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten bewährt hat (Kohl, 2011). Die Parametrisierung der Modelle wird durch Feldmessungen, insbesondere Starkregensimulationen auf charakteristischen Boden-/Vegetationseinheiten bei unterschiedlichen Systemzuständen unterstützt bzw. plausibilisiert. Im zweiten Schritt werden die kontinuierlichen Modelldurchläufe mit Hilfe von fehlerkorrigierten Klimamodellszenarien angetrieben. Die Modellergebnisse sollen zeigen, wie saisonale Systemzustandsmuster zukünftig aussehen können.

Darauf aufbauend werden die Eingangsdaten (Niederschlagsereignisse, flächige Parameter) der hydrologischen Modelle sequenziell innerhalb realistischer Bandbreiten variiert und nachfolgend kritische Kombinationen von Systemzuständen und Niederschlagsszenarien identifiziert. Ihre zukünftige Eintrittswahrscheinlichkeit wird auf Basis von Ensembles regionaler Klimamodelle abgeschätzt und dient als direktes Maß für die erwarteten Veränderungen der Magnitude-Frequenz-Beziehungen von Hochwässern.

Das Projekt SeRAC-CC wurde am 1.2.2011 gestartet und wird mit 31.12.2013 abgeschlossen. Nach ersten Feldmessungen im Sommer 2011 werden derzeit die hydrologischen Modelle kalibriert und die Klimamodellszenarien erarbeitet.

## **Erste Ergebnisse und Diskussion**

Zur Beurteilung der Abflussreaktion charakteristischer Boden-/Vegetationseinheiten werden Starkregensimulationen bei unterschiedlichen Systemzuständen durchgeführt. Dabei wird eine Fläche in der Größe von 40 bis 100 m<sup>2</sup> (die Flächengröße ist abhängig von der Flächen- und Wasserverfügbarkeit) mit einer Intensität von ca. 100 mm/h eine Stunde lang beregnet, was einem Niederschlagsereignis mit einer Jährlichkeit von ca. 100 Jahren entspricht. Neben singulären Beregnungsexperimenten bei unterschiedlichen Systemzuständen werden an ausgewählten Standorten mehrere Versuche in Folge durchgeführt. Dadurch sollte die Feuchte in den obersten Bodenhorizonten auf ein Niveau nahe der Sättigung erhöht und somit ein definierter Ausgangszustand am Beregnungsstandort erzeugt werden.

Am Beispiel einer Weidefläche (Rechentalalm im Brixenbachtal) wird gezeigt, dass der Oberflächenabfluss bei konvektiven Niederschlagsereignissen infolge veränderter Vorfeuchte deutlich variieren kann. Am Standort Rechentalalm liegt eine karbonatfreie, skelettreiche, haftnässe-pseudovergleyte Braunerde aus silikatischem Hangschutt vor (Abb. 1 ganz links). Die Vegetation besteht aus Weiderasen, der zum Teil von horstartigem Borstgras (*Nardus stricta*) gebildet wird. Die Fläche weist einige Trittschäden auf und ist mit Farnen und aufkommenden Grünerlen durchsetzt. Der Standort wird extensiv beweidet, die Verdichtung des Oberbodens (Weidestausohle) ist erkennbar. Mit Hilfe von Infiltrationsversuchen mit dem Tracer Brillantblau konnte nachgewiesen werden, dass die Beschaffenheit der organischen Auflage (Wurzelfilz) wesentlichen Einfluss darauf hat, wo das Niederschlagswasser

in den Boden eindringen kann (Abb. 1). Der Zwischenabfluss erfolgt dann großteils entlang präferentieller Fließwege.

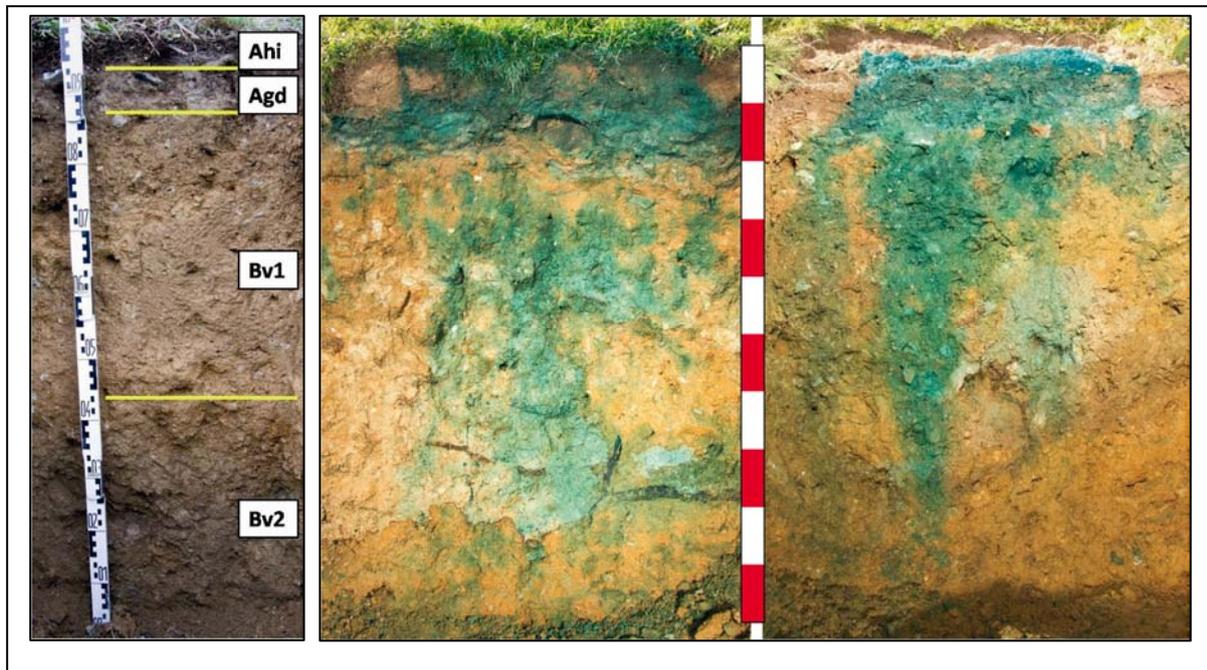


Abb. 1: Bodenprofil am Standort Rechenalalm/Brixenbachtal (links) und Ergebnisse der Infiltrationsversuche mit Brillantblau, Mitte: mit organischer Auflage, rechts: ohne organische Auflage.

Am Standort Rechenalalm wurden drei Starkregensimulationen durchgeführt. Der erste Versuch fand am 6. Juli 2011 bei trockenen Verhältnissen (mehrere trockene und warme Vortage, trockenes Frühjahr, schneearmer Winter) statt. Der zweite Versuch wurde 20 Tage später am 26. Juli 2011 durchgeführt, mit geringen Niederschlagsmengen in den Vortagen. Am selben Tag erfolgte eine dritte Beregnung. Zu diesem Zeitpunkt waren insgesamt 244 mm Vorniederschlag mit der Starkregenanlage aufgebracht worden (2. Beregnungsversuch sowie Zwischenberegnung, danach 30minütige Regenpause). Der Oberflächenabfluss nahm dabei vom ersten zum dritten Versuch deutlich zu. Begleitende Bodenfeuchtemessungen mit TDR-Sonden in mehreren Tiefenstufen zeigten, dass das Niveau der Ausgangsbodenfeuchte beim ersten Versuch am niedrigsten und daher die Differenz zur maximalen, während des Versuchs erreichten Bodenfeuchte am größten war (Abb. 2). Bei der dritten Simulation blieb die Bodenfeuchte zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende konstant, der verfügbare Porenraum des Oberbodens (bis ca. 20 cm Bodentiefe) war durch die extrem hohe Vorniederschlagssumme offensichtlich vollständig gefüllt.

Die Ergebnisse der beschriebenen und weiterer Starkregensimulationen legen den Schluss nahe, dass der beobachtete Effekt eines erhöhten Oberflächenabflusses durch das Niveau der Ausgangsfeuchte bzw. des verfügbaren Porenvolumens erklärt werden kann. Diskutiert werden zudem die Hypothesen, dass Verschlammung von Makroporen oder andere Veränderungen der Bodenstruktur während der Regenpausen Auswirkungen auf die Infiltrations- und Versickerungseigenschaften und damit auf die Abflusscharakteristik haben. Die Laboranalyse der entnommenen Bodenproben, weitere Beregnungsversuche und die Auswertung gemessener natürlicher Abflussereignisse sollen helfen herauszufinden, welche Vorniederschlagsmengen, -intensitäten und zeitliche Verteilungen erhöhten Oberflächenabfluss bedingen können.

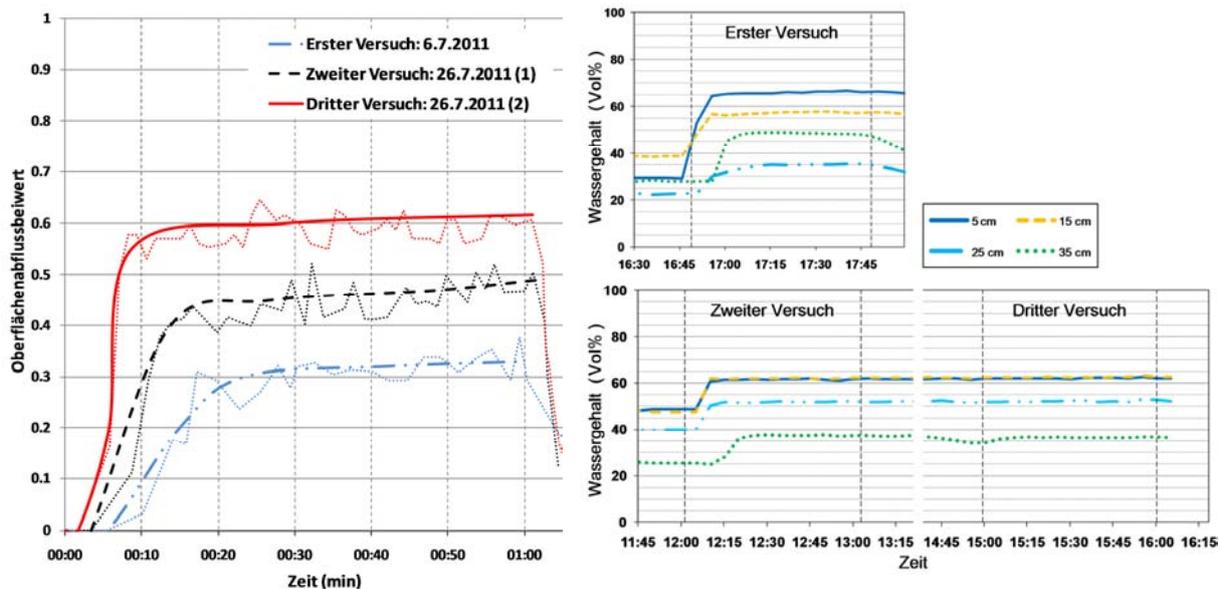


Abb. 2: links: Oberflächenabfluss bei drei Starkregensimulationen auf einem Versuchsplot auf der Rechentalalm/Brixenbachtal, rechts: Bodenfeuchteverlauf während der Starkregensimulationen (gestrichelte vertikale Linien markieren den Beregnungszeitraum. Durch den Neueinbau der TDR-Sonden am 2. Versuchstag war ihre Position gegenüber dem 1. Versuchstag geringfügig verändert).

## Schlussfolgerung und Ausblick

Die bisher im Rahmen von SeRAC-CC durchgeführten Felduntersuchungen und -messungen helfen abzuschätzen, welche Systemzustände unter aktuellen Bedingungen zu hohen Abflussspitzen führen können. Die drei Untersuchungsgebiete zeigen dabei erwartungsgemäß deutliche Unterschiede:

- Vorniederschläge: Die beschriebene Zunahme des Oberflächenabflusses nach vorangegangenen Niederschlägen konnte für das Ruggbach- und Brixenbachtal belegt werden. Ähnliche Beobachtungen wurden auch von anderen Autoren gemacht (z.B. Merz und Blöschl, 2009). Im Gegensatz dazu ist das Längental durch ausgedehnte Hangschutthalden gekennzeichnet, die unterhalb der Felswände liegen und großteils bis zum Talgrund reichen. Sie dämpfen den auf den Felswänden entstehenden raschen Abfluss und weisen ein sehr großes Speichervolumen auf. Vorangegangene flüssige Niederschläge haben daher kaum Auswirkungen auf die Abflussreaktion (Geitner et al., 2009).
- Schneebedeckung: Aufgrund der großen Höhenlage des Längentals dauert das Abschmelzen der winterlichen Schneedecke bis in den Sommer. Auch sommerliche Niederschläge können in fester Form fallen und eine Schneedecke aufbauen. Trifft ein Starkregenereignis auf eine großflächig isotherme Schneedecke, kann durch die plötzlich eingeleitete Schneeschmelze ein großes Abflussvolumen bereitgestellt werden.
- Landnutzung: Saisonale Unterschiede in der Bodenverdichtung spielen unter aktuellen Verhältnissen insbesondere im Brixenbachtal aufgrund der großflächigen Weidegebiete eine Rolle. Mit zunehmender Beweidungsdauer nimmt die Lagerungsdichte des Oberbodens im Sommerhalbjahr zu. Im Winterhalbjahr wird der Oberboden durch Frost-/Tauzyklen wieder aufgelockert (Markart et al., 1997). Einen ähnlichen, aber schwächeren Einfluss hat die maschinelle

Bewirtschaftung der Mähwiesen im Ruggbachtal. Der Einfluss der Landnutzung auf die Abflussreaktion des Längentals ist unbedeutend, da es nur sehr extensiv beweidet wird.

- d) Bodenfrost: Ihm wird unter aktuellen Bedingungen in keinem der drei Untersuchungsgebiete hochwassersteuernde Bedeutung zugemessen, da ein zeitliches Zusammentreffen von konvektiven Starkregen mit gefrorenem, nicht schneebedecktem Boden extrem unwahrscheinlich ist.

Inwiefern Klimaänderungen in Zukunft zu einer Verschiebung, Ausweitung oder Einengung der Bandbreiten der möglichen Einzugsgebietszustände führen können, wird im Rahmen des vorgestellten Projekts noch untersucht. Es ist in jedem Fall davon auszugehen, dass diesbezügliche Modifikationen – neben Änderungen der Niederschlagseigenschaften (Häufigkeit, jahreszeitliche Verteilung, Intensität) – einen erheblichen Einfluss auf die Magnitude-Frequenz-Beziehung von Hochwässern und Murreignissen in kleinen Einzugsgebieten haben werden.

## Dank

Die Autoren danken René Schader für die Durchführung und fotografische Aufbereitung der Färbeversuche. Dem österreichischen Klima- und Energiefonds danken wir für die Projektförderung im Rahmen des ACRP-Programms.

## Literatur

- Achleitner, S., J. Schöberl, M. Rinderer, G. Leonhardt, F. Schöberl, R. Kirnbauer und H. Schönlaub (2011): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology* 412-413, 90 – 100.
- Geitner, C., M. Mergili, J. Lammel, A. Moran, C. Oberparleiter, G. Meißl und H. Stötter (2009): Modelling peak runoff in small Alpine catchments based on area properties and system status. In: Veulliet, E., J. Stötter & H. Weck-Hannemann [Hrsg.]: Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments. Springer, Heidelberg, New York, pp. 103-134.
- Gurtz, J., M. Zappa, K. Jasper, H. Lang, M. Verbunt, A. Badoux und T. Vitvar (2003): A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrological Processes* 17, 297 – 311.
- Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität München.
- Kohl, B. (2011): Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation, Universität Innsbruck.
- Markart, G., Kohl, B. und Zanetti, P. (1997): Oberflächenabfluss bei Starkregen – Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchtflächen, (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesa – Bürserberg, Vorarlberg). *Cblt. ges. Forstwesen* 114, 2/3, 123-144.
- Merz, R. und G. Blöschl (2009): A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. *Water Resources Research* 45, W01405, doi: 10.1029/2008WR007163

# **Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen Simulation potenziell naturnaher Zustände im urbanen Einzugsgebiet**

Georg Johann und Hans-Gerd Frings

Emschergenossenschaft, Essen, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Abflussverhältnisse sind im Emschergebiet durch eine hohe Besiedlungsdichte geprägt. Bei der modelltechnischen Abbildung des potenziell naturnahen Zustands soll die versiegelte Fläche durch die vorhandene nicht versiegelte Nutzung im Umfeld der Versiegelung ersetzt werden. Im Emschergebiet gibt es aber diese unversiegelte übertragungsfähige Fläche nicht. So stellt sich die Frage, welche Flächennutzungs- und Bodenparameter gewählt werden sollen und welche Auswirkungen diese auf das simulierte Abflussregime haben. Mit einem Beispiel am Schwarzbach, ein Nebenlauf der Emscher, wird gezeigt, dass vor allem die modelltechnische Wahl der Bodenparameter und weniger die Wahl der Flächennutzung sich auf die Hochwasser-Abflussbildung auswirken.

## **Einleitung**

Die Emschergenossenschaft ist als regionaler Träger der Wasserwirtschaft für ein 865 km<sup>2</sup> großes Gebiet von Duisburg bis Dortmund mit einer Einwohnerdichte von 2.700 Einwohnern/km<sup>2</sup> zuständig. Die Emschergenossenschaft gestaltet im derzeit europaweit größtem Wasserwirtschaftsprojekt seine Gewässer naturnah um (rd. 350 km; Investition: 4,5 Mrd. €). Dabei entstehen rund 200 Einleitungen aus dem Kanalsystem des dicht besiedelten Ballungsraumes in die ökologisch verbesserten Gewässer. Diese Einleitungen müssen gewässerverträglich gestaltet werden. Es können somit Kompensationsmaßnahmen notwendig werden, die den urbanen Einfluss auf das hydrologische Abflussregime mindern.

In den BWK Merkblättern M3 (BWK, 2001) und M7 (BWK, 2007) werden dazu immissionsorientierte Anforderungen an Misch- und Niederschlagseinleitungen aufgeführt. Um hydrologische Nachweisgrößen für die Dimensionierung von Kompensationsmaßnahmen zu ermitteln, wird das Abflussregime des bestehenden, anthropogen überprägten Zustandes, mit dem eines potenziell naturnahen Zustandes verglichen. Aus diesem Vergleich sollen dann Regenrückhaltebecken dimensioniert werden.

Der potenziell naturnahe Zustand wird aus dem bestehenden Zustand erzeugt, in dem die versiegelten Flächen im Einzugsgebiet durch vorhandene nicht versiegelte Nutzungen im Umfeld der Versiegelung ersetzt werden. Im Emscher-Einzugsgebiet ist jedoch in weiten Teilen keine übertragungsfähige unversiegelte Nutzung vorhanden. Unter diesen Voraussetzungen stellt sich die Frage, wie der potenziell naturnahe Zustand definiert werden soll. Diese Frage ist insofern von Bedeutung, als dass die bestimmenden abflussbildenden Prozesse nicht mehr auf der versiegelten Oberfläche stattfinden, sondern ausschließlich durch die Bodenparameter und die Flächennutzung bestimmt werden. Welches potenziell naturnahe Szenario soll unter diesen Voraussetzungen herangezogen werden? Und welchen Einfluss hat das gewählte Szenario auf das Abflussregime und damit auf die Dimensionierung der Kom-

pensationsmaßnahmen? Dieser Beitrag beleuchtet dieses Spannungsfeld am Beispiel eines Nebenlaufes der Emscher, dem Schwarzbach, und zeigt Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen Modellierung (Programm NASIM) auf.

## Gebietscharakteristik und Abflussgenese des Schwarzbachs

Das rd. 47 km<sup>2</sup> große Schwarzbachgebiet liegt im ehemals sumpfigen Emscherbruch und hat einen versiegelten Flächenanteil von rd. 30 %. Es hat von Natur aus geringes Gefälle und ist vom Steinkohlebergbau, mit massiven Bodensenkungen bis zu 25 m, geprägt. Durch die Begradigung und Eindeichung des Schwarzbachs inkl. seiner Nebenläufe und ihren Ausbau als offene Schmutzwasserkanäle sowie die Polderung der Bergsenkungsmulden konnten die Grundfunktionalitäten eines technisch geprägten Wasserkreislaufes wiederhergestellt werden. Die Abbildung 1 zeigt das Einzugsgebiet und beispielhaft Abflussganglinien des Pegels und des Niederschlag-Abflussmodells. Das Modell kann das Abflussgeschehen am Pegel gut abbilden.

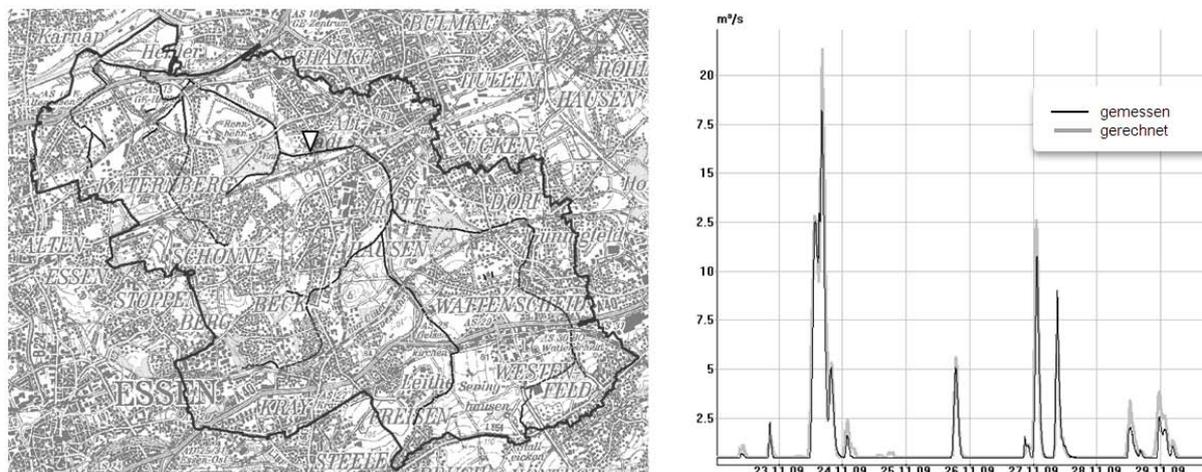


Abb. 1: Einzugsgebiet des Schwarzbachs und Modellkalibrierung

Aufgrund des relativ hohen Versiegelungsanteils fließt mit 40 % vom gefallenem Niederschlag verhältnismäßig viel Wasser aus dem Einzugsgebiet ab und lediglich 60 % stehen zur Verdunstung zur Verfügung. Vom abfließenden Wasser hat der Basisabfluss einen Anteil von 29 %, Oberflächenabfluss und Interflow zusammen machen einen Anteil von 16 % aus. Der größte Abflussanteil kommt mit 55 % von den versiegelten Flächen, obwohl diese nur einen Flächenanteil von 30 % haben. Das  $H_{Q1}$  für den Istzustand liegt bei 660 l/s km<sup>2</sup>.

## Möglichkeiten der modelltechnischen Abbildung des potenziell naturnahen Zustandes

Für die naturnahe Umgestaltung des Schwarzbachsystems muss ein potenziell naturnaher Zustand definiert werden, um planungsrelevante Daten bereitzustellen. Dazu muss eine naturnahe Flächennutzung definiert werden. Doch welche ist das? Um die Wirkung der Flächennutzung auf das Abflussregime zu ermitteln, werden hier beispielhaft zwei Szenarien betrachtet: eine vom Menschen nicht geprägte Landschaft (100 % Wald) und eine extensiv genutzte Agrarlandschaft (70 % Grasland & 30 % Wald).

Bei der Berechnung der Abflussbildung spielen neben der Wahl der Flächennutzung vor allem die Böden eine Rolle. Jedoch können die Modellparameter der im potenziell naturnahen Zustand abflusswirksamen Böden nur schwer kalibriert werden. Im Istzustand kommt der wesentliche Teil, der zur Abflussbildung beiträgt, von den versiegelten Flächen.

Um die Spannweite der Bodenparameterwahl zu ermitteln, werden Böden mit hoher und geringer Durchlässigkeit in die Szenarienbetrachtung mit einbezogen. Im Niederschlag-Abfluss-Modell bestehen zahlreiche Möglichkeiten mit Kalibrierungsfaktoren die Bodenparameter zu beeinflussen (Johann, 2009). In diesem Beispiel soll lediglich der Boden-Eichfaktor betrachtet werden, der die höchste Sensitivität bei der Niederschlag-Abfluss-Simulation mit dem Programm NASIM auf die Abflussbildung aufweist. Mit dem Eichparameter „vertikale Leitfähigkeit“ wird vor allem der Interflow- und Basisabfluss-Anteil am Abflussgeschehen beeinflusst. Wird die vertikale Leitfähigkeit klein gewählt, so wird die aus der digitalen Bodenkarte ermittelte Durchlässigkeit reduziert, und es entsteht mehr Interflow und weniger Basisabfluss. Wird die vertikale Leitfähigkeit groß gewählt, erhält der Boden eine höhere Durchlässigkeit und es entsteht weniger Interflow und mehr Basisabfluss.

Um die Auswirkungen der Darstellungsmöglichkeiten des potenziell naturnahen Zustandes auf die Wasserbilanz und das Abflussregime zu ermitteln, werden folgende Szenarien gegenübergestellt:

- Szenario 1: 100 % Wald; Böden mit hoher Durchlässigkeit
- Szenario 2: 100 % Wald; Böden mit geringer Durchlässigkeit
- Szenario 3: 70 % Grasland und 30 % Wald; Böden mit hoher Durchlässigkeit
- Szenario 4: 70 % Grasland und 30 % Wald; Böden mit geringer Durchlässigkeit

### **Auswirkungen der Szenarien-Wahl des potenziell naturnahen Zustandes auf die Wasserbilanz und das Abflussregime**

Für die Betrachtung der Szenarien-Wahl wurde eine Langfristsimulation von 20 Jahren von 1990 bis 2010 im 5-Minuten Zeitschritt durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Wahl des potenziell naturnahen Zustandes deutliche Auswirkungen auf die Wasserbilanz und das Abflussregime hat. Die Abbildung 2 zeigt die Wasserbilanz- und Abflussanteile aus der o.g. Langfristsimulation.

In den in Abbildung 2 aufgeführten potenziell naturnahen Zuständen kommen rd. 20 % weniger Wasser als im Istzustand zum Abfluss. Die Verdunstung ist mit 74 % (Szenario 3) bis 81 % (Szenario 2) ungewöhnlich hoch. Dies ist vor allem auf die Bergsenkungen zurückzuführen, die in dem von Natur aus flachen Gebiet Mulden geschaffen haben, in denen das Wasser nicht mehr zum Gewässer abfließen kann. Hier führen also anthropogene Einflüsse zu einer Abfluss-Reduktion im potenziell naturnahen Zustand.

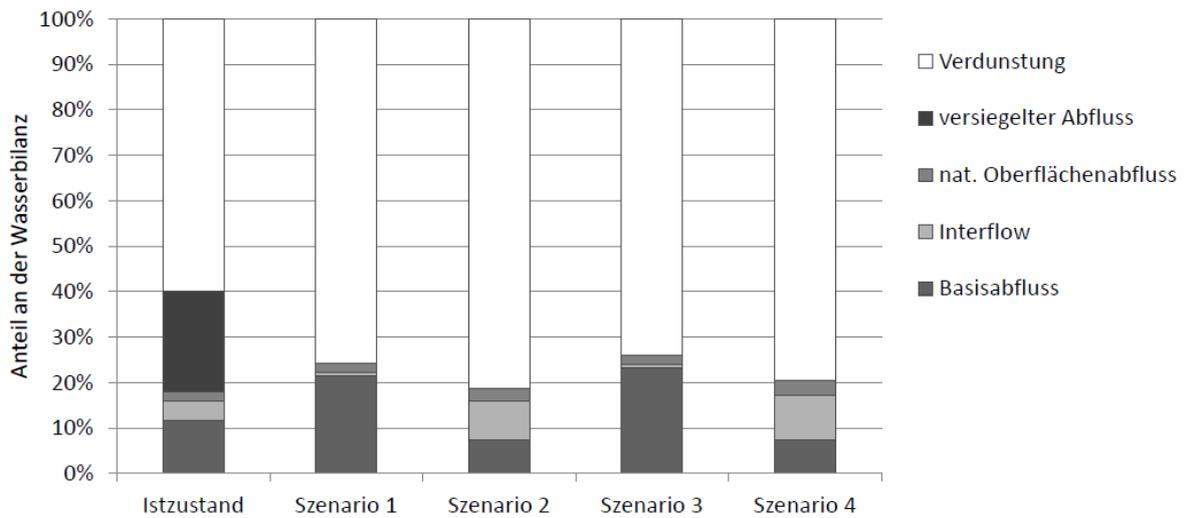


Abb. 2: Wasserbilanz- und Abflussanteile Schwarzbach für den Istzustand und Szenarien von potenziell naturnahe Zustände

Weiterhin ist aus Abbildung 2 ersichtlich, dass die Szenarien 1 und 3 bzw. die Szenarien 2 und 4 eine vergleichbare Charakteristik aufweisen. Bei gering durchlässigen Böden spielt der Interflow bei der Abflussbildung die wesentliche Rolle (Szenarien 2 und 4). Bei den Böden mit hoher Durchlässigkeit hingegen spielt der Basisabfluss bei der Abflussbildung die wesentliche Rolle (Szenarien 1 und 3). Die Flächennutzung hat demnach einen deutlich kleineren Einfluss auf die Abflussbildung als die Bodenparameter. Dies wird auch durch die Abbildung 3 deutlich, die die partielle Serie der diskutierten Szenarien zeigt.

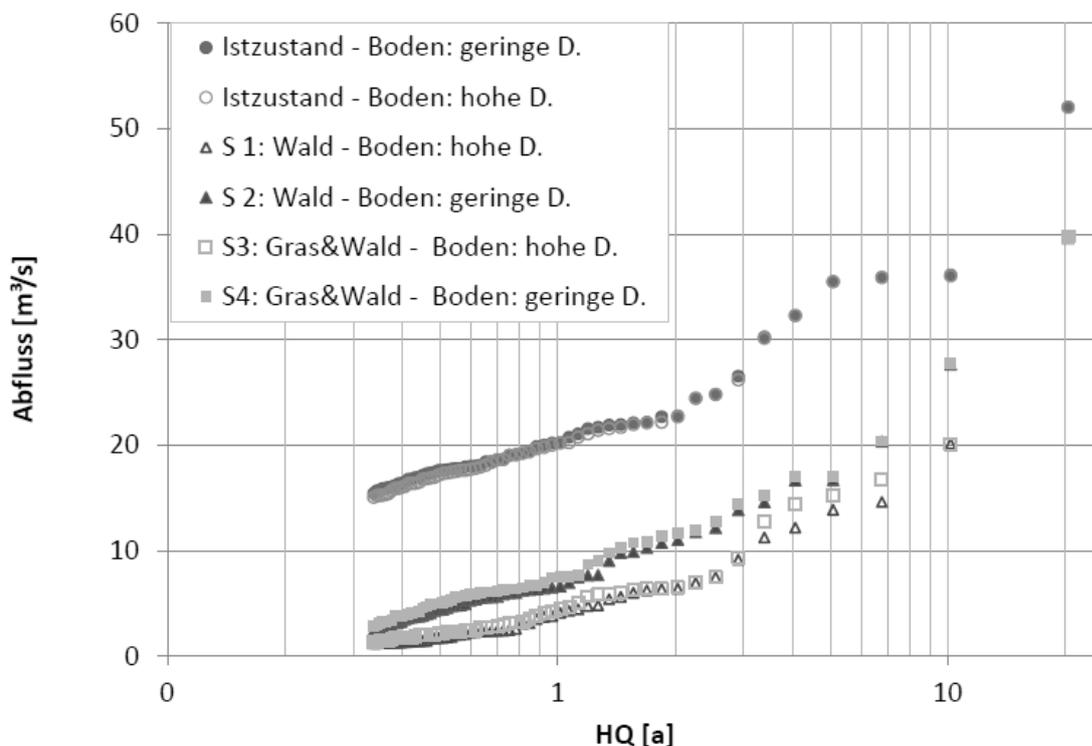


Abb. 3: Partielle Serie für den Schwarzbach am Pegel (Einzugsgebietsgröße 30,6 km<sup>2</sup>) für den Istzustand und Szenarien des potentiell naturnahen Zustands

Die Abbildung 3 zeigt, dass im potenziell naturnahen Zustand die Bodenparameter für die Größe der Hochwasserscheitel bestimmend sind. Der Einfluss der Flächennutzung führt lediglich zu kleineren Abweichungen. Ab dem  $HQ_{10}$  ist kein Einfluss der Flächennutzung mehr nachweisbar.

Tab. 1: Abweichungen bei  $HQ_1$  für Szenarien des potenziell naturnahen Zustands

Abweichung $HQ_1$ durch Einfluss der Bodendurchlässigkeit	
Flächennutzung: 100 % Wald	39 %
Flächennutzung: 70 % Grasland & 30 % Wald	40 %
Abweichung $HQ_1$ durch Einfluss der Flächennutzung:	
Böden mit hoher Durchlässigkeit	9 %
Böden mit geringerer Durchlässigkeit	10 %

In Tabelle 1 sind Abweichungen bei  $HQ_1$  für die Szenarien des potenziell naturnahen Zustands aufgelistet. Der Unterschied bei  $HQ_1$  durch die Variation der Flächennutzung liegt bei rd. 10 %. Durch die Variation der Bodendurchlässigkeit ergibt sich eine Abweichung bei  $HQ_1$  von rd. 40 %. Im Istzustand liegt die Abweichung bei  $HQ_1$  durch den Einfluss der Bodendurchlässigkeit bei lediglich rd. 0,2 %. Durch diesen Vergleich wird deutlich, dass der im Istzustand nicht sensitive Parameter der Bodendurchlässigkeit im potenziell naturnahen Zustand den bestimmenden Einflussfaktor darstellt.

In Tabelle 2 sind die Abflusssspenden bei  $Hq_1$  für die Szenarien des potenziell naturnahen Zustandes aufgelistet.

Tab. 2: Abflusssspenden  $Hq_1$  für Szenarien des potenziell naturnahen Zustandes (am Pegel-Einzugsgebietsgröße = 30,6 km<sup>2</sup>)

Szenario	Flächennutzung	Bodenparameter	$Hq_1$ [l / s km <sup>2</sup> ]
1	100 % Wald	hohe Durchlässigkeit	133.3
2	100 % Wald	geringe Durchlässigkeit	217.4
3	70 % Grasland & 30 % Wald	hohe Durchlässigkeit	146.3
4	70 % Grasland & 30 % Wald	geringe Durchlässigkeit	244.7

## Fazit

Aus den im vorherigen Kapitel dargelegten Simulationsergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Flächennutzung im potenziell natürlichen Zustand hat einen wesentlich kleineren Einfluss auf das Abflussregime als die Bodendurchlässigkeit.
- Die Kalibrierparameter der Bodendurchlässigkeit sind im Istzustand nicht sensitiv, bestimmen aber im potenziell natürlichen Zustand erheblich das Abflussgeschehen.

Aus diesen Punkten wird ersichtlich, dass Eichparameter, die eine hohe Bodendurchlässigkeit erzeugen, im potenziell natürlichen Zustand zu zu geringen Abflussspenden führen. Deshalb ist bei der Parameterschätzung besonders auf die Bodenparameter zu achten, die bei der Kalibrierung des Istzustandes aufgrund des hohen Versiegelungsgrades noch eine untergeordnete Rolle spielen. Zu durchlässig kalibrierte Böden, die sich bei der Kalibrierung des Hochwasserabflusses nicht negativ auswirken, führen bei der Abbildung des potenziell naturnahen Zustandes zu unplausibel kleinen Abflüssen. Die Bodenparameter sollten deshalb aus der Bodenkarte übernommen werden. Die vertikale Leitfähigkeit sollte nicht zu groß gewählt werden, da diese zu einer Überschätzung des Basisabflusses führen würde.

## **Literatur**

- BWK (2001): Merkblatt 3/BWK - Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse.
- BWK (2007): Merkblatt 7/BWK - Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK - Merkblatt 3.
- Johann, G. (2009): Softwareeinsatz zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen in der Praxis. Bundesanstalt für Gewässerkunde - Veranstaltungen 9/2009

# Ökohydrologische Untersuchungen hochfrequenter Wachstumsreaktionen der Waldbäume auf die Bodenfeuchtedynamik im Nationalpark Eifel

Burkhard Neuwirth<sup>1,3</sup>, Heye Bogena<sup>2</sup>, Stefanie Johann<sup>1</sup>, Andreas Lücke<sup>2</sup> und Bernd Dieckkrüger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arbeitsgruppe Hydrologie, Geographisches Institut, Universität Bonn, Deutschland

<sup>2</sup> Forschungszentrum Jülich, IBG-3 Agrosphäre, Jülich, Deutschland

<sup>3</sup> DeLaWi Jahrringanalytik, Dr. Burkhard Neuwirth, Windeck, Deutschland

Pflanzen sind das entscheidende Bindeglied zwischen den Prozessen im Boden und in der Atmosphäre. Rückkopplungen zwischen den Sphären müssen daher die Reaktion der Biosphäre auf Wasserdargebot und Klima auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen berücksichtigen, um die Prozesse zu verstehen und dieses Verständnis für Prognosen nutzen zu können. Das Baumwachstum temperierter Wälder der Mittelbreiten ist durch ein komplexes Wechselspiel biotischer und abiotischer Faktoren geprägt. Auf interannuellen Zeitskalen kann die Variabilität des Baumwachstums näherungsweise über einen Trockenheitsindex (Palmer Drought Severity Index), den Niederschlag und den atmosphärischen Wasserdampfgehalt beschrieben werden (Friedrichs et al. 2009). Dieser Ansatz reicht jedoch nicht, um Rückkopplungen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre und somit die kleinräumige Variabilität der Wachstumsschwankungen zu erklären.

Der SFB-TR 32 untersucht seit 2007 Muster und Strukturen im Interaktionsbereich von Boden, Vegetation und Atmosphäre vor dem Hintergrund sich wandelnder Klima- und Nutzungsbedingungen sowohl in Wald- als auch in Acker- und Grünlandsystemen. Im Teilprojekt C1, dessen Ziel die Analyse der raum-zeitlichen Variabilitäten von Einzugsgebietseigenschaften und deren Auswirkungen auf Wasser-, Lösungs- und CO<sub>2</sub>-Flüsse von der Mikro- zur Mesoskala ist, werden an ausgesuchten Baumgruppen (Buche, Douglasie, Fichte, Stiel- und Traubeneiche) die wechselseitigen Austauschprozesse zwischen den Sphären durch zeitlich hoch aufgelöste Messungen untersucht. An Dendro-Hydro-Climate-Stationen, kurz DHC-Stationen, werden in 30-Minuten Intervallen radiale Zuwachsschwankungen, interzelluläre Saftflüsse der Bäume, in drei Bodenhorizonten Temperaturen und Wassergehalte, im Wurzelhorizont Matrixpotentiale sowie Temperaturen und relative Luftfeuchten im Bestand erfasst und mit lokalen Klima- und Umweltdaten kombiniert.

Im Rahmen einer 2009 durchgeführten Pilotstudie im oberen Einzugsgebiet des Wüstebaches im SW des Nationalparks Eifel wurde dieses Projektdesign in zwei Fichtenstandorten ebenso getestet wie die Aufbereitung der Daten. Die Auswahl der beiden in räumlicher Nähe (200m Horizontal- und 10 m Vertikaldistanz) gelegenen Pilotstandorte erfolgte nach bodenhydrologischen Aspekten und differenziert sie in einen vom Stau- und Grundwasser beeinflussten Tals- und einen nicht vom Stau- und Grundwasser beeinflussten Hangstandort (Bogena et al. 2010).

Der Fokus der Datenaufbereitung liegt auf der Herleitung von repräsentativen Tageswerten aus den in 30-minütigen Intervallen erhobenen Messwerten der verschiedenen Sphären. Für die Klima- (Temperatur und Luftfeuchte) und Bodenparameter (Bodenfeuchte der Horizonte) wurden dazu neben den Mittelwerten aus den halbstündigen Werten die Minima und Maxima sowie die daraus resultierende Tagesspannweiten abgeleitet. Für den interzellulären Saftfluss wurde analog verfahren und zusätzlich der tägliche Gesamtbedarf als Summe ermittelt. Diese Standardaufbereitung reicht für die Zuwachsraten des Radialwachstums nicht aus, da diese sich im Tagesgang aus zwei Komponenten

zusammensetzen – den aus der kambialen Aktivität resultierenden realen Zuwachsraten und den Schwellungs- und Schrumpfraten in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Holzes. Letzterer reversibler Prozess ist nun durch die Datenaufbereitung vom irreversiblen zellteilungsbedingten Wachstumsprozess zu trennen. In Anlehnung an die Arbeiten von Deslaurier et al. (2011) wird der Zuwachsrückgang vom nächtlichen Maximum bis zum morgendlichen Minimum als Schrumpfungsphase (P1), der anschließende radiale Zuwachsgewinn bis zum folgenden Maximum als Schwellungsphase (P2) definiert. Der auf Zellteilung basierende irreversible Zuwachsbetrag wird als Differenz zweier Tagesmaxima berechnet, wenn ein Maximum an einem der Folgetage überschritten wird und – in Ergänzung zu Deslaurier et al. (2011) anteilmäßig auf die Zahl der verstrichenen Tage umgerechnet.

Die Auswertungen der Abhängigkeiten der Wachstumsparameter von den Umweltparametern erfolgten auf Grundlage linearer Einfachkorrelationen, wobei die untersuchten Tage der Vegetationsperiode 2009 in vier Gruppen klassifiziert wurden. Wegen der unterschiedlichen kambialen Aktivitätsraten während der Bildungsphase von Früh- und Spätholz wurden jahreszeitlich die Frühlings- und die Hochsommermonate separat betrachtet und zusätzlich in Regentage mit einem Mindestniederschlag von 5mm pro Tag und Trockentage differenziert. Als Sonnentag wurde ein niederschlagsfreier Tag ausgewiesen, wenn zuvor bereits mindestens 48 Stunden kein Niederschlag gefallen war. Nach Auslesen der meteorologischen Daten verblieben in jeder Gruppe 8 Tage als Berechnungsbasis.

Die Analysen liefern hoch signifikante Zusammenhänge der in den Bäumen erhobenen Parameter zu den Klimaparametern. Insbesondere die Abhängigkeit der radialen Stammveränderungen zur relativen Luftfeuchte zeigt den engen Zusammenhang zur Transpirationsleistung. Erst bei differenzierterer Betrachtung der radialen Änderungen an feuchten und trockenen Tagen zeigt sich eine modifizierende Wirkung der Bodenfeuchte. So resultiert, dass unter feuchten Standortbedingungen die Stammänderungen hauptsächlich durch die reversiblen Prozesse Quellung und Schrumpfung innerhalb des Xylems, des Holzkörpers, geprägt sind, was an einem entgegengesetzten Signal in den Abhängigkeiten von Schrumpfungs- und Schwellungsphase zum Bodenfeuchtegehalt zu erkennen ist. Diese Zusammenhänge zeigen sich am Hangstandort mit seinen reduzierten Bodenfeuchteverhältnissen nicht. Zusammenfassend sprechen die ersten Befunde für einen modifizierenden Einfluss der bodenhydrologischen Bedingungen auf das komplexe System der Klima/Wachstums-Beziehungen der temperierten Wälder. Deren physiologische Verifizierung ist ebenso wie die Übertragung auf andere Baumarten und Standorttypen durch weitergehende Messungen und Analysen zu verifizieren.

## **Literatur**

- Bogena, H.R., Herbst, M., Huismann, J.A., Rosenbaum, U., Weuthen, A. & H. Vereecken (2010): Potential of wireless sensor network for measuring soil water content variability. *Vadose Zone Journal* 9:1002-1013.
- Deslaurier, A., Rossi, S., Turcotte, A., Morin, H. & C. Krause (2011): A three-step procedure in SAS to analyze the time series from automatic dendrometers. *Dendrochronologia* 29:151-161.
- Friedrichs, D.A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. & J. Löffler (2009): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees – Structure and Function* 23: 729-739.

# **Prozessorientierte Rekonstruktion von Winterniederschlägen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für die hydrologische Modellierung von nivo-pluvialen Einzugsgebieten**

Kristian Förster und Günter Meon

Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Leichtweiß-Institut für Wasserbau,  
Technische Universität Braunschweig, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Anwendung hydrologischer Modelle stößt insbesondere dann an Grenzen, wenn meteorologische Randbedingungen des Einzugsgebiets nicht im erforderlichen Umfang bereitgestellt werden können bzw. gar nicht erhoben worden sind. Regionale Klimamodelle ermöglichen die Simulation atmosphärischer Prozesse auch in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung von Analysedaten im globalen Maßstab bei gleichzeitiger Berücksichtigung lokaler Einflüsse des Gebietes (dynamisches Downscaling). In der vorliegenden Untersuchung wurden mit dem nichthydrostatischen atmosphärischen Modell WRF meteorologische Felder eines Winters in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung für ein 45 km<sup>2</sup> großes nivo-pluviales Einzugsgebiet abgeleitet. Diese wurden mit Beobachtungen verglichen und als Randbedingungen für das hydrologische Modell PANTA RHEI vorgegeben. Die Beobachtungen des Standardmessnetzes konnten mit WRF bei geeigneter Parametrisierung sehr gut rekonstruiert werden. Die simulierte Abflusszeitreihe der darauf aufbauenden hydrologischen Modellierung zeigt ebenfalls gute Übereinstimmungen mit Beobachtungen.

## **Einleitung**

In den letzten Jahren wurden im Zuge der technischen Weiterentwicklung von Computern zunehmend Modellkopplungen atmosphärischer und hydrologischer Modelle erprobt, um hochaufgelöste meteorologische Felder abzuleiten (siehe z.B. Kunstmann und Stadler, 2005). Hydrologische Modellanwendungen können darüber hinaus auch zur Bewertung von meteorologischen Simulationen verwendet werden (Pappenberger et al., 2008).

In dem vorliegenden Beitrag soll untersucht werden, inwieweit verschiedene Prozessbeschreibungen beim dynamischen Downscaling für die hydrologische Modellierung von kleinen Einzugsgebieten im Winter anwendbar sind. Für die Niederschlagsbildung ist insbesondere die Parametrisierung der Wolkenmikrophysik von Interesse (Liu et al., 2011). Zunächst werden die verwendeten Modelle und Daten beschrieben. Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die simulierten Zeitreihen von Niederschlag, Temperatur und Abfluss mit Beobachtungen verglichen und bewertet.

## **Dynamisches Downscaling und Wolkenmikrophysik**

Für das dynamische Downscaling wurde das frei verfügbare Weather Research and Forecast (WRF) Modell mit dem nichthydrostatischen dynamischen Kern ARW (Advanced Research WRF, Version

3.2.1, UCAR, 2012) verwendet. Die Dynamik wird durch Integration der kompressiblen, nichthydrostatischen Euler-Gleichungen mit geländefolgenden Koordinaten modelliert (Skamarock et al., 2008). Viele der für die Niederschlagsbildung relevanten Prozesse können nicht vom Modell explizit aufgelöst werden, da diese zum Teil auf der Skala von Hydrometeoren ablaufen. Abb. 1 zeigt am Beispiel des Ansatzes nach Lin et al. (1983) die für die Parametrisierung der Wolkenmikrophysik notwendigen Prozesse.

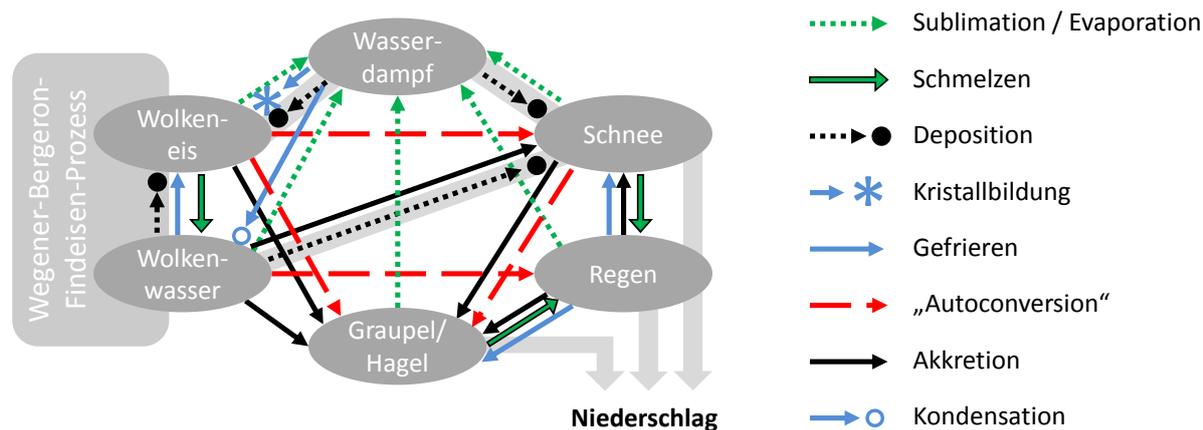


Abb. 1: Prozesse, welche bei der Parametrisierung der Wolkenmikrophysik berücksichtigt werden (verändert nach Lin et al., 1983 und Stensrud, 2007).

Tab. 1: Untersuchte Parametrisierungen der Wolkenmikrophysik mit Auflistung der prognostischen Gleichungen (Q = Mischungsverhältnis, N = Anzahlkonzentration) für jede Hydrometeorklasse.

Ansatz	Wasser	Eis	Regen	Schnee	Graupel	Hagel
Lin et al. (1983)	Q	Q	Q	Q	Q	
WSM6 (Hong und Lim, 2006)	Q	Q	Q	Q	Q	
Thompson et al. (2004)	Q	Q, N	Q, N	Q	Q	
Milbrandt und Yau (2005)	Q, N	Q, N	Q, N	Q, N	Q, N	Q, N
Morrison et al. (2005)	Q	Q, N	Q, N	Q, N	Q, N	
WDM5 (Lim und Hong, 2010)	Q, N	Q	Q, N	Q		
WDM6 (Lim und Hong, 2010)	Q, N	Q	Q, N	Q	Q	

Eine weitere Herausforderung bei der Beschreibung von Prozessen der Niederschlagsbildung sind Annahmen hinsichtlich der Größenverteilung verschiedener Hydrometeore. Die i.A. beobachtete starke Zunahme von Partikeln mit abnehmendem Durchmesser kann mit analytischen Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Für jede Hydrometeorklasse wird eine separate Verteilung angenommen (z.B. Gammaverteilung), deren Parameter prognostisch oder diagnostisch ermittelt werden können. Werden neben den prognostischen Gleichungen für das Mischungsverhältnis (in g Wasser / kg Luft) auch die der Anzahlkonzentration (pro Volumen Luft) gelöst, wird der Freiheitsgrad bei der Bestimmung der Hydrometeorspektren vergrößert (Morrison et al., 2005), was eine realistischere Abbildung der Prozesse ermöglicht (Stensrud, 2007). Die hier untersuchten Parametrisierungen sind in Tab. 1 zusammengestellt.

## **Eingangsdaten**

Für das dynamische Downscaling wird der Analysedatensatz „NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses“ (ds083.2), welcher auf einem Raster von  $1^\circ \times 1^\circ$  mit einer Zeitschrittweite von sechs Stunden vorliegt, als Start- und Randbedingungen vorgegeben. Die Daten wurden im Zeitraum vom 01.11.2005 bis 01.05.2006 aufbereitet.

## **Das hydrologische Modell PANTA RHEI**

PANTA RHEI ist ein deterministisches hydrologisches Modell (Riedel et al., 2011), welches am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig entwickelt wurde. Zurzeit wird das Modell für Bemessungsaufgaben, die Abflussvorhersage im Hochwasservorhersagezentrum des NLWKN in Niedersachsen, in internationalen Projekten sowie Klimaimpaktstudien eingesetzt. Es handelt sich um ein vektorbasiertes Modell mit GIS-Schnittstelle. Bauwerke wie Talsperren, Retentionsräume, Düker oder Verzweigungen können durch Vorgabe hydraulischer Kennlinien im Modell berücksichtigt werden. Die Prozessbeschreibung kann der Aufgabenstellung entsprechend ausgewählt werden.

Die Schneeschmelze wird in dieser Untersuchung mit dem Modell nach Anderson (1973) berechnet, welches den Kälteinhalt der Schneedecke simuliert und für ‚Regen-auf-Schnee-Ereignisse‘ einen vereinfachten Energiebilanzansatz bereitstellt. Komplexere Berechnungsansätze werden derzeit implementiert. Die Verdunstung wird mit dem Penman-Monteith-Ansatz berechnet, die Abflussbildung mit dem nach Riedel (2004) modifizierten SCS-Verfahren. Die Abflusskonzentration und der Wellenablauf werden durch Speicheransätze abgebildet.

Das Modell kann mit Tages- oder wie in dieser Untersuchung mit Stundenschrittweite betrieben werden. Meteorologische Daten können neben der üblichen Eingabe über Zeitreihen an einzelnen Punkten auch als Rasterdatensätze für jeden Zeitschritt vorgegeben werden. Diese Option erlaubt eine effektive Verwendung von Daten aus Wetter- und Klimamodellen.

## **Das Untersuchungsgebiet und Simulation der meteorologischen Felder**

In dieser Studie werden die Schneeakkumulation, die Schneeschmelze und die damit verbundenen Frühjahrshochwasserereignisse im Mittelgebirgseinzugsgebiet der Sieber im Harz bis zum Pegel Pionierbrücke näher untersucht. Das Einzugsgebiet ist  $45 \text{ km}^2$  groß, der höchste Punkt des fast vollständig bewaldeten Einzugsgebietes liegt auf 927 m. Die Konzentrationszeit beträgt etwa 5 h. Teile des Oberharzer Wasserregals (ein Jahrhunderte altes, mittlerweile zum UNESCO-Weltkulturerbe erklärtes System von Teichen und Überleitungsgräben für den Bergbau) beeinflussen den natürlichen Wasserhaushalt. Abb. 2B zeigt die Teilflächen und das Gewässernetz einschließlich der künstlichen Gräben, wie sie im Modell PANTA RHEI berücksichtigt werden.

Die meteorologischen Felder (Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit) mit Stundenauflösung, welche dem hydrologischen Modell als Randbedingungen bereitgestellt werden, sind mit dem Modell WRF mit dem in Abb. 2A gezeigten Modellgebiet simuliert worden. Das Gitter wurde von  $30 \text{ km}$  über  $10 \text{ km}$  und  $3,3 \text{ km}$  auf schließlich  $1,1 \text{ km}$  in Nest 4 verfeinert. Der Verfeinerung des Gitters entsprechend, wurde der Zeitschritt von  $150 \text{ s}$  auf  $5,6 \text{ s}$  reduziert.

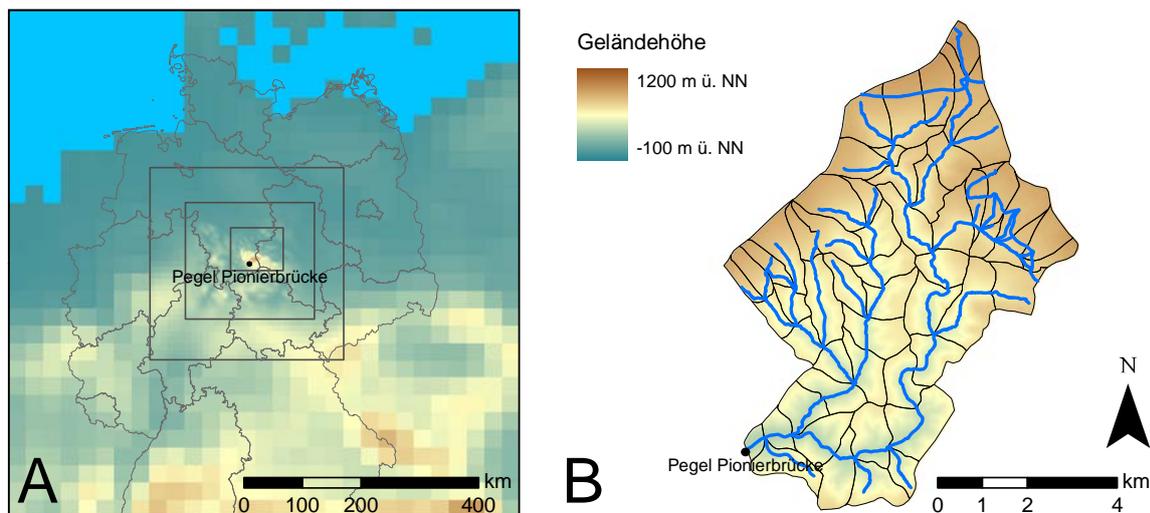


Abb. 2: (A) atmosphärisches Modell WRF mit sukzessiver Gitterverfeinerung durch 4 Nester. (B) Die Sieber im Modell PANTA RHEI mit Gewässernetz einschl. künstlicher Gräben mit Überleitungen.

## Ergebnisse

Neben dem Niederschlag ist insbesondere die Temperatur für die hydrologische Modellierung im Winterhalbjahr von Interesse. In Abb. 3 sind beispielhaft die an der Station Clausthal im Winter 2005/06 beobachteten Temperaturen sowie die von WRF im nächstgelegenen Gitterpunkt modellierten Temperaturen gegenübergestellt (Bias  $-0,6$  K, RMSE  $2,0$  K, Korrelation  $0,93$ ). Die insgesamt gute Übereinstimmung der Temperaturen konnte bei allen Parametrisierungen ermittelt werden.

Abb. 4 enthält die Summenlinien des Niederschlags der Rechenläufe. Diese ergeben sich aus dem arithmetischen Gebietsmittel von 24 Stationen bzw. Gitterpunkten im Harz. Während ein Teil der Rechenläufe (Thompson, Morrison, Milbrandt) relativ gute Übereinstimmungen mit der Beobachtung liefert, zeigen die übrigen Läufe eine deutliche Überschätzung (Lin, WDM5, WSM6, WDM6). Diese Unterteilung ist auch in Form der statistischen Kenngrößen in Abb. 5 erkennbar. Die erstgenannten Läufe geben die Standardabweichung der Beobachtung von  $1,5$  mm/6h gut wieder. Der um den mittleren Fehler korrigierte RMSE der Rechenläufe (konzentrische, grün-gestrichelte Linien) schwankt zwischen  $1,25$  und  $1,75$  mm/6h. Die beste Korrelation mit der Beobachtung von fast  $0,7$  liefert der WDM6-Lauf. Allerdings überschätzt dieser den Niederschlag um ca.  $52\%$  - trotz möglicher systematischer Fehler in der Beobachtung („undercatch“) - zu stark (Abb. 4). Liu et al. (2011) stellen in ihrer Untersuchung übereinstimmend eine gute Rekonstruktion von Winterniederschlägen mit den Parametrisierungen nach Thompson und Morrison im Colorado-Gebiet fest. Mit WDM6 wurden ebenfalls zu hohe Niederschlagssummen simuliert.

Unter Verwendung des hydrologischen Modells konnte mit dem Morrison-Lauf die beste Modelleffizienz von  $E = 0,87$  erzielt werden (Abb. 6). Zum Vergleich sind in Abb. 6 auch die Niederschläge der Station Sieber enthalten. Das Regen-auf-Schnee-Ereignis wird zeitlich gut abgebildet, wobei der Scheitel des Hochwasserereignisses unterschätzt wird. Der Thompson-Lauf mit  $E = 0,62$ , welcher nach der Niederschlagsauswertung am besten ist, fällt hinter den Milbrandt-Lauf mit  $E = 0,83$ . Die übrigen Läufe mit den hohen Niederschlagssummen, wie z.B. WDM6, führen im Rahmen der hydrologischen Modellierung zu schlechten Anpassungen mit negativen Werten der Modelleffizienz.

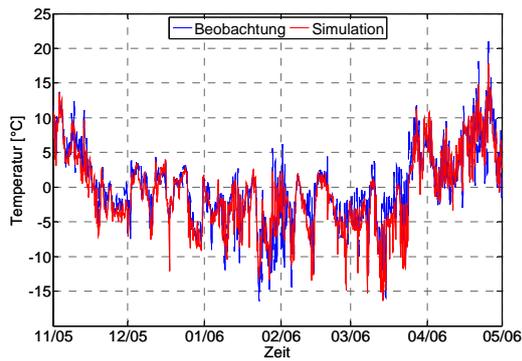


Abb. 3: Beobachtete und vom Modell berechnete Stundenwerte der Temperatur an der nahegelegenen Station Clausthal (561 m ü. NN).

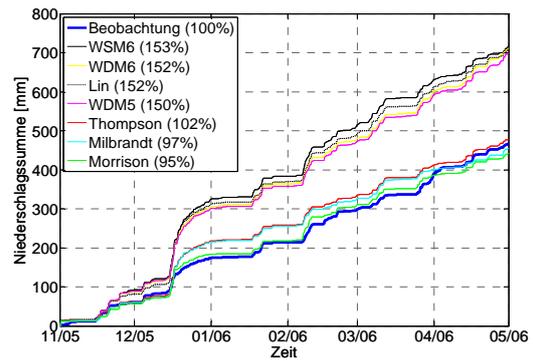


Abb. 4: Vergleich der Niederschlagszeitreihen (Gebietsmittel) verschiedener Rechenläufe als Summenlinie.

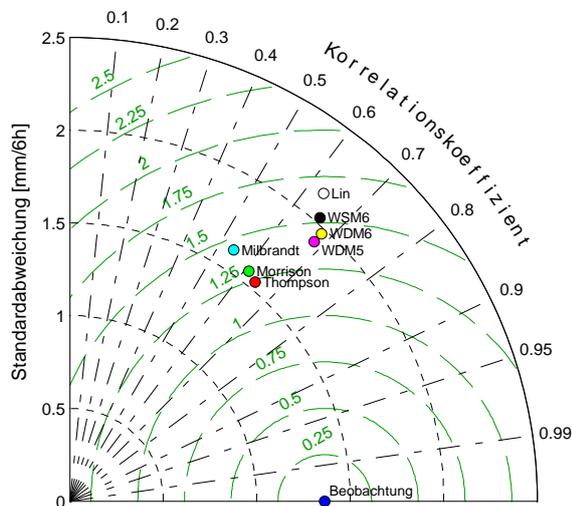


Abb. 5: Statistische Auswertung der 6h-Gebietsniederschläge in einem Taylor-Diagramm.

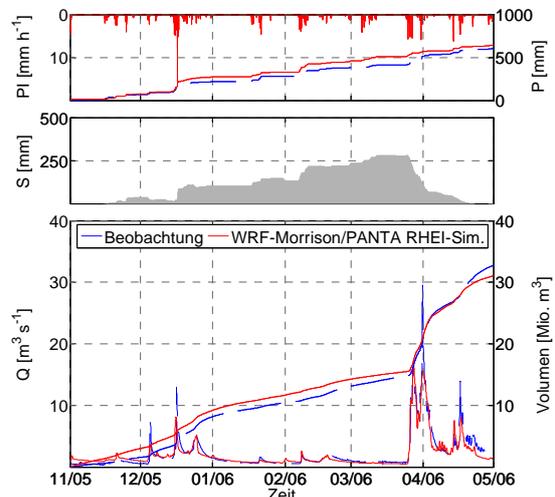


Abb. 6: Hydrologische Simulation mit Niederschlagsintensität (PI) und Niederschlagssumme (P), Schneespeicher (S), Abfluss (Q).

## Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Modellkombination aus einem regionalen atmosphärischen Modell und einem hydrologischen Modell brauchbare Ergebnisse erzielt werden können. Die Auswahl der Parametrisierung der Wolkenmikrophysik hat einen erheblichen Einfluss auf die simulierten Niederschläge und damit auch auf die hydrologische Modellierung. Es ist zu untersuchen, ob die relativ guten Ergebnisse der Thompson-, Morrison- und Milbrandt-Parametrisierungen möglicherweise in der zusätzlichen prognostischen Gleichung für die Anzahlkonzentration für Wolkeneis begründet liegen. Diese Gleichung fehlt bei den übrigen Läufen mit den hohen Niederschlagssummen und RMSE-Werten. Neben den Parametrisierungen und den Eingangsdaten gibt es weitere Unsicherheiten in atmosphärischen Modellen, die zum Beispiel mit der Lage der lateralen Randbedingungen oder mit Verwendung von großen Gittern mit einem großen Anteil von Ozeanflächen in Verbindung stehen können. Daher sollten weitere Sensitivitätsstudien auch diese Unsicherheiten berücksichtigen.

## Danksagung

Die Analysedaten stammen vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) und sind online verfügbar unter der Adresse <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.

## Literatur

- Anderson, E. A. (1973): National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model. In: NOAA (Hrsg.), NOAA Technical Memorandum. National Weather Service, Silver Spring, MD.
- Hong, S.-Y. und J.-O. J. Lim (2006): The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.* 42 (2), 129–151.
- Kunstmann, H. und C. Stadler (2005): High resolution distributed atmospheric-hydrological modelling for Alpine catchments. *J. Hydrol.* 314, 105–124.
- Lim, K.-S. S. und S.-Y. Hong (2010): Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Mon. Wea. Rev.* 138 (5), 1587–1612.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley und H. D. Orville (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 22 (6), 1065–1092.
- Liu, C., K. Ikeda, G. Thompson, R. Rasmussen und J. Dudhia (2011): High-Resolution Simulations of Wintertime Precipitation in the Colorado Headwaters Region: Sensitivity to Physics Parameterizations. *Mon. Wea. Rev.* 139 (11), 3533–3553.
- Milbrandt, J. A. und M. K. Yau (2005): A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part I: Analysis of the Role of the Spectral Shape Parameter. *J. Atmos. Sci.* 62 (9), 3051–3064.
- Morrison, H., J. A. Curry und V. I. Khvorostyanov (2005): A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.* 62 (6), 1665–1677.
- Pappenberger, F., K. Scipal und R. Buizza (2008): Hydrological aspects of meteorological verification. *Atmos. Sci. Lett.* (9), 43–52.
- Riedel, G. (2004): Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Riedel, G., K. Förster, G. Meon, S. Lange, T. Lichtenberg und M. Anhalt (2011): Panta Rhei – Modellsystem für Forschung und Praxis (Posterbeitrag), Tag der Hydrologie, Wien.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang und J. G. Powers (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Stensrud, D. (2007): Parameterization schemes. Keys to understanding numerical weather prediction models. Cambridge University Press, New York, NY.
- Thompson, G., R. M. Rasmussen und K. Manning (2004): Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. *Mon. Wea. Rev.* 132 (2), 519–542.
- UCAR (2012): WRF Model Users Site. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>. Zuletzt geprüft am 01.03.2012.

# **Einfluss des Klimawandels mit zunehmenden Starkniederschlägen auf Abfluss und Bodenerosion in Süddeutschland**

Jessica Kempf<sup>1</sup>, Norbert Billen<sup>2</sup>, Giorgia Fosser<sup>3</sup>, André Assmann<sup>1</sup> und Hans Schipper<sup>3</sup>

<sup>1</sup> geomer GmbH, Heidelberg, Deutschland

<sup>2</sup> bodengut – Büro für nachhaltige Bodennutzung, Stuttgart, Deutschland

<sup>3</sup> Süddeutsches Klimabüro, Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland

## **Zusammenfassung**

Klimamodellrechnungen zeigen Zunahmen der sommerlichen Starkniederschlagsereignisse in für Süddeutschland in der Zukunft. Bodenerosion in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten wird vielfach von kurzen, lokal begrenzten, aber intensiven Niederschlägen verursacht. Im Rahmen des KLIWA-Verbundprojektes „*Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen*“ soll das künftige Erosionsrisiko in kleinen und mittleren Einzugsgebieten in Süddeutschland durch die Kopplung eines geeigneten Klima- und Erosionsmodells räumlich und zeitlich hochaufgelöst abgeschätzt werden. Dabei wurden in einer ersten Projektphase (Auswahl von Simulationsmodellen und Referenzstandorten) unterschiedliche Klima- und Erosionsmodelle hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung bewertet. Im Ergebnis eignet sich das regionale physikalisch-dynamische Klimamodell COSMO-CLM am besten für die Simulation von Niederschlägen im Zielmaßstab. Für die Modellierung der Bodenabträge verursacht durch einzelne Starkniederschläge eignet sich das physikalische Erosions- und Abflussmodell LISEM besonders gut. In der zweiten Projektphase werden die eigentlichen Klima- und Erosionsmodellierungen an drei Referenzstandorten Mertesdorf (RLP), Scheyern (BY) und Weiherbach (BW) für die Retrospektive (1971-2000) und die Klimaprojektion (2021-2050) durchgeführt. Dabei dienen die Niederschlagsdaten des Klimamodells als Eingabeparameter des Erosionsmodells.

## **Einleitung**

Der Klimawandel wird in vielerlei Hinsicht Einfluss auf Mensch und Umwelt haben. Für die Entwicklung von Anpassungsstrategien müssen die Folgen des Klimawandels zunächst ermittelt und die Wirkung von Gegenmaßnahmen abgeschätzt werden. Durch den Klimawandel sind Veränderungen in der Häufigkeit, Intensität sowie in der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Starkniederschlägen auch in Süddeutschland zu erwarten. Während es im Sommer trockener wird, nehmen die Niederschläge im Winter zu. Darüber hinaus wird es vor allem häufiger zu regional differenzierten sommerlichen Starkniederschlagsereignissen kommen (z.B. KLIWA 2003, KLIWA 2006, KLIWA 2009a, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz 2007). Die veränderten Klimabedingungen werden neben der Zunahme von Hochwasserereignissen (KLIWA 2009b) auch Auswirkungen auf den Boden und damit auf wichtige Bodenfunktionen haben (Kamp et al. 2008), die dann wiederum das Erosionsverhalten beeinflussen. Mit dem erhöhten Erosionsrisiko wird neben der Schädigung der Böden selbst (On-Site-Schäden), mit sog. Off-Site-Schäden wie Sediment- und Stoffeinträgen in Oberflächengewässer sowie Schlammablagerungen im Siedlungsbereich gerechnet.

Für die standortgerechte Planung und Umsetzung von Anpassungsstrategien stellt die Abschätzung des Erosionsrisikos in kleineren und mittleren Einzugsgebieten, verursacht durch Starkniederschläge, eine große Herausforderung dar. Dazu müssen räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Klima- und Erosionsmodellierungen durchgeführt werden. Deshalb hat das KLIWA-Vorhaben „*Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen*“ zum Ziel, die künftige Niederschlagcharakteristik sowie das Erosionsverhalten in kleinen und mittleren Einzugsgebieten in Süddeutschland (Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz) durch die Kopplung eines Klima- und Erosionsmodells abzuschätzen.

## **Methode**

Das KLIWA-Vorhaben gliedert sich in zwei Phasen: In der ersten Projektphase, eine Konzept- und Machbarkeitsstudie, wurden unterschiedliche Klima- und Erosionsmodelle hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung bewertet sowie zur Kalibrierung und zur Validierung der Modelle nach geeigneten Referenzstandorte im Untersuchungsraum recherchiert. In der bis 2013 dauernden zweiten Phase, stehen die Entwicklung und Realisierung der hochaufgelösten Klimamodellierung, deren Kopplung mit der größermaßstäbigen Erosionsmodellierung sowie die eigentliche Erosions-/Abflussmodellierung auf den Referenzstandorten und 15 auszuwählenden Vergleichsstandorten für den Kontrollzeitraum 1971 bis 2000 und den Simulationszeitraum 2021 bis 2050 im Mittelpunkt. Alle Standorte sind gleichmäßig auf die drei Bundesländer Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY) und Rheinland-Pfalz (RLP) zu verteilen.

### Phase I: Auswahl von Simulationsmodellen und Referenzstandorten

In der Phase I wurden drei statistisch-empirische und zehn physikalisch-dynamische regionale Klimamodelle überprüft, von denen zwei physikalische (COSMO-CLM, REMO) und alle statistische Modelle (NiedSim-Klima, WETTREG, STAR) für eine detailliertere Untersuchung in die engere Auswahl kamen. Die Bewertung der regionalen Klimamodelle erfolgte anhand einer Bewertungsmatrix zu Modelleigenschaften (z.B. Parametrisierung, Rechnerkapazität), allgemeinen Merkmalen (z.B. Verfügbarkeit, Einsatz in anderen KLIWA-Teilvorhaben) sowie Ein- und Ausgabedaten.

Neben den Klimamodellen wurden in der ersten Projektphase 17 sowohl empirische (z.B. ABAGflux, ANSWERS, KINEROS) als auch physikalisch-prozessbasierte Erosionsmodelle (CATFLOW-SED, EUROSEM, EROSION-3D, LISEM) untersucht. Die Bewertung der Modelle wurde mit Hilfe von Handbüchern, Produktbeschreibungen sowie einer intensiven Literaturstudie und Expertenbefragung durchgeführt. Wie schon bei den Klimamodellen wurde auch hier eine Bewertungsmatrix mit verschiedenen Kriterien zu inhaltlichen und technischen Merkmalen, wie z.B. räumliche und zeitliche Auflösung, Abbildung von Prozessen, vorhandene GIS-Schnittstelle der Modelle erstellt.

Für Plausibilisierungs- und Validierungszwecke der geplanten Modellierungen wurden außerdem 25 Standorte in den drei untersuchten Bundesländern überprüft, auf denen in der Vergangenheit Erosionsmesskampagnen stattfanden. Die Bewertung zur endgültigen Auswahl von drei Referenzstandorten fand mittels 22 Kriterien statt wie z.B. Dokumentationsqualität der Untersuchungen und des Landmanagements oder hochaufgelöste Niederschlags- und Abflussmessungen.

## Phase II: Klima- und Erosionsmodellierung

Basierend auf den Ergebnissen der Phase I werden in Phase 2 zunächst die Klima- und Erosionsmodellierungen an den drei Referenzstandorten durchgeführt werden (s. Abb. 1). Die Klimamodellierungen der vergangenen Periode (1971-2000) werden mit gemessenen Daten verglichen, um die Abweichung der Klimaprojektion (2021-2050) möglichst genau abschätzen zu können. Die Klimamodellierungen basieren zunächst auf dem mittleren Szenario A1B des IPCC. Bodenerosionsprozesse finden auf kleinräumigen Skalen statt, daher sind räumlich sehr hoch aufgelöste Niederschlagsdaten aus den regionalen Klimasimulationen notwendig. Hierbei kommt das Nesting-Verfahren zum Einsatz. Bei diesem dienen zunächst Modellergebnisse aus dem globalen Klimamodell ECHAM 5 als Randbedingungen für Simulationen, die mit einer Auflösung von 50 km durchgeführt werden. Diese wiederum treiben Simulationen mit einer Auflösung von 7 km und schließlich 2,8 und 1 km an. Die 7 km werden flächendeckend für das gesamte KLIWA-Gebiet sowohl für die Retrospektive (1971-2000) als auch für die Zukunft (2021-2050) gerechnet. Aus den 2,8 km-Simulationen, die derzeit für die Vergangenheit laufen, werden dann schließlich drei Episoden mit erosionsrelevanten Niederschlagsereignissen identifiziert, die dann im kommenden Projektjahr erneut mit einer räumlichen Auflösung von 1 km modelliert werden (s. Abb. 1).

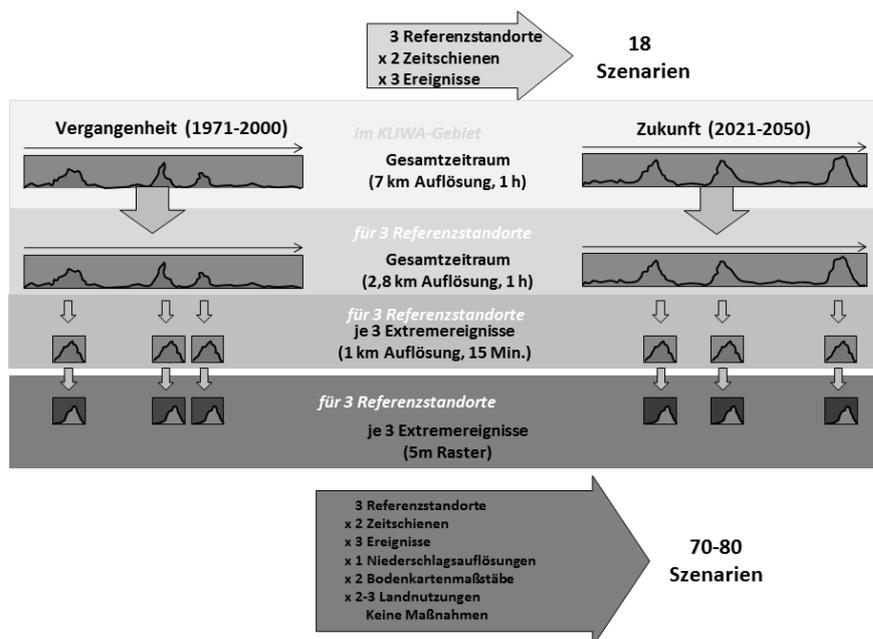


Abb. 1: Schematische Darstellung für den Arbeitsablauf an den drei Referenzstandorten (hell- und mittelgrau: Klimamodellierung; dunkelgrau: Erosionsmodellierung)

Die Daten der Klimamodellierung dienen als Eingabe für die Erosionsmodellierung mit LISEM. Neben dem o.g. Nesting ist die Kopplung der Modelle die zentrale Innovation des Projektes und soll möglichst automatisiert erfolgen. Von den drei Referenzstandorten sind typische Landnutzungen, landwirtschaftliche Fruchtfolgen, digitales Geländemodell und Bodenkarten Eingangsinformationen für LISEM. Gemessene Niederschlags- und Abfluss- sowie Abtragsdaten werden für die Validierungszwecke bzw. Plausibilitätsprüfungen verwendet. Die Geodaten werden in dem geographischen Informationssystem ArcGIS aufbereitet und parametrisiert sowie in das für LISEM notwendige PCRaster-Format konvertiert. Für die Modellierung mit LISEM sind außerdem weitere Parameter vorzuhalten wie z.B. Blattflächenindex, Bodenbedeckungsgrad und Aggregatstabilität.

An den Referenzstandorten sind bei jeweils drei Extremereignissen zwischen 70 und 80 Modellläufe im 5m-Raster bei einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten geplant (s. Abb. 1). Dabei werden drei gemessene Ereignisse in der Vergangenheit und drei projizierte Ereignisse in der Zukunft simuliert. Weitere Variationen ergeben sich z.B., indem in der Retrospektive reale oder typisch-generierte Landnutzungen und in der Zukunft reale (oder typisch-generierte) und zwei szenarische Landnutzungen modelliert werden.

## ***Ergebnisse***

### Auswahl der zielgerichteten Simulationsmodelle und der Referenzstandorte

Der Vorteil von physikalisch-dynamischen gegenüber statistisch-empirischen **Klimamodellen** ist, dass sie einen physikalisch konsistenten Datensatz liefern. Es wird erwartet, dass Extremereignisse deswegen auch unter zukünftigen Bedingungen besser erfasst werden können. Durch die räumliche Ausdehnung des Modellgitters lassen diese Klimamodelle zudem eine direkte Kopplung an Bodenerosionsmodelle zu. Wenn nun der Gitterpunktastand eines Klimamodells stark verringert wird, können damit die örtlichen Eigenschaften die für die Bodenerosionsmodellierung von Bedeutung sind gut wiedergegeben werden. Die 13 untersuchten Klimamodelle erreichten mit Blick auf die Untersuchungsziele Eignungsgrade von 47 – 80 %, das Idealmodell würde 100 % erreichen. Den maximalen Eignungsgrad erreichte das physikalisch-dynamische COSMO-CLM Modell, u.a. wegen der Möglichkeit einer expliziten Berechnung konvektiver Ereignisse und durch das hohe Raum- und Zeitauf Lösungspotenzial von 1 km bzw. 15 Minuten (Feldmann et al. 2008, Meissner et al. 2009).

Empirische **Erosionsmodelle** sind zwar relativ einfach in ihrer Anwendung, berechnen jedoch nur langfristige mittlere Sedimenteinträge. Erosion wird in der Regel durch Starkniederschlagsereignisse ausgelöst und empirische Erosionsmodelle können den Abtrag von Einzelereignissen, die Herkunftsflächen des Bodenabtrags sowie die durch die Erosion verursachten off-site-Schäden nicht abschätzen. Physikalisch-prozessorientierte Modelle erlauben eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung, eine bessere Abschätzung der On- und Off-Site-Schäden sowie eine bessere Übertragbarkeit auf andere Modellstandorte. Nachteile der physikalischen Modelle liegen in der hohen Anzahl der Eingabeparameter sowie an dem meist sehr hohen rechentechnischen Aufwand. Die 17 untersuchten Erosionsmodelle erreichten Eignungsgrade von 25 - 82 %. Den maximalen Eignungsgrad erreichte das als Free-ware verfügbare physikalisch-prozessbasierte Limburg Soil and Erosion Model (LISEM) (De Roo und Jetten 1999, Jetten 2002) knapp vor Erosion-3D. LISEM wurde u.a. ausgewählt wegen der guten Abbildung von Erosion und Abfluss in kleineren und mittleren Einzugsgebieten, der guten Flächenmanagement-Optionen, der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung und wegen der vorhandenen GIS-Schnittstelle. Inzwischen steht LISEM Open Source zur Verfügung, so dass der Quelltext des Programms für jeden zugänglich ist und eigene Weiterentwicklungen integriert werden können. Daher hat LISEM ein hohes Entwicklungspotential.

Die Auswahl bei den **Referenzstandorten** führte zu Mertesdorf (ca. 2 km<sup>2</sup>) in Rheinland-Pfalz, Scheyern (ca. 10 km<sup>2</sup>) in Bayern und Weiherbach (6,3 km<sup>2</sup>) in Baden-Württemberg sowie der Empfehlung, 15 weitere Vergleichsstandorte für die Modellierungen auszuwählen, um die Praxistauglichkeit der Modellierungen sowie die Übertragung der Ergebnisse in andere Regionen des Untersuchungsraumes zu überprüfen (Abb. 2).

## Klima- und Erosionsmodellierung

Im ersten Abschnitt der zweiten Phase des Projektes lag der Fokus bei der Validierung des Klimamodells mittels Sensitivitätsstudien. Inzwischen sind die 2,8 km-Läufe für das Untersuchungsgebiet angedeutet. Die 1 km-Läufe folgen im nächsten Abschnitt.

Mit LISEM konnten nach der Eingabe von Grund- und Standortdaten erste Testmodellierungen durchgeführt werden. Außerdem wurden die 15 Vergleichsstandorte mit Hilfe eines statistischen Auswahlverfahrens ermittelt (Abb. 2).



Abb. 2: Lage der Referenz- und Vergleichsstandorte (große Kreise) im Untersuchungsgebiet

Somit sind für die LISEM-Modellierungen aktuell zunächst die Testdaten aus den 2,8 km-Läufen mit COSMO-CLM aus dem Validierungsjahr 1986 mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einem 10x10 km Raster rund um das Referenzgebiet Weierbach für Konvertierungs- und Erosionsmodellierungstests verfügbar. Dabei konnte ein Konvertierungswerkzeug erstellt werden, das zwischen den von COSMO-CLM erzeugten Niederschlagsdateien im NetCDF-Format die von LISEM benötigten Eingabedaten wie Lage virtueller Niederschlagsstationen und Niederschlagsganglinien für die Erosionsmodellierung erzeugt (Abb. 3).

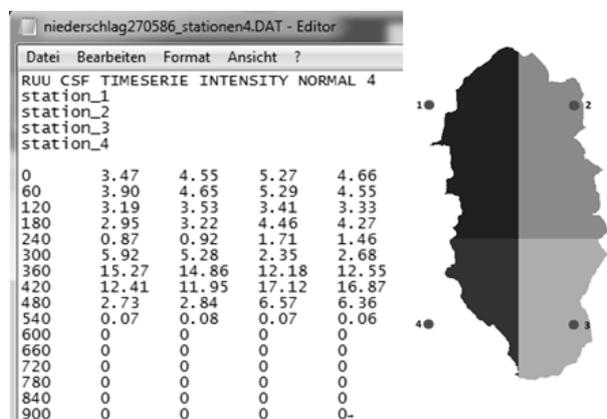


Abb. 3: Niederschlagsgangliniendatei und Karte der Niederschlagsstationen (LISEM-Input)

## **Ausblicke und Schlussfolgerung**

Im kommenden Untersuchungsabschnitt werden die Erosions- und Abflussmodellierungen für die Retrospektive an den drei Referenzstandorten durchgeführt sowie ein Modell- und Simulationsmanagement aufgebaut. Für den Boden- und Gewässerschutz sind die verwendeten Modelle letztendlich geeignete Instrumente, das durch Einzelereignisse verursachte Abfluss- und Erosionsrisiko in kleineren und mittleren Einzugsgebieten abzuschätzen. Die Ergebnisse geben Hinweise zur Entwicklung von standortgerechten Erosionsminderungsmaßnahmen und Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

## **Literatur**

- De Roo, A. und Jetten, V. (1999): Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. In: *Catena* 37, S. 477 – 493
- Feldmann, H., Früh, B., Schädler, G., Panitz, H.-J., Keuler, K. und Lorenz, P. (2008): Evaluation of the precipitation for Southwestern Germany from high resolution simulations with regional climate models. In: *Meteorol. Z.*, 17(4), S. 455-465.
- Jetten, V. (2002): LISEM – Limburg Soil Erosion Model. Windows Version 2.x. User manual. Utrecht.
- Kamp, T., Choudhury, K., Ruser, R., Hera, U. und Rötzer, T. (2008): Auswirkungen von Klimaänderungen auf Böden – Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop. “Böden im Klimawandel – Was tun?”. Am 22./23. Januar 2008. Texte 25. S. 17 - 26
- KLIWA (2003): Workshop „Extreme Hochwasser und Klimaveränderung“. (<http://www.kliwa.de>).
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Bericht Heft 9. Karlsruhe.
- KLIWA (2009a): Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung. Zusammenfassender Kurzbericht, Bayerisches Landesamt für Umwelt. Karlsruhe.
- KLIWA (2009b): Klimawandel im Süden Deutschlands. Ausmaß – Folgen – Strategien. Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft. Karlsruhe.
- Meißner, C., Schädler, G., Panitz, H.-J., Feldmann, H. und Kottmeier, Ch. (2009): High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. In: *Meteorol. Z.*, 18(5), S. 543-557.
- Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2007): Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007. Mainz.

## **Förderung**

Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA), [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz

# **Besondere Maßnahmen zur Berücksichtigung des Schneeeinflusses bei der Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg**

Ingo Haag<sup>1</sup>, Nicole Henn<sup>1</sup>, Angela Sieber<sup>1</sup> und Manfred Bremicker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft, Karlsruhe, Deutschland

<sup>2</sup> Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Vorhersage von Winterhochwassern wird häufig durch den Schneeeinfluss erschwert. Um dieser Problematik zu begegnen, werden bei der Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg neben einer physikalisch basierten Simulation der Schneedynamik weitere Verfahren zur besseren Erfassung des Schneeeinflusses eingesetzt. Die bei Lufttemperaturen nahe 0°C resultierende Unsicherheit bezüglich des Übergangs von Schnee zu Regen wird durch Ensemblerechnungen ermittelt und in der Lagebeurteilung berücksichtigt. Eventuellen Fehleinschätzungen bei der langfristigen Entwicklung der Schneedecke wird durch eine bedarfsweise Nachführung der modellinternen Schneezustände anhand interpolierter Messdaten begegnet. Beispiele aus dem Winter 2010 / 2011 verdeutlichen den erfolgreichen Einsatz dieser Methodik.

## **Einleitung**

In den überwiegend pluvio-nival geprägten Flusseinzugsgebieten der deutschen Mittelgebirge treten die maßgeblichen Hochwasser häufig im Winter auf. Diese Winterhochwasser stellen aufgrund des schwer zu quantifizierenden Schneeeinflusses eine besondere Herausforderung für die Hochwasservorhersage dar. Daher wird bei der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) besonderes Augenmerk auf die Simulation der Schneedynamik, die Einbindung von Schneemessdaten und die Berücksichtigung der schneebedingten Vorhersageunsicherheit gelegt. Nachfolgend werden die operationelle Vorgehensweise und deren Wirkung am Beispiel der Winterhochwasser 2010 / 2011 dargestellt und diskutiert.

## **Grundlagen und Methoden**

Die HVZ der LUBW setzt das Wasserhaushaltsmodell LARSIM unter anderem zur Hochwasserfrühwarnung und zur kontinuierlichen Echtzeitvorhersage von Abflüssen und Wasserständen ein. Hierfür liegen landesweit rasterbasierte LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle mit Teilgebietsflächen von 1 x 1 km<sup>2</sup> vor, die operationell mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde betrieben werden. Unter Einbeziehung operationell verfügbarer hydrometeorologischer Messdaten und numerischer Wettervorhersagen wird der aktuelle terrestrische Wasserkreislauf kontinuierlich simuliert und vorhergesagt. Neben den zentralen Aspekten der Hochwasservorhersage und -frühwarnung werden hierdurch auch weitere Fragestellungen wie z.B. Niedrigwasser- und Wassertemperaturvorhersagen abgedeckt (z.B. Bremicker, 2000; Luce et al., 2006; Haag und Luce, 2008; Haag und Bremicker, 2010).

Die LARSIM-Teileinzugsgebiete sind intern nochmals in Landnutzungs-Boden-Kompartimente aufgliedert. Die Simulation von Interzeption, Abflussbildung und Evapotranspiration sowie der Akkumulation, Metamorphose und Ablation von Schnee erfolgt getrennt für diese Kompartimente. Bei der Simulation der für die Hochwasserentstehung im Winter relevanten Schneedynamik wird somit neben der geographischen Lage auch die spezifische Landnutzung berücksichtigt.

Für die Akkumulation des Schnees muss zunächst unterschieden werden, ob der Niederschlag als Regen oder als Schnee fällt. Dies wird in LARSIM über die gebietsspezifisch vorzugebende Grenztemperatur ( $T_{gr}$ ) für den Übergang von Schnee in Regen bewerkstelligt. Für die weitere Entwicklung der Schneedecke ist zum einen deren Energiebilanz und zum anderen die Metamorphose, Setzung und Retention des Schmelzwassers in der Schneedecke (nachfolgend vereinfacht als Setzung bezeichnet) entscheidend. Für die Simulation von Energiebilanz und Setzung stehen in LARSIM mehrere Verfahren unterschiedlicher Komplexität zur Verfügung, die je nach Datenlage und Aufgabenstellung eingesetzt werden können (Haag, 2006). In den LARSIM-Modellen der HVZ wird die Energiebilanz der Schneedecke unter Berücksichtigung aller relevanten Energieströme sowie des resultierenden Energieinhalts (Kälteinhalt) der Schneedecke und der zugehörigen Schneetemperatur berechnet (Abb. 1). Energie- und Wasserbilanz sind dabei konsistent gekoppelt, die alterungsbedingte Veränderung der Albedo und der Bodenwärmestrom werden mit physikalisch basierten Ansätzen dynamisch berechnet und der Einfluss der Vegetationsbedeckung auf die Energieströme wird berücksichtigt (Haag, 2006). Die aus Akkumulation und Energiebilanz resultierende Setzung der Schneedecke und die tatsächliche Schmelze werden mit dem erprobten Verfahren nach Bertle (1966) berechnet.

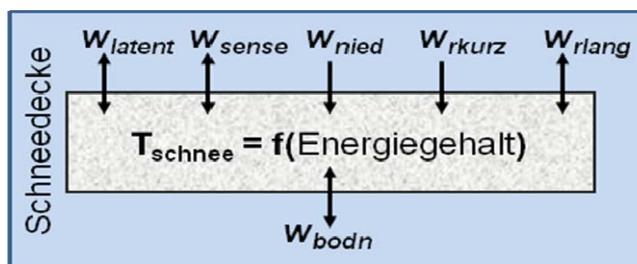


Abb. 1: In den LARSIM-Modellen der HVZ verwendeter Energiebilanzansatz für die Schneedecke.

Da die Grenztemperatur für den Übergang von Schnee zu Regen infolge unterschiedlicher Wetterlagen zeitlich stark variieren kann, ist der aktuell optimale Wert für  $T_{gr}$  im operationellen Betrieb a priori nicht bekannt. Daher wird die Unsicherheit der Abflussvorhersagen, die aus der Unsicherheit von  $T_{gr}$  resultiert, bei der HVZ seit 2011 kontinuierlich mit abgeschätzt. Hierzu werden parallele Vorhersageläufe mit Grenztemperaturen zwischen  $-1^{\circ}\text{C}$  und  $+1^{\circ}\text{C}$  berechnet und HVZ-intern ausgewertet. Hierdurch können kritische Situationen identifiziert werden, in denen deutlich unterschiedliche (Hochwasser-) Vorhersagen vorliegen, je nachdem, ob der aktuelle Niederschlag als Regen oder Schnee fällt.

Neben der kurzfristigen Einschätzung von  $T_{gr}$  wird bei der HVZ auch die langfristige Entwicklung der Schneedecke mit Blick auf die aus der Schmelze resultierende Hochwassergefahr berücksichtigt. Hierzu werden landesweit vorliegende punktuelle Messdaten des Schneewasseräquivalents zunächst mithilfe eines External Drift Kriging Verfahrens auf die Fläche übertragen. Auf Grundlage des Berechnungskerns der Geostatistical Software Library (GSLIB) von Deutsch und Journel (1998), wurde hier-

für das Programm HVZ\_SnowRegio entwickelt, das speziell auf die Interpolation von Schneemessdaten abgestimmt ist. Bei entsprechender Datenlage können in dem Programm zusätzlich zu Punktmessungen auch Satelliteninformationen zur Schneegrenze verwendet werden (Haag und Wagner, 2012).

Die mit den LARSIM-Modellen simulierte räumliche Verteilung der Schneewasseräquivalente wird im Winter routinemäßig mit den räumlich interpolierten Werten sowie ggf. aus Satellitendaten verfügbaren Schneegrenzen verglichen und bewertet. Sofern größere Abweichungen auftreten und die interpolierten Messdaten auf Grundlage aller verfügbaren Informationen als plausibler eingeschätzt werden, können die modellinternen Schneezustände anhand der interpolierten Messdaten vollständig oder graduell nachgeführt werden. Dabei werden auch jene modellinternen Schneezustände, für die keine Messwerte verfügbar sind (z.B. Schneetemperatur, Schneedichte, Anteil flüssigen Wassers, Speicherkapazität etc.) auf Grundlage der Wasseräquivalente nachgeführt (Haag und Wagner, 2012). Hierdurch können die Anfangsbedingungen (hinsichtlich des Schnees) für die operationellen Vorhersagen nötigenfalls verbessert werden.

## **Ergebnisse und Diskussion**

In den meisten Wintern können Auf- und Abbau der Schneedecke und die daraus resultierende Abflussreaktion mit dem oben skizzierten, physikalisch basierten Schneemodul ohne weitere Eingriffe recht gut simuliert und vorhergesagt werden. Nachfolgend wird anhand des hochwasserträchtigen Winters 2010 / 2011 erläutert, wie es bei besonderen Konstellationen (ohne die beschriebenen Zusatzmaßnahmen) dennoch zu Fehleinschätzungen bei der Schneesimulation kommen kann. Hierauf aufbauend wird die positive Wirkung der zusätzlichen Maßnahmen bei solchen Situationen dargestellt.

Anfang Dezember 2010 fielen landesweit Niederschläge aus einer nahezu stationären aufgleitenden Warmfront. Trotz tiefer Lufttemperaturen in Bodennähe fielen diese aus der aufgleitenden Warmluft resultierenden Niederschläge zum allergrößten Teil als Regen. Mit den operationellen LARSIM-Modellen, die standardmäßig mit  $T_{gr} = +0,5^{\circ}\text{C}$  arbeiteten, wurde hingegen überwiegend Schneefall simuliert. Diese (aus der aktuellen Wetterlage resultierende) Fehleinschätzung der Grenztemperatur hatte die direkte Folge, dass das kleinere Hochwasserereignis von Anfang Dezember durch das Modell vielerorts zunächst unterschätzt wurde. Dies wird insbesondere bei der Simulation von Pegeln mit sehr kleinem Einzugsgebiet (für die keine Vorhersagen veröffentlicht werden) deutlich. Ein Beispiel hierfür zeigt die Simulation für den Pegel Baden-Baden / Oosbach (Abb. 2).

Der in Abb. 3 dargestellte langfristige Vorhersagetest für Baden-Baden / Oosbach verdeutlicht, wie sensitiv die Abflussprognose für den Zeitraum Anfang Dezember 2010 auf die moderate Variation von  $T_{gr}$  reagiert. Im vorliegenden Fall wäre das Ereignis mit  $T_{gr} = 0^{\circ}\text{C}$  gut vorhergesagt worden, während  $T_{gr}$  von  $-0,5^{\circ}\text{C}$  oder  $-1^{\circ}\text{C}$  zu einer deutlichen Unterschätzung führten (Abb. 2 und 3). Aus diesem Grund wird seit dem letzten Winter bei der HVZ die Auswirkung der Unsicherheit von  $T_{gr}$  durch zusätzliche betriebsinterne Ensemblerechnung mit abgeschätzt. Hierdurch können kritische Situationen, wie Anfang Dezember 2010, in denen die korrekte Hochwasservorhersage maßgeblich von  $T_{gr}$  abhängt, bereits im Vorfeld identifiziert und in die Lagebeurteilung einbezogen werden.

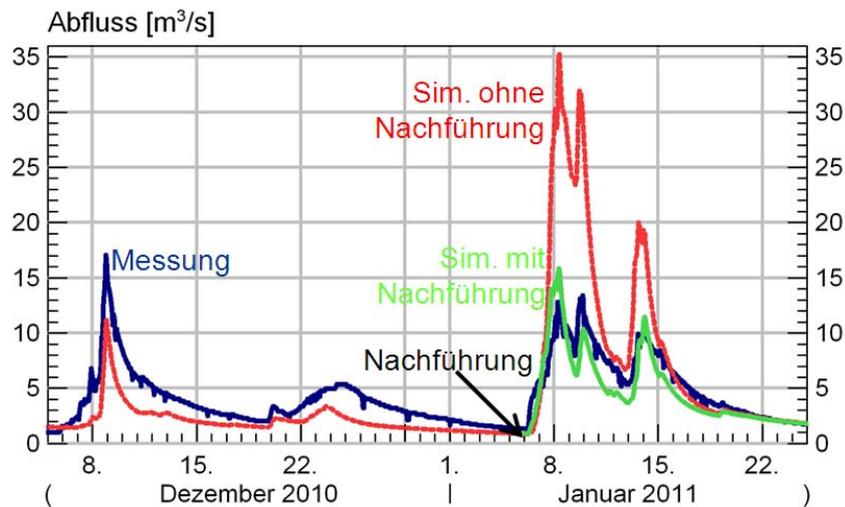


Abb. 2: Simulationsergebnisse mit und ohne Schneenachführung für Baden-Baden / Oosbach.

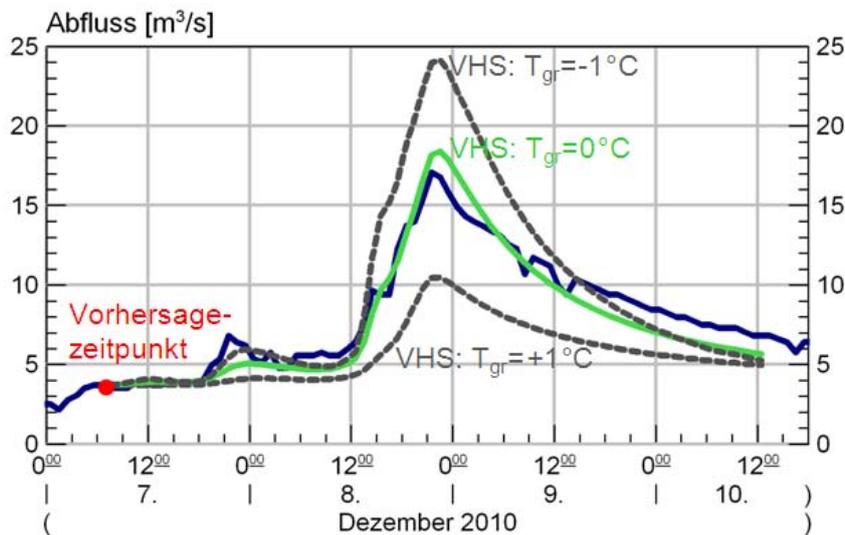


Abb. 3: Abflussvorhersagetests mit unterschiedlichen Grenztemperaturen für Baden-Baden / Oosbach.

Darüber hinaus hätte die erste Überschätzung der Schneedecke von Anfang Dezember 2010 ohne korrigierende Schneenachführung und Beibehaltung von  $T_{gr} = +0,5^{\circ}\text{C}$  auch den Ausgangspunkt für eine in der Folge weiter zunehmende Überschätzung der Schneedecke gebildet (Abb. 4). Die weiter zunehmende Überschätzung wäre dabei durch die selbstverstärkende Wirkung einer zu mächtigen Schneedecke und erneute Regenniederschläge bei zugleich niedrigen bodennahen Temperaturen bedingt gewesen. Diese sich langfristig aufbauende (und selbstverstärkende) Überschätzung der Schneedecke hätte ohne korrigierende Maßnahmen bei der Schneeschmelze Anfang Januar zu teilweise deutlichen Überschätzungen des Hochwasserabflusses geführt. Die durchgängige Simulation für den Pegel Baden-Baden / Oosbach verdeutlicht dies an einem extremen Beispiel (Abb. 2). Zudem hätte die überschätzte Retentionswirkung der zu mächtigen Schneedecke auch bedingt, dass die Schneeschmelze erst zu spät einsetzt. Wie das Beispiel der Vorhersage in Abb. 5 zeigt, wäre z.B. auch am Pegel Oberensingen / Aich das Hochwasser von Anfang Januar 2011 daher nicht nur überschätzt worden, sondern auch mit deutlichem Zeitverzug vorhergesagt worden.

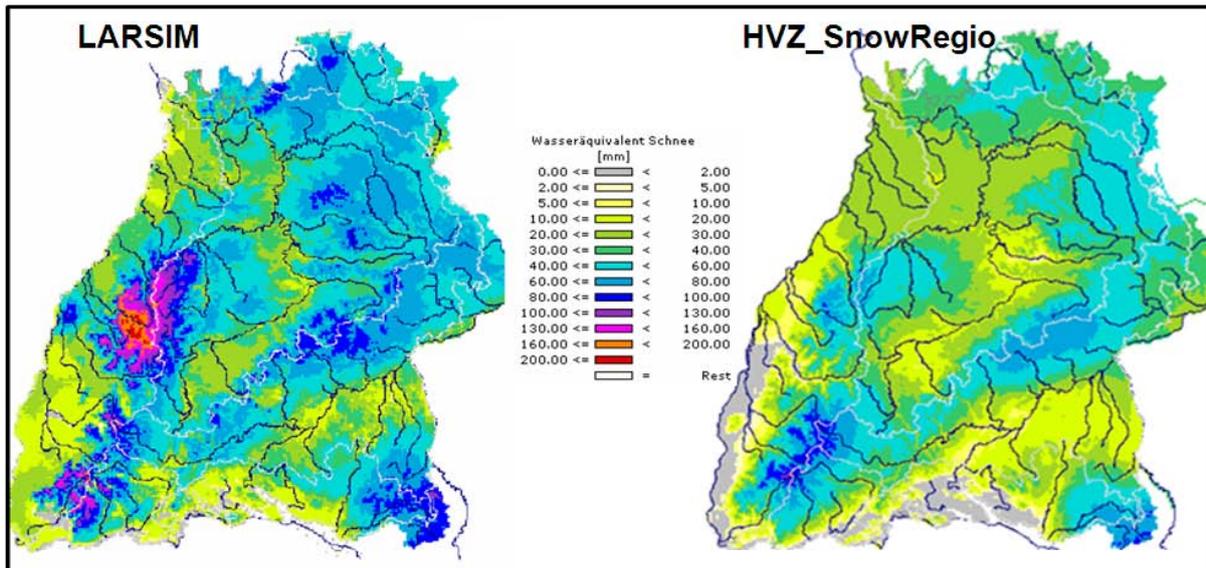


Abb. 4: Mit den LARSIM-Modellen der HVZ berechnete ( $T_{gr} = +0,5^{\circ}\text{C}$ ) und mit HVZ\_SnowRegio interpolierte Schneewasseräquivalente für den 05.01.2011.

Um solche Effekte nach Möglichkeit zu vermeiden, wird an der HVZ seit 2007 die aktuelle Schneesimulation in der oben skizzierten Weise kontinuierlich überprüft. Im Bedarfsfall werden die Schneezustände aller oder einzelner Modelle mithilfe der interpolierten Messdaten vollständig oder graduell nachgeführt. Hierbei ist aber selbstverständlich zu beachten, dass auch die interpolierten Messdaten mit Unsicherheiten behaftet sind. Im Winter 2010 / 2011 erfolgten im operationellen Betrieb bedarfsweise Nachführungen, wodurch vor allem die Vorhersagegüte für das landesweite Hochwasser von Anfang Januar 2011 deutlich verbessert werden konnte. Um die Wirkung der Schneenachführung zu veranschaulichen, wurden in einer Nachrechnung die Schneezustände zum 05.01.2011 in allen Modellen mit den interpolierten Messdaten nachgeführt. Abb. 2 zeigt die positive Auswirkung dieser Schneenachführung anhand der Simulation für den Oosbach. In Abb. 5 wird die positive Wirkung auf die Vorhersage am Pegel Oberensingen / Aich verdeutlicht: Durch die Nachführung werden sowohl der Scheitelabfluss als auch der zeitliche Verlauf des Anstiegs wesentlich besser vorhergesagt.

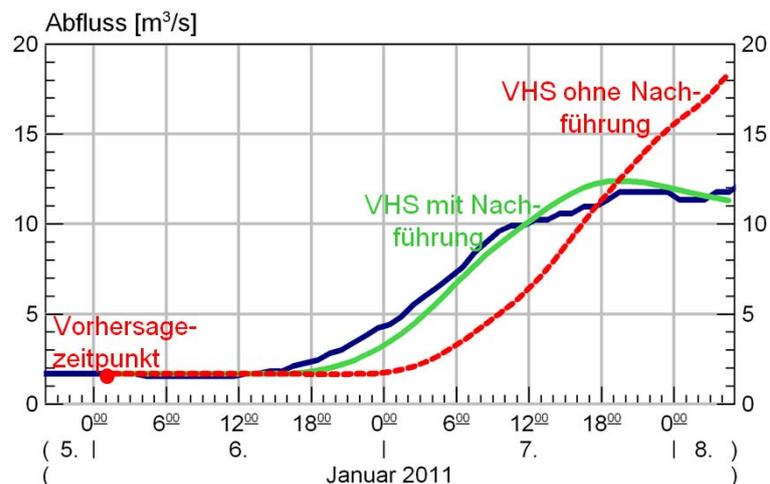


Abb. 5: Abflussvorhersagetests mit und ohne vorherige Schneenachführung für Oberensingen / Aich.

## Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen an der HVZ der LUBW zeigen, dass trotz einer physikalisch fundierten Simulation der Schneedynamik bei der winterlichen Hochwasservorhersage vor allem zwei Problemfelder auftreten: Zum einen resultieren aus der wetterlagenabhängigen Variabilität der Grenztemperatur für den Übergang von Schnee in Regen bei Lufttemperaturen nahe 0°C Unsicherheiten für die Abflussvorhersage. Zum anderen sind beim längerfristigen Aufbau einer Schneedecke Fehleinschätzungen möglich, die zum Zeitpunkt der Schneeschmelze entsprechend negative Folgen für die Abflussvorhersage haben können.

Um dem ersten Problempunkt zu begegnen, wird bei der Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg die Unsicherheit beim Übergang von Schnee zu Regen durch betriebsinterne Ensemblerechnungen explizit mit berücksichtigt. Der zweite Problempunkt wird durch eine kritische Kontrolle der simulierten Schneedecke und eine bedarfsweise Nachführung der modellinternen Schneezustände entschärft. Die hier dargestellten Beispiele veranschaulichen, dass beide Maßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Hochwasservorhersage im Winter leisten. Allerdings sollten die beschriebenen Maßnahmen keinesfalls voll automatisiert durchgeführt werden. Vielmehr erfordert ihr erfolgreicher Einsatz eine situationsabhängige Beurteilung durch einen geschulten Hydrologen.

Trotz des Erfolgs der beschriebenen Maßnahmen, werden sowohl die Schneesimulation innerhalb von LARSIM als auch die externen Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt, um die modelltechnischen Voraussetzungen zur Vorhersage winterlicher Hochwasser zukünftig weiter zu verbessern.

## Literatur

- Bertle, F. A. (1966): Effect of Snow Compaction on Runoff from Rain on Snow. Washington DC, Department of Interior, Bureau of Reclamation: EM-35.
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburg, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11.
- Deutsch, C. V. und A. G. Journel (1998): GSLIB - Geostatistical Software Library and User's Guide. 2<sup>nd</sup> Edition, New York, Oxford University Press.
- Haag, I. (2006): Zusätzliche LARSIM-Routinen zur Simulation der Schneedynamik, des Bodenwärmestroms und der Frostversiegelung. Ing.-Büro Dr. Ludwig im Auftrag der LUBW, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Haag, I., A. Luce (2008): The integrated water balance and water temperature model LARSIM-WT. *Hydrological Processes* 22, 1046-1056.
- Haag, I., M. Bremicker (2010): Wasserhaushaltsmodelle bei der LUBW: Ein Beispiel für den Nutzen von Geoinformationen und Umweltmessnetzen. *Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften (B)* 5, 31-36.
- Haag, I., A. Wagner (2012): Programmbeschreibungen: HVZ\_SnowRegio – Version 5 und HVZ\_SnowUpdate – Version 4. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag der LUBW, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Luce, A., I. Haag, M. Bremicker (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50(2), 58-66.
- Tarboton, D. G., Luce, C. H. (1996): Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB). Logan, Utah Water Research Laboratory and USDA Forest Service.

# **Ökologische Flutung an der Donau – Untersuchungen im Grenzbereich zwischen Hydrologie und Geomorphologie**

Peter Fischer<sup>1</sup>, Florian Haas<sup>1,2</sup> und Bernd Cyffka<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Angewandte Physische Geographie, Kath. Universität Eichstätt-Ingolstadt, Deutschland

<sup>2</sup>Aueninstitut Neuburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Auen sind durch wechselnde Wasserstände und Abflüsse charakterisiert. Um die Wiedervernetzung von Fluss und Aue herzustellen, werden heute in vielen Renaturierungsprojekten alte Flussschlingen revitalisiert und/oder neue Umgehungsbäche angelegt. Dadurch ändern sich die vorherrschenden hydrologischen Bedingungen und auch Erosions- und Sedimentationsbereiche werden verlegt oder bilden sich neu aus. Die kontrollierte Einleitung des Wassers (in Zeit und Menge), in die oft noch instabilen Gerinnestrukturen eines neu angelegten Umgehungsgewässers ist als spannendes Freilandexperiment unter naturnahen Bedingungen zu verstehen. Über den in diesem Renaturierungsprojekt angewendeten Methodenmix werden möglichst viele Interaktionen und Auswirkungen eines permanenten Umgehungsgewässers und der ökologischen Flutungen erfasst. Die Analyse und Interpretation der gewonnenen Daten soll Wechselbeziehungen zwischen Abfluss und Morphologie herausstellen und die eigendynamische Entwicklung eines naturnahen Fließgewässers sowie den Renaturierungserfolg aus hydrogeomorphologischer Sicht beleuchten.

## **Einleitung**

Untersuchungen zur fluvialen Morphodynamik und zu Sedimentationsvorgängen kommt hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Auenökosystem eine besondere Bedeutung zu. Sie beeinflussen den ökologischen und auch qualitativen Zustand von Gewässern maßgeblich mit (Tompkins und Kondolf, 2003). So ist für eine ökologische Verbesserung einer Flusslandschaft auch ein ganzheitliches Management nötig, welches die hydrogeomorphologischen Prozesse mit berücksichtigt. Im Grunde ist die erfolgreiche Wiederherstellung naturähnlicher hydrogeomorphologischer Prozesse ein unabdingbares Desiderat (vgl. EU-WRRL) für viele Renaturierungsmaßnahmen.

Im Rahmen des E+E-Begleitvorhabens „Monitoring Auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen“ arbeiten seit 2009 acht Arbeitsgruppen (Teilprojekte) aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen. Neben hydrologischen und hydromorphologischen Prozessen, die Schwerpunkt des hier vorgestellten Beitrages sind, werden auch die Veränderungen der Vegetation sowie der Fauna beobachtet und analysiert (Stammel et al., 2011, Lang, 2011). Ziel des Projektes ist es, die dynamischen Prozesse zur Förderung auentypischer Arten im bestehenden Auwald zu unterstützen oder ggf. neu anzuregen. Des Weiteren sollen Hinweise und Empfehlungen zur Steuerung der Ausleitung von Wassermenge und -dauer erarbeitet werden. Die Ausleitungsmenge entspricht dem Durchfluss des neuen Umgehungsgewässers und ist maßgeblich für die hydrologischen und morphologischen Prozesse verantwortlich. Daher kann sie als Motor im Auenökosystem betrachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Basis für künftige Projekte an stauregulierten Flüssen landes- und europaweit zur Verfügung gestellt werden. Das Projekt wird durch das Bundesamt für Naturschutz aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

## Untersuchungsgebiet und Revitalisierungsmaßnahmen

Das Projektgebiet liegt an der bayerischen Donau zwischen Flusskilometer 2471 und 2465. Hier hat sich einer der größten zusammenhängenden Hartholz-Auwälder Mitteleuropas erhalten. Die Aue ist allerdings durch die Flussbegradigungen während des 19. Jh. und den Bau zweier Staustufen in den 70er Jahren weitgehend von der hydrologischen Dynamik des Stroms abgekoppelt, was eine Eigenentwicklung des Systems behindert oder maßgeblich einschränkt (Regierung von Oberbayern, 2001, Schlegel, 2000).

Durch diese Korrekturen wurden die Auen von ihren Lebensadern getrennt; mit weitreichenden Folgen (Petts et al., 1989, Schiemer et al., 1999). Die dadurch entstandene oft monotone Gewässerstruktur und die Vereinheitlichung der Strömungsverhältnisse haben neben der „hydrologischen Verarmung“ auch zur Degradierung des morphologischen Regimes geführt. Der Geschiebehalt ist seit dem aus dem Gleichgewicht geraten, denn eine Zufuhr neuen Materials von oberstrom wurde quasi vollständig unterbunden.

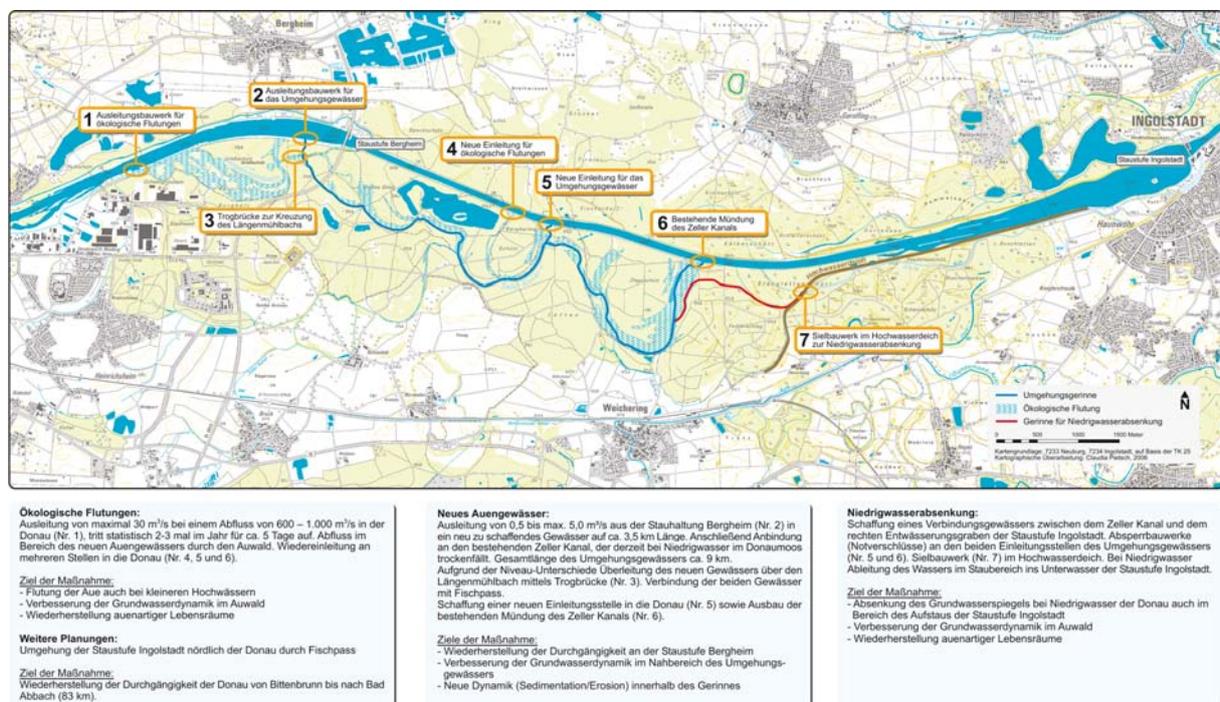


Abb.1: Lage des Untersuchungsgebietes zwischen Neuburg und Ingolstadt. Mit den wichtigsten Maßnahmen und Bauwerken.

Ein Vorhaben zur Verbesserung des Zustandes wird nun durch das Projekt „Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt“ vollzogen (Bock et al., 2006, Cyffka und Haas 2008, Stammel et al., 2011). In den südlichen Donauauen, mit einer Fläche von rund 1.200 ha, wurde der Auwald mit wasserbautechnischen Mitteln wieder an die natürliche Dynamik der Donau angeschlossen. Drei Maßnahmen sollen die eigenständige Entwicklung auentypischer Arten im bestehenden Auwald fördern: Ökologische Flutung, neues Auengewässer (Umgebungsbach) und Grundwasserabsenkung (siehe Abb.1).

Häufigere Überschwemmungen, wechselnde Grundwasserstände, Abfluss- und Gewässerbettdynamik sind natürliche Vorgänge in Flusslandschaften und ihren angrenzenden Auen. Sie sind elementarer Bestandteil dieser Ökosysteme, und fördern die Biodiversität (Amoros und Bornette, 2002, Bunn und Arthington, 2002). Um auch nur einen Teil der Einflussfaktoren und Systemzusammenhänge zu

erfassen, bedarf es eines entsprechend angepassten „dynamischen Methodenmixes“ der hier vorgestellt werden soll.

## Methoden

Im hier präsentierten Beitrag werden ausgewählte Zwischenergebnisse aus dem Teilprojekt „Fluviale Morphodynamik, Bodenfeuchte & Grundwasser“ des Forschungsverbundes vorgestellt. Neben der variablen Ausleitung von etwa 0,5-5 m<sup>3</sup>/s werden durch gezielte ökologische Flutungen die vorherrschenden Verhältnisse und Gleichgewichte im Fließgewässersystem gestört. Es ändern sich Fließgeschwindigkeiten und Richtungen, Grenzen zwischen Wasser und Land werden durch schwankende Wasserstände und Erosions- und Akkumulationsprozesse ständig verändert und verschoben. Die übliche Dynamik eines Auenlebensraumes wurde wieder hergestellt.

Überflutungen und schwankende Wasserstände können weder in einem klar abgegrenzten Raum (ein Auengewässer oder Flussabschnitt) betrachtet werden, noch kann durch eine einmalige Beobachtung (Stichtagsmessung oder Momentaufnahme) ein ausreichendes Verständnis für die im Auenökosystem ablaufenden Prozesse und Formen entwickelt werden. Aus diesem Grund werden wichtige hydrologische Parameter wie Grundwasser, Bodenfeuchte und Wasserstand mit einem automatisierten dichten Messnetz beobachtet. Untersuchungen zur fluvialen Morphodynamik (Erosion, Akkumulation, Geschiebetransport, Schwebfracht etc.) und Hydrometrie ergänzen das Untersuchungsprogramm mit möglichst vielen Einzelmessungen. Das Untersuchungsprogramm wird je nach Wasserführung in der Donau (Niedrigwasser, Hochwasser, ökologische Flutung) entsprechend an die Verhältnisse angepasst.

## Hydrologie – erste Ergebnisse

Das (automatisierte) hydrologische Messnetz besteht aus zehn Grundwasserpegeln, einem Stillgewässerpegel und sechzehn Fließgewässerpegeln, die entlang des Umgebungsgewässers den Wasserstand im Gerinne erfassen (siehe Abb. 2).

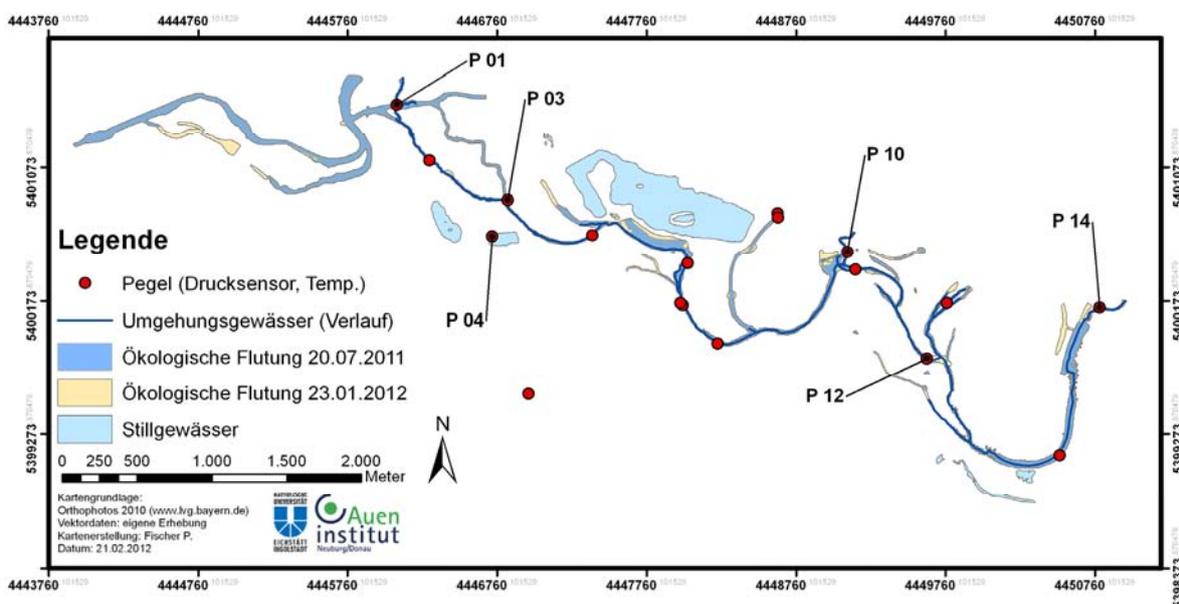


Abb. 2: Überflutungsflächen der beiden Ökologischen Flutungen (2011, 2012) (kartiert und Wasserstandsinformation über Lattenpegel) und Pegelstandorte (Datenlogger) im Projektgebiet. Zu den beschrifteten Pegeln (z.B. P 01) sind die zugehörigen Wasserstandsganmlinien der Abbildung 3 zu entnehmen.

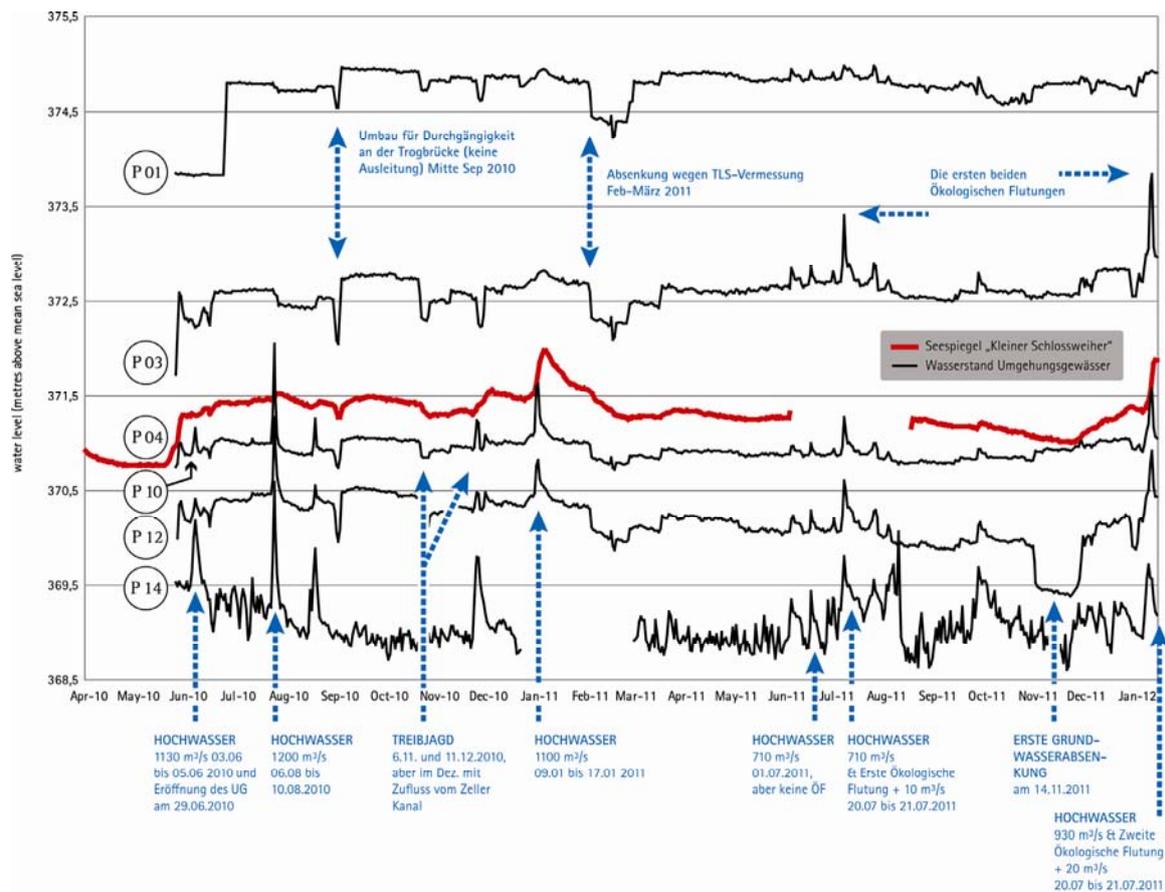


Abb. 3: Fließgewässerpegel (Tagesmittelwerte) am Umgebungsgewässer (ausgewählt) und Stillgewässerpegel am „Kleinen Schlossweiher“ (dicke Linie) (Lage siehe Abb. 2). Sowohl die natürlichen (Hochwasser) als auch künstlichen Durchflussveränderungen (Bauarbeiten, wiss. Untersuchung) sind in den Hydrographen abzulesen. Einige deutliche Ereignisse sind mit Pfeilen markiert und zeigen die Reaktion des Wasserstandes auf die entsprechende Veränderung.

Ereignisabhängig (bei einer Ökologischen Flutung oder bei einer Grundwasserabsenkung) werden mobile Lattenpegel ausgebracht, die die Wasserstandsveränderungen in Rinnen und Senken oder im unmittelbaren ufernahen Bereich quantifizierbar machen und das Messnetz räumlich verdichten. Über die so gewonnenen Wasserstände in Kombination mit Kartierungsarbeit ist eine weiträumige Erfassung der Überflutungsflächen möglich (Abb. 2).

### Geomorphologie – erste Ergebnisse

Hauptwerkzeug für den sichtbaren Bereich (oberhalb des Wasserspiegels) der fluvialen Morphodynamik ist ein Terrestrischer Laserscanner (TLS, Riegl LMS Z 420i). Mit diesem können durch multi-temporale Scan-Aufnahmen Oberflächenveränderungen sowie Entwicklungen der Gewässerstruktur im neuen Bachlauf detailliert aufgezeichnet werden. An ausgesuchten Standorten (Prall- und Gleithänge, Kiesbänken, Gefällestopfen) können die morphologischen Veränderungen quantitativ erfasst werden. Erosionsraten und Rückverlagerungen von Prallhängen werden bestimmt, indem die jeweiligen Aufnahmen von den zeitlich früher erfolgten Scans oder der Erstaufnahme subtrahiert werden (siehe Abb. 4).

An anderen Stellen entstehen in kürzester Zeit (während einer Ökologischen Flutung) neue Akkumulationsformen, die neuen Lebensraum für autotypische Arten zur Verfügung stellen. Wie die Sedimentzunge in Abb. 5 zeigt.

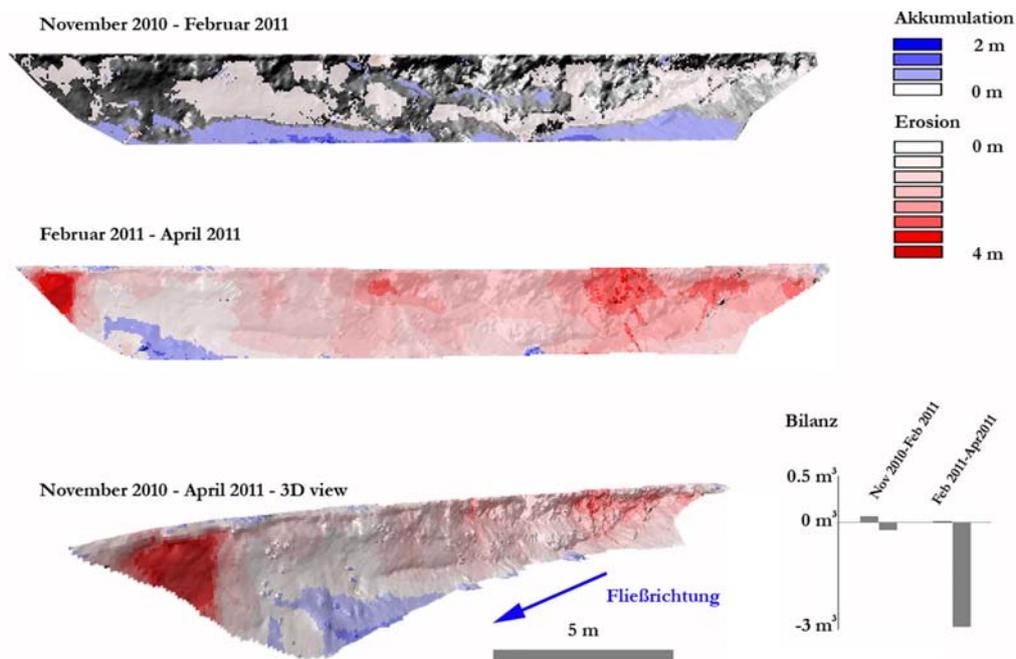


Abb.3: Prallhangentwicklung zwischen 2010-2011

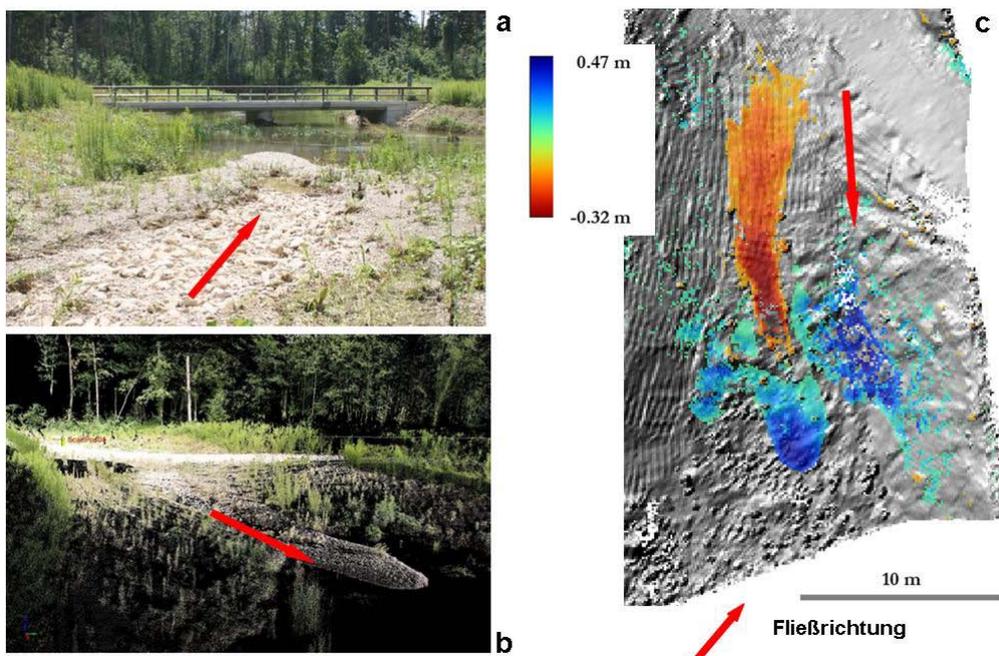


Abb. 4: Sedimentzunge als Akkumulationsform und neuer Lebensraum für auentypische Arten; entstanden innerhalb weniger Stunden während der ersten ökologischen Flutung am 20.07.2011: a, Draufsicht und 3D- View der bearbeiteten Scandaten mit entsprechenden Akkumulations- bzw. Erosionsraten, b, Foto in Fließrichtung, Fischer 2011, c, eingefärbte Punktwolke (Rohdaten) einer Vermessungsserie aus 3 einzelnen Scanpositionen, die über entsprechende Tieppoints (Reflektoren) übereinander gelegt wurden.

Da die Laserstrahlen nicht durch das Wasser bis zum Flussbett dringen, können keine Aussagen unterhalb der Wasseroberfläche getroffen werden. Um auch die Gewässerbettentwicklung zu erfassen wird über 32 Querprofile die Veränderung der Flusssohle dokumentiert. Weitere Messmethoden wie Geschiebe- und Schwebstoffmessung, Gewässerstrukturkartierung mittels DGPS u.a. ergänzen die Forschungsarbeit im und am neuen Umgehungsgewässer.

## Diskussion und Ausblick

Die Anpassung von Oberflächen- und Grundwasser an die neuen Bedingungen, Bestrebungen des Fließgewässersystems sich wieder auf einen neuen temporären Gleichgewichtszustand einzustellen, Hangrückverlegungen oder wachsende Kiesinseln und Sandbänke sind ebenso Untersuchungsgegenstand wie die dazugehörigen ablaufenden Prozesse. Die Bedeutung von periodisch wiederkehrenden „Störungen“ durch bettbildende Abflüsse, spielt dabei eine entscheidende Rolle. Die Grundvoraussetzungen für eine eigenständige Entwicklung der Flussmorphologie sind durch die technischen Maßnahmen (siehe oben) geschaffen und die ökologisch wichtige „reset-Funktion“ (Kohmann, 2011) ist mit dieser Hilfestellung wieder möglich. Wie die einzelnen Subsysteme ineinandergreifen werden erst detailliertere Auswertungen und künftige auf bisher gewonnene Erkenntnisse aufbauende Untersuchungen aufzeigen können.

## Literatur

- Amoros, C. und Bornette, G. (2002): Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology* 47, 517– 539.
- Bock, M., Cyffka, B., Haas, F. und Stammel, B. (2006): Remediation of the Danube Floodplain between Neuburg and Ingolstadt (Bavaria/Germany) – GIS supported modelling of ecological flooding. – *Göttinger Geographische Abhandlungen* 115: 1–12.
- Bunn, S.E., und Arthington, A.H (2002): Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30:492-507.
- Cyffka, B. und F. Haas (2008): Erosion without sediment supply? The crux of a floodplain restoration project downstream dammed-up headwaters. In: *Sediment Dynamics in Changing Environments*. In: IAHS Publ. 325, pp. 477-484.
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie); Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 372; 72 S., Luxemburg.
- Kohmann, F. (2009): Hat die Gewässermorphologie eine nennenswerte Bedeutung für die Gewässerbiologie? – In: *Veranstaltungen 1/2010, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Flusssysteme in Raum und Zeit 12, Gewässermorphologisches Kolloquium (3./4. Nov. 2009 in Koblenz) Bundesanstalt für Gewässerkunde. (Hrsg.) :131-134. Koblenz.*
- Lang, P., Frei, M. und Ewald, J. (2011): Waldgesellschaften und Standortabhängigkeit der Vegetation vor Beginn der Redynamisierung der Donauaue zwischen Neuburg und Ingolstadt. *Tuexenia* 31: 39–57. Göttingen.
- Petts G.E., Moller H. und Roux A.L. (1989): *Historical Change of Large Alluvial Rivers*. UK, John Wiley & Sons, Inc.
- Regierung von Oberbayern - Projektgruppe (2001): *Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt – Schlussbericht*, München.
- Schiemer, F., Baumgartner, C. und Tockner, K. (1999) Restoration of floodplain rivers: The ‘Danube restoration project’. – *Regulated Rivers: Research and Management* 15: 231–244.
- Schlegel GMBH (2000): *Renaturierung der Donau-Auen. Auswertung der Grundwassermessdaten. –Unveröff. Gutachten*, München.
- Stammel, B., Cyffka, B., Geist, J., Müller, M., Pander, J., Blasch, G., Fischer, P., Gruppe, A., Haas, F., Kilg, M., Lang, P., Schopf, R., Schwab, A., Utschik, H. und Weißbrod, M. (2011): Floodplain restoration on the Upper Danube (Germany) by re-establishing back water and sediment dynamics: a scientific monitoring as part of the implementation. *River System*, Vol. 20/1 (in press).
- Tompkins, M. R., und G. M. Kondolf (2003): Integrating geomorphic process approach in riparian and stream restoration: past experience and future opportunities. Pages 230-238 in P. M. Faber, (Hrsg). *California riparian systems: processes and floodplain management, ecology, and restoration. Proceedings of the Riparian Habitat and Floodplains Conference (Sacramento, 2001)*. Sacramento, California, USA.

# **Integratives flussgebietsweites Nährstoffmanagement AGRUM Weser im Einzugsgebiet der Flussgebietseinheit Weser**

Ute Kuhn

Geschäftsstelle der Flussgebietsgemeinschaft Weser, Hildesheim, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Bewirtschaftungsplan der Flussgebietsgemeinschaft Weser ist aufgezeigt, dass der gute Zustand gemäß dem Ziel der EG-Wasserrahmenrichtlinie bei der Mehrzahl der Wasserkörper in der Flussgebietseinheit Weser noch nicht erreicht ist. Ursachen gehen neben den morphologischen Veränderungen und Defiziten bei der Durchgängigkeit von Nährstoffeinträgen überwiegend von landwirtschaftlich genutzten Flächen aus. Um diese Einträge zu begrenzen, sind Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen, die nicht nur Umweltgesichtspunkte, sondern auch die sozialen und ökonomischen Folgen für den landwirtschaftlichen Sektor berücksichtigen.

Im Rahmen des **Modellvorhabens AGRUM Weser** wurden für die gesamte Flussgebietseinheit Weser die Nährstoffeinträge und -frachten flächendifferenziert für Grundwasser, Oberflächenwasser und Küstengewässer bilanziert, die Auswirkung von Maßnahmen der EU-Agrarpolitik sowie bestehender Rechtsvorschriften (Baseline Szenario) auf die Nährstoffbilanzüberschüsse abgeschätzt sowie eine Auswahl von ergänzenden Maßnahmen zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele in der Flussgebietseinheit Weser untersucht. Weiterhin konnten Anforderungen, Grenzen und Chancen der Modellierung in einem großen Einzugsgebiet durch die Untersuchungen aufgedeckt und eingeschätzt werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird derzeit im **Projekt AGRUM<sup>†</sup>**, das im September 2011 gestartet ist, die Ergebnispalette z. B. anhand detaillierter Daten aus der Landwirtschaft, weiter entwickelten Modellansätzen sowie neuen Erkenntnissen zu den Auswirkungen der Agrarpolitik weiter verfeinert.

## **Einführung**

Grundsätzliches Ziel der EG-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) ist das Erreichen des guten Zustandes bzw. des guten ökologischen Potenzials und des guten chemischen Zustands aller Oberflächengewässer sowie des guten mengenmäßigen und chemischen Zustands des Grundwassers bis zum Jahr 2015 (Art. 4). Im Bewirtschaftungsplan der FGG Weser (FGG Weser, 2009) ist aufgezeigt, dass dieses Ziel bei der Mehrzahl der Wasserkörper in der Flussgebietseinheit Weser noch nicht erreicht ist. Hinsichtlich der Zielerreichung kommt neben den punktuellen Nährstoffeinträgen den Einträgen aus diffusen Quellen überwiegend von landwirtschaftlich genutzten Flächen eine besondere Bedeutung zu. Um diese Einträge zu begrenzen, sind Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Diese sollten jedoch nicht nur Umweltgesichtspunkte, sondern auch die sozialen und ökonomischen Folgen für den landwirtschaftlichen Sektor (Einkommen und Arbeitsplätze) berücksichtigen. Daher wurde in der FGG Weser mit dem Handlungsfeld „Reduzierung von diffusen Nährstoffeinträgen“ wie auch in anderen Flussgebieten eine der wichtigen Wasserbewirtschaftungsfragen identifiziert.

Mit einem Verbund von 3 Modellen (Landwirtschaftsmodell RAUMIS [von-Thünen-Institut Braunschweig (Kreins et al., 2002)], Grundwassermodell GROWA/WEKU [Forschungszentrum Jülich (Kunkel et al., 2002)], Bilanzmodell MONERIS [Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfi-

scherei (Behrendt et al. 2002)) wurde erstmalig eine einheitliche Methodik zur Analyse der Nährstoffeinträge in Oberflächen- und Grundwasser für eine gesamte Flussgebietseinheit am Beispiel der FGE Weser entwickelt.

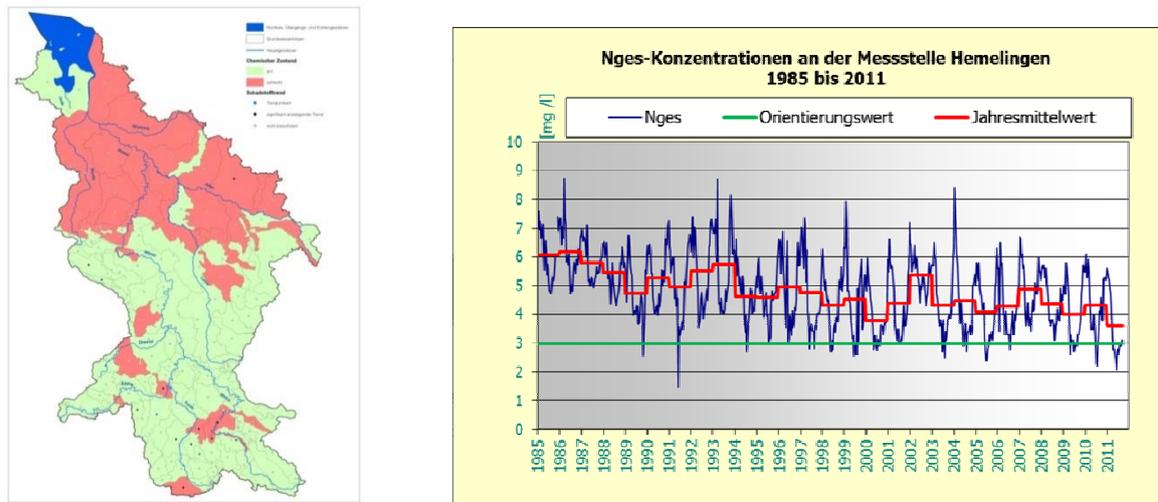


Abb. 1: Zustand der Grundwasserkörper 2009 und Konzentrationen an der Messstelle Hemelingen

Im Rahmen des Modellvorhabens AGRUM Weser (Kreins et al., 2010) wurden für die gesamte Flussgebietseinheit Weser die Nährstoffeinträge und -frachten flächendifferenziert für Grundwasser, Oberflächenwasser und Küstengewässer bilanziert, die Auswirkung von Maßnahmen der EU-Agrarpolitik sowie bestehender Rechtsvorschriften bis 2015 (Baseline Szenario 2015) auf die Nährstoffbilanzüberschüsse abgeschätzt sowie eine Auswahl von ergänzenden Maßnahmen zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele in der Flussgebietseinheit Weser untersucht. Weiterhin konnten Anforderungen, Grenzen und Chancen der Modellierung in einem großen Einzugsgebiet durch die Untersuchungen aufgedeckt und eingeschätzt werden.

## Ergebnisse aus dem Modellvorhaben AGRUM Weser

Ziel des Modellvorhabens AGRUM Weser war die Entwicklung einer flussgebietsweit einheitlichen Methodik zur Analyse der Nährstoffsituation in den Oberflächengewässern und im Grundwasser sowie zur Wirkungsanalysen von Nährstoffminderungsmaßnahmen. Durch eine Kombination von Ansätzen zur Quantifizierung der Einträge mit Wirtschaftlichkeitsanalysen sollte der Modellverbund dazu in der Lage sein, die vielfältigen, komplexen sozioökonomischen sowie hydrologischen und hydrogeologischen Wechselwirkungen und Zusammenhänge simultan zu berücksichtigen. Die Analysen haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

Die Nährstoffbilanzüberschüsse sind seit 1990 erheblich zurückgegangen, wobei gravierende regionale Unterschiede bestehen. Ursache hierfür ist eine effektivere Bewirtschaftung durch sinkenden Düngemittelsatz bei steigenden Erträgen. Reduzierter Einsatz von organischen Düngemitteln ist auf sinkende Viehbestände zurückzuführen. Die für den Stickstoffeintrag relevanten Nitratabbauraten im Boden weisen regional bedeutende Unterschiede auf. Hohe Abbauraten ergeben sich vor allem im nördlichen Flachland der FGE Weser, demgegenüber stehen geringere Abbauraten in den südlichen Festgesteinsbereichen. Hohe Nitratkonzentrationen im Sickerwasser finden sich für die Ausgangssituation 2003 in den viehstarken Regionen. In den meisten Regionen des Einzugsgebietes errechnen sich Sickerwasserkonzentrationen von 50 mg Nitrat/l und mehr. Die Verweilzeiten im Grundwasser

können bis zu mehrere Jahrzehnte betragen. Die simulierten Stickstoffeinträge über den Oberflächenabfluss, Interflow und Dränagen sind insbesondere in den Festgesteinsregionen und in den künstlich entwässerten Niederungsregionen im Westteil der FGE Weser hoch und betragen ca. 75 % des gesamten diffusen Stickstoffeintrags in die Oberflächengewässer. Die Einträge über den Grundwasserpfad in die Oberflächengewässer sind dagegen gering und finden überwiegend im Festgesteinsbereich statt. Hohe Nährstoffkonzentrationen der Hauptläufe in der Ausgangssituation 2003 führen zu einer deutlichen Überschreitung der vorläufigen überregionalen Bewirtschaftungsziele der FGG Weser.

Bis zum Zieljahr 2015 ist nach den Modellrechnungen aufgrund des Baseline Szenarios 2015 insgesamt eine Reduzierung der landwirtschaftlichen Nährstoffbilanzüberschüsse erwartbar. Aufgrund vielfältiger Anpassungsmöglichkeiten sind die Auswirkungen der Düngeverordnung schwer quantifizierbar. Sie werden sich aber erwartungsgemäß besonders in viehstarken Regionen auswirken. Es werden relativ hohe Reduzierungen der Nitratkonzentration im Sickerwasser im durch intensive Viehhaltung geprägten Westteil der FGE Weser erwartet, allerdings bei einem hohen Ausgangswert 2003 und immer noch recht hohen Werten aufgrund des Baseline Szenarios. Gegenüber dem Ausgangsjahr 2003 wird aufgrund des Baseline Szenarios mit einer Reduzierung der Stickstofffrachten in die Küstengewässer von ca. 17 % gerechnet.

Trotz der positiven Entwicklungen aufgrund des Baseline Szenarios ist ein weiterer Minderungsbedarf notwendig, um die Grundwasserziele zu erreichen. Die notwendigen Reduktionen zur Erreichung der Grundwasserziele reichen nicht aus, um gleichzeitig die vorläufigen überregionalen Bewirtschaftungsziele der Oberflächengewässer zu erreichen. Aufgrund der hohen Verweilzeiten im Grundwasser wird selbst eine Fristverlängerung bis 2027 voraussichtlich nicht ausreichen, um die Ziele nach Grundwasserrichtlinie zu erreichen. Zur Erreichung der vorläufigen überregionalen Bewirtschaftungsziele für die Küstengewässer ist ausgehend vom guten chemischen Zustand des Grundwassers für Nitrat eine weitere Frachtreduzierung um ca. 14 % notwendig.

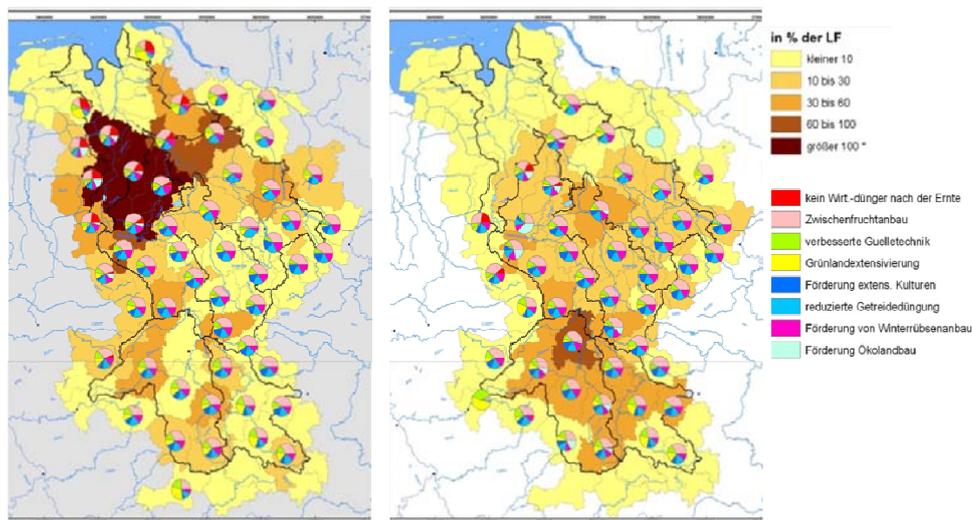


Abb. 2: Maßnahmenszenario zur Erreichung der überregionalen Bewirtschaftungsziele in der Flussgebietseinheit Weser (Kreins et al., 2010)

Nur auf die jeweilige Region zugeschnittene Maßnahmenkombinationen können zu einer nachhaltigen Lösung des Nitratproblems beitragen. Insgesamt sind über das Baseline Szenario 2015 hinaus ergänzende Maßnahmen auf voraussichtlich ca. 1,4 Mio. ha landwirtschaftlich genutzte Fläche notwendig,

um die vorläufigen überregionalen Bewirtschaftungsziele nach EG-WRRL zu erreichen. Die dafür notwendigen geschätzten Gesamtkosten werden sich auf ca. 94 Mio. €/a bzw. 67 €/ha belaufen. In geschätzten 7 % der Gemeinden reichen nach den Modellrechnungen die untersuchten Maßnahmen nicht aus, um das Grundwasserziel und die vorläufigen überregionalen Ziele für die Oberflächengewässer zu erreichen. In Ergänzung hierzu müssten weitere Anstrengungen unternommen werden z. B. durch die Ausdehnung des ökologischen Landbaus, eine weitere Reduzierung der Viehbestände und/oder durch den verstärkten Export von Nährstoffen aus den entsprechenden Regionen.

## Ziele des Projektes AGRUM+

Bei der Durchführung des Modellvorhabens haben sich naturgemäß offene Fragestellungen ergeben, die zu der Entscheidung geführt haben, das Modellvorhaben fortzusetzen. Dies sind u. a. folgende Punkte:

- Das Ausgangsjahr 2003 war ein klimatisches Extremjahr,
- Die statistischen Grunddaten der Landwirtschaft bilden den Sektor nicht hinreichend genau ab,
- 100 % Umsetzungsgrad der Düngeverordnung wird als nicht realistisch angesehen,
- Sickerwasserkonzentration von 50 mg/l als Zielgröße für den Grundwasserschutz ist zu streng,
- Es wurden zunächst nur landwirtschaftliche Maßnahmen betrachtet,
- Maßnahmen zur Reduzierung von Phosphoreinträgen wurden nicht berücksichtigt.

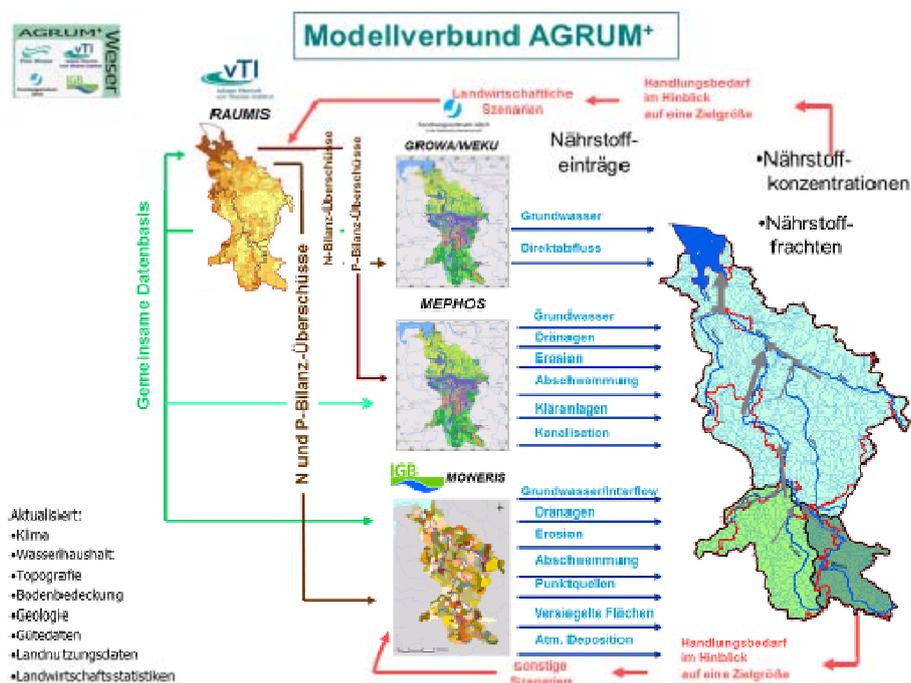


Abb. 3: Modellverbund AGRUM<sup>+</sup>

Vor den Hintergrund der genannten Punkte ist der Modellverbund im Projekt AGRUM<sup>+</sup> weiter entwickelt und um die Modellkomponente MEPHOS [Forschungszentrum Jülich (Tetzlaff et al., 2009)] erweitert worden. Mit einer aktualisierten und erweiterten Datenbasis wird die Unterstützung der Maßnahmenplanung, der Maßnahmenumsetzung sowie der Analyse des Baseline Szenarios in Bezug auf die Reduzierung von Nährstoffeinträgen weiter verbessert. Im Einzelnen sind differenzierte Hin-

weise zu den eintragsrelevanten Bodeneigenschaften sowie zu Fließwegen und Fließzeiten im Grundwasser und im Übergang vom Grundwasser zu den Oberflächengewässern von Bedeutung. Angaben zu relevanten Eintragspfaden und Maßnahmengebieten unterstützen die regionale Auswahl erweiterter Maßnahmen sowie die Festlegung von Gebietskulissen für die zukünftige Förderung von Agrarumweltmaßnahmen. Der bisherige Maßnahmenkatalog wird um Maßnahmen zur Bodenbearbeitung und um Maßnahmen an Kläranlagen und Dränagen erweitert. Auch das Spektrum der Agrarumweltmaßnahmen wird zusätzlich ergänzt. Über Sensitivitätsanalysen sollen mögliche Spannbreiten bei den Ergebnissen deutlicher gemacht werden, was bisher durch eindeutige Annahmen nicht möglich war. Dies trifft sowohl auf ausgewählte konzeptionelle Ansätze innerhalb der Modelle zu, als auch auf den Handlungsbedarf, der sich aus unterschiedlichen Bewirtschaftungszielen ergeben kann. Darüber hinaus soll ein Werkzeug entwickelt werden, das auf der Basis einer Planungseinheit bzw. eines Landkreises die Wirkung von Maßnahmen Szenarien, die selbst anhand vorgegebener Randbedingungen gewählt wurden, darstellt. Damit lassen sich verschiedenste Maßnahmenkonstellationen hinsichtlich Wirkung und Kosten miteinander vergleichen und die Entscheidung für Maßnahmenprogramme vor Ort unterstützen.

### **Strategie des Nährstoffmanagements**

Der Modellverbund stellt das zentrale Element des Nährstoffmanagements in der Flussgebietseinheit Weser dar. Er ermöglicht die eine einheitliche Methodik zur integrativen Analyse der Nährstoffeinträge in Oberflächen- und Grundwasser für eine gesamte Flussgebietseinheit mit Blick auf die Bewirtschaftungsziele für den Grundwasserschutz sowie für den Küsten- und Meeresschutz.

Die Analyse der Nährstoffbilanz erfolgt in 4 Schritten:

1. Abbildung der Nährstoffsituation für einen Ausgangszustand einschließlich einer Betrachtung der Entwicklung der Nährstoffbilanzüberschüsse in der Vergangenheit,
2. Analyse der Auswirkungen grundlegender Maßnahmen und weiterer Rechtsvorschriften (Baseline Szenario),
3. Abschätzung von Handlungsgebieten und des Handlungsbedarfs zur Erreichung der Umweltqualitätsnorm für Nitrat im Grundwasser auf Basis des Baseline Szenarios sowie Auswahl geeigneter Maßnahmen,
4. Abschätzung von Handlungsgebieten und des Handlungsbedarfs zur Erreichung überregionaler Bewirtschaftungsziele für die Oberflächengewässer auf Basis eines guten chemischen Grundwasserzustands sowie Auswahl geeigneter Maßnahmen.

Die Modellergebnisse sollen zum einen dazu dienen, Diskussionen mit Betroffenen vor Ort in den Planungseinheiten zu unterstützen. Zum Zweiten können die Analysen dazu dienen, die Wertigkeit der Nährstoffbelastung einer Planungseinheit innerhalb der gesamten Flussgebietseinheit anzuzeigen. Dafür ist es notwendig, die Ergebnisse in einer Form aufzubereiten, mit der die Ergebnisse in den Ländern nachvollzogen werden können. Z. B. können Steckbriefe für jede Planungseinheit helfen, in denen die Standortsituation der Nährstoffeinträge gegenübergestellt und bewertet wird.

Gesamtziel ist es, diese Steckbriefe und das Maßnahmenauswahlwerkzeug in geeigneter Form zu kombinieren, um ein Nährstoffmanagementinstrument zu erhalten, indem die Randbedingungen und Bewirtschaftungsziele für die gesamte Flussgebietseinheit berücksichtigt werden. Man ist damit in der

Lage, die Maßnahmenplanung in der einzelnen Planungseinheit vorzunehmen, ohne die flussgebietsweiten Bewirtschaftungsziele aus dem Auge zu verlieren.

## **Schlussfolgerungen**

Der integrative Ansatz der Betrachtung von Nährstoffbelastungen, -emissionen und -frachten im gesamten Fließsystem der FGE Weser ist mit Hilfe des Modellverbunds erfolgreich umgesetzt worden. Die Ergebnisse geben flächendifferenzierte Auskünfte über die Nährstoffsituation in der gesamten Flussgebietseinheit. Auswirkungen von Agrarumweltmaßnahmen auf die Nährstoffeinträge können grob quantifiziert und für unterschiedliche zukünftige Randbedingungen des Agrarsektors prognostiziert werden. Darüber können die Kosten für die Umsetzung der Maßnahmen abgeschätzt werden. Die Analyse von Fließzeiten im Grundwasser gibt Hinweise auf die zeitliche Wirkungsweise von Agrarumweltmaßnahmen und zeigt eindeutig, dass die Bewirtschaftungsziele allein aus hydrologischen Gründen nicht bis 2015 zu erreichen sind. Selbst nach theoretischer Erreichung des guten Grundwasserzustands sind darüber hinaus weitere ergänzende Maßnahmen zur Erreichung der vorläufigen Bewirtschaftungsziele in den Oberflächengewässern und im Küstengewässer notwendig.

## **Literatur**

- Rat der Europäischen Union (Hrsg.) (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, 22.12.2000
- FGG Weser (2009): Bewirtschaftungsplan 2009 für die Flussgebietseinheit Weser, 22.12.2009
- Kreins P., Gömann H., Heinrichsmeyer W. (2002): Auswirkungen der Vorschläge der EU-Kommission im Rahmen der Agenda 2000 Halbzeitzeit auf Produktion, Faktoreinsatz und Einkommen der deutschen Landwirtschaft- Modellanalysen auf der Grundlage des Agrarmodells RAUMIS. Agra-Europe 31, Sonderbeilage
- Kreins P., Behrendt H., Gömann H., Heidecke C., Hirt U., Kunkel R., Seidel K., Tetzlaff B., Wendland F. (2010): Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen im Bereich des landwirtschaftlichen Gewässerschutzes vor dem Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie in der Flussgebietseinheit Weser, Landbauforschung, Sonderheft 336
- Kunkel R., Wendland F. (1997): WEKU; a GIS-supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for a supraregional groundwater management. *Environmental Geology* 30 (1-2), 1-9
- Kunkel R., Wendland F. (2002): The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins; the River Elbe case study. *Journal of Hydrology* 259 (1-4), 152-162
- Behrendt H., Bach M., Kunkel R., Opitz D., Pagenkopf W.-G., Scholz G., Wendland F. (2002): Internationale Harmonisierung der Quantifizierung von Nährstoffeinträgen aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer Deutschlands, UBA-Forschungsbericht 82/03
- Osterburg B., Runge T. (Hrsg.) (2007): Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer- eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie, Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 307
- Tetzlaff B., Schreiner H., Vereecken H., Wendland F. (2009): Modellgestützte Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 29

# AMICE: erste internationale Modellrechnung der Maas

Bernhard P. J. Becker<sup>1</sup>, Simone Patzke<sup>1</sup>, Sylvain Detrembleur<sup>2</sup>, Benjamin Dewals<sup>2</sup>,  
Matthias Kufeld<sup>3</sup>, Stoffel Moeskops<sup>4</sup>, Otto de Keizer<sup>1</sup>, Maïté Fournier<sup>5</sup>, Wouter Vanneuville<sup>6</sup>,  
Hendrik Buiteveld<sup>7</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>3</sup>, Michel Pirotton<sup>2</sup> und Paolo Reggiani<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup> Deltares, Delft, Niederlande

<sup>2</sup> Université de Liège, Hydraulics in environmental and civil engineering, Belgien

<sup>3</sup> Rheinisch-Westfälische Techn. Hochschule (RWTH) Aachen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Deutschland

<sup>4</sup> International Marine & Dredging Consultants (IMDC), Antwerpen, Belgien

<sup>5</sup> Etablissement Public d'Aménagement de la Meuse et de ses Affluents (EPAMA), Charleville-Mezieres, Frankreich

<sup>6</sup> Flanders Hydraulics Research, Antwerpen, Belgien

<sup>7</sup> Rijkswaterstaat, Lelystad, Niederlande

<sup>8</sup> RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Rahmen des AMICE-Projektes wurde eine erste zusammenhängende internationale Modellrechnung für den gesamten Flusslauf der Maas inklusive des Nebenflusses Rur durchgeführt. Dazu wurden die in den Anrainerstaaten Frankreich, Belgien, Deutschland und der Niederlande vorgehaltenen numerischen Modelle verwendet. Die Randbedingungen dieser Modelle wurden in einem iterativen Prozess abgeglichen. Die Ergebnisse der zusammenhängenden Simulation tragen zunächst zu einem besseren Systemverständnis bei. Im weiteren Verlauf des Projektes fließen sie in eine Risikobetrachtung ein und werden zur Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserrisikos vor dem Hintergrund zu erwartender Änderung der Bemessungsgrößen infolge einer erwarteten Klimaänderung herangezogen.

## Einleitung

Ziel des Projektes AMICE (Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions) ist es, für die im Einzugsgebiet der Maas (Abb. 1) liegenden Länder Frankreich, Deutschland, Belgien und die Niederlande den Einfluss des Klimawandels auf die Hochwassergefährdung über die Landesgrenzen hinaus einheitlich zu erfassen. Ein wesentliches Instrument dazu sind hydraulische Modelle. In jedem Anrainerstaat werden ein oder mehrere hydraulische Modelle für den in seinem Hoheitsgebiet liegenden Teil der Maas vorgehalten.

## Szenarien

In einer ersten Projektphase wurden drei Szenarien in Form von Maximaldurchflüssen auf Basis des heutigen  $Q_{100}$  definiert (Tab. 1). Das Basisszenario beschreibt damit eine heutige Durchflusssituation mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren ( $Q_{100}$ ) und stellt in allen Anrainerstaaten der Maas einen gängigen Bemessungswert dar. Ausgehend davon ergeben sich zwei mögliche Klimawandel-Szenarien unter der einfachen Annahme, dass der dem Wiederkehrintervall von 100 Jahren zugeordnete Durchfluss sich im Lauf des gegenwärtigen Jahrhunderts um 15 beziehungsweise 30 Prozent erhöht.

## Hydraulische Modelle der Projektpartner

Die verschiedenen Modelle der Projektpartner basieren auf jeweils unterschiedlichen Programmpaketen und weisen unterschiedliche Dimensionalität, Modellansätze und räumliche Auflösungen auf. Abb. 2 enthält eine schematische Darstellung der Modellgebiete und Erläuterungen zum Modellkonzept.

Tab. 1: Szenarien und Bemessungswerte für die Grenzpunkte Chooz (Grenze Frankreich-Belgien) und Eijsden Grens (Grenze Belgien-Niederlande)

Szenario	Zeitraum	Bemessungsdurchfluss Chooz [m <sup>3</sup> /s]	Bemessungsdurchfluss Eijsden Grens [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>100</sub>	Gegenwart	1650	3150
Q <sub>100</sub> + 15 %	2021 – 2050	1898	3623
Q <sub>100</sub> + 30 %	2071 – 2100	2145	4095



Abb. 1: Einzugsgebiet der Maas, Landesgrenzen und größere Städte

## SYNTHESIS OF HYDRAULIC MODELS

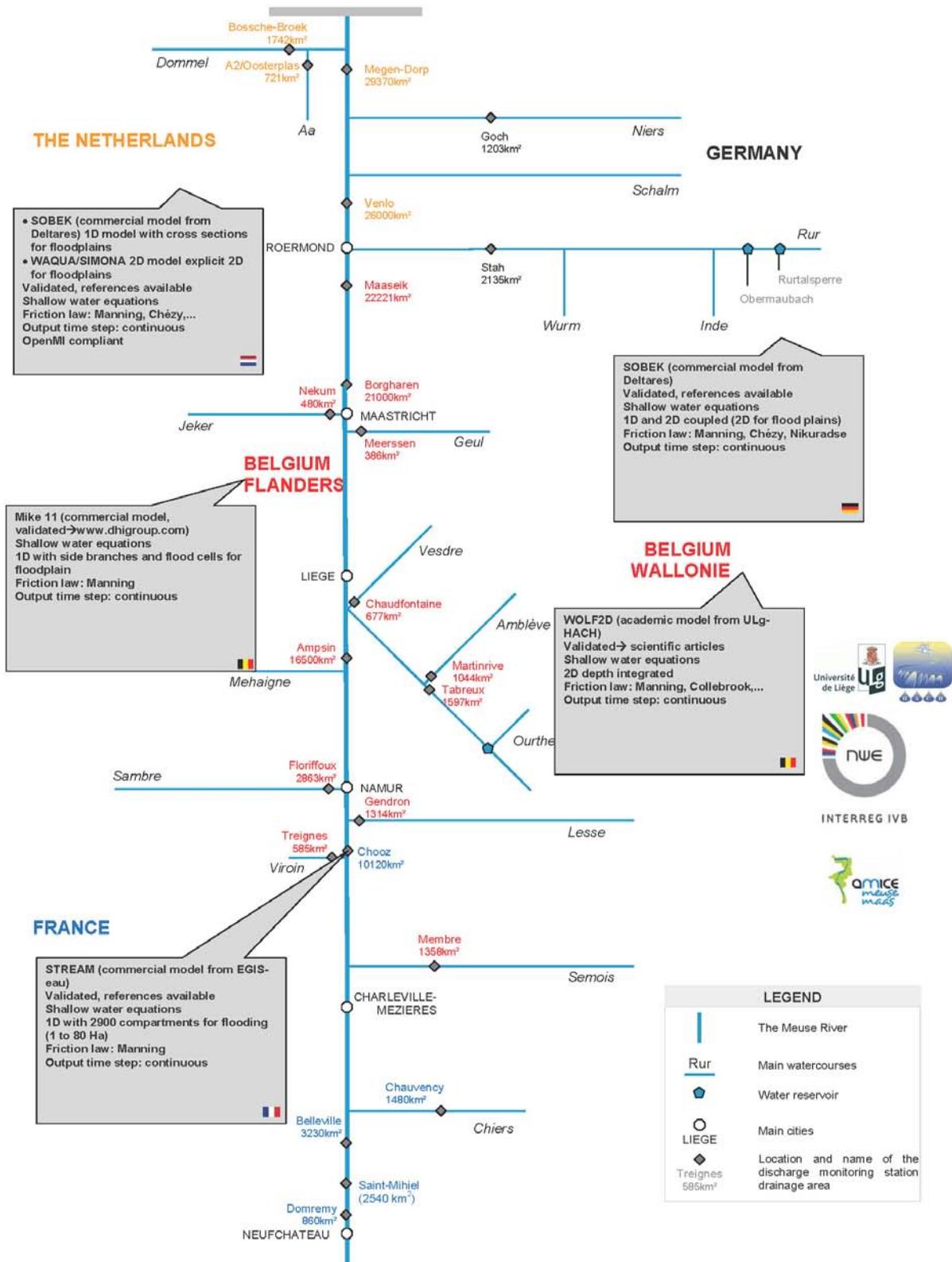


Abb. 2: Schematische Darstellung der Modellgebiete mit Erläuterung der unterschiedlichen Modellierungsansätze

## Randabgleich

Weil die verfügbaren Modelle auf unterschiedlichen Modellkonzepten basieren, können die Modelle nicht ohne weiteres zu einem Gesamtmodell gekoppelt werden. Um eine kohärente Simulation des gesamten Flusslaufs zu realisieren wird deshalb die Methode des Randabgleichs gewählt. An gemeinsamen Modellgrenzen wird im Modell des Oberliegigers eine Wasserstandsrandbedingung angesetzt. Das korrespondierende Modellergebnis ist eine Durchflusskurve. Das Unterliegermodell erhält dagegen eine Durchflussrandbedingung und berechnet als Modellergebnis den Wasserstand. Die Randbedingungen werden nun so aufeinander abgestimmt, dass Durchfluss und Wasserstand an den Modellgrenzen (Landesgrenzen) ausreichend genau übereinstimmen. In Abb. 3 ist der Ablauf des Randabgleichs schematisch dargestellt. Ausgangspunkt für diesen sogenannten Randabgleich sind die mit der Szenariendefinition (Tab. 1) gegebenen Spitzendurchflüsse. Für das stationäre Modell des wallonischen Teils der Maas ist dieser Spitzendurchfluss der Randbedingungswert. Für die instationären Modelle wird auf Basis des Spitzendurchflusses eine Standard-Hochwasserwelle abgeleitet (siehe z. B. Becker et al. 2011 und Dewals et al. 2012). Mit der entsprechenden Schlüsselkurve stehen damit auch die Wasserstände zur Verfügung, die als untere Randbedingung des Oberliegermodells benötigt werden. Während der erste Rechenlauf an den Modellgrenzen noch inkonsistente Ergebnisse lieferte, konnten die Modellergebnisse nach Anpassung der Schlüsselkurven schon in der zweiten Simulationsrunde in ausreichende Übereinstimmung gebracht werden (Detrembleur et al. 2011).

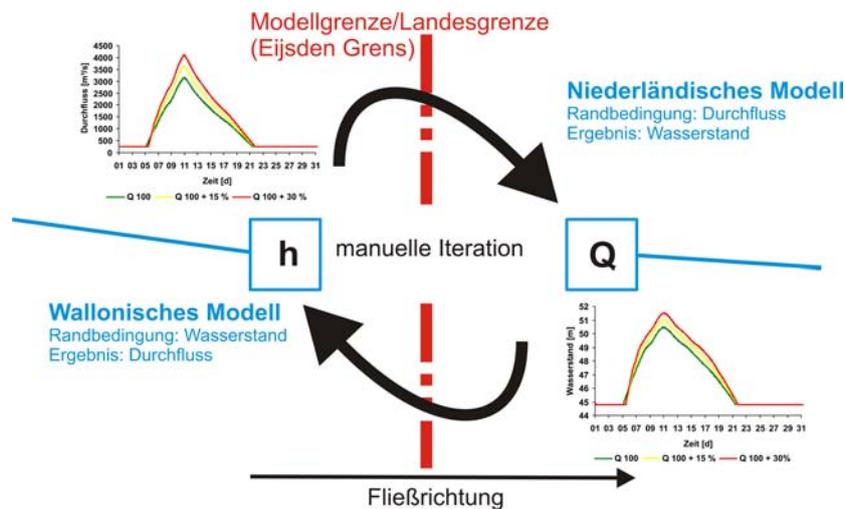


Abb. 3: Ablaufschema des Randabgleichs am Beispiel der gemeinsamen Modellgrenze Belgien (wallonischer Teil) und der Niederlande

## Ergebnisse der grenzüberschreitenden Modellrechnung

Zunächst trägt die zusammenhängende Darstellung von Spitzendurchflüssen (Abb. 4) für den gesamten Flusslauf der Maas bei den Projektbeteiligten zur Verbesserung des Systemverständnisses bei. So spielen in Frankreich die Nebenflüsse eine größere Rolle bei der Abflussbildung als beispielsweise in der Grenzregion zwischen Flandern und den Niederlanden. Im durch steile Felshänge geprägten Flusslauf im wallonischen Teil von Belgien wird eine Hochwasserwelle kaum gedämpft, in den Niederlanden dagegen zeigen sich sehr starke Dämpfungseffekte aufgrund der großen Speicherkapazität des Flachlandes.

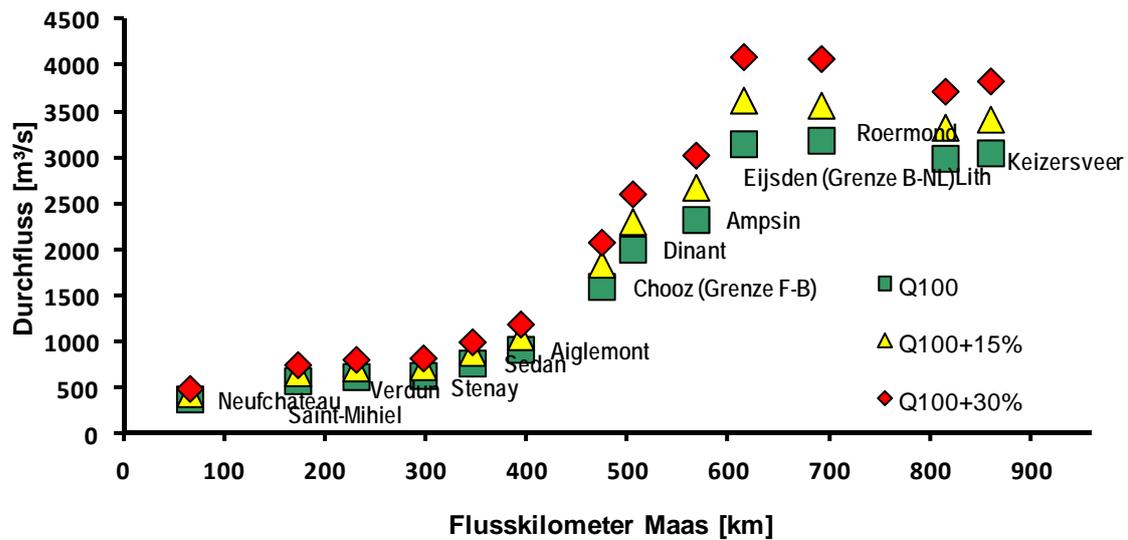


Abb. 4: Spitzendurchflüsse der Szenarien  $Q_{100}$ ,  $Q_{100} + 15\%$  und  $Q_{100} + 30\%$  dargestellt über Flusskilometer der Maas

Die vergleichende Auswertung der Modellrechnungen zeigt, dass der Einfluss eines höheren Bemessungsdurchflusses auf die überflutete Fläche und die Überflutungstiefe in verschiedene Regionen sehr unterschiedlich ist. So wirkt sich im engen Mittellauf der Maas ein höherer Durchfluss zweimal stärker auf die Wassertiefe aus als im durch weite Vorlandbereiche geprägten Ober- und Unterlauf (Detrembleur et al. 2011). Am Beispiel der Überflutungskarte für die Region Lüttich (Abb. 5) wird die Auswirkung einer Durchflusserhöhung beispielhaft deutlich: Gegenwärtig ist das Ausmaß einer bei einem Durchfluss mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren sehr überschaubar. Schon bei einer Erhöhung des Bemessungsdurchflusses um 15 % vergrößert sich die Überflutungsfläche. Bei einer Erhöhung des  $Q_{100}$  um 30 % ist mit einer signifikanten Erhöhung der Überflutungsfläche zu rechnen.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des AMICE-Projektes wurde die erste zusammenhängende hydraulische Modellrechnung der Maas durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt für einige Bereiche entlang der Maas auf, dass noch Anpassungsbedarf an die zu erwartenden größeren Bemessungswerte besteht. Die Simulationsergebnissen werden deshalb im weiteren Verlauf des Projektes zur Schadensberechnung im Rahmen einer Risikobetrachtung und zur Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserschadenspotentials herangezogen. Darüber hinaus hat die internationale Modellrechnung bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zum Wissensaustausch über die Landesgrenzen hinweg geleistet. Ein Beispiel ist die Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden zur Erstellung von synthetischen Bemessungsdurchflusskurven, die in den Niederlanden, im wallonischen und im flämischen Teil Belgiens angewendet werden (Dewals et al. 2012).

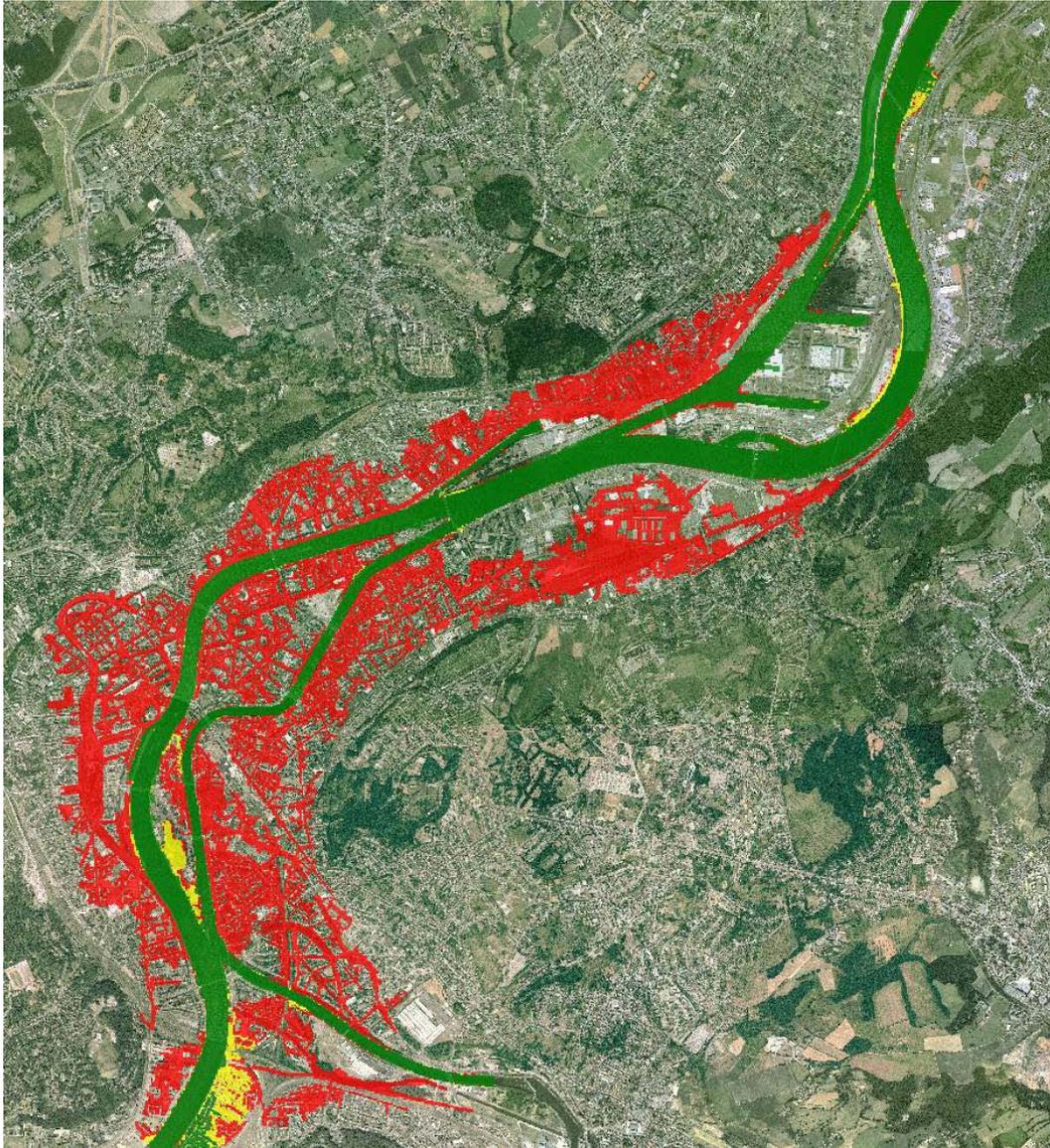


Abb. 5: Überflutungsflächen Stadtgebiet Lüttich für Szenario  $Q_{100}$  (grün),  $Q_{100} + 15\%$  (gelb) und  $Q_{100} + 30\%$  (rot)

## Literatur

- Becker B.; Sprengers C.; Ochterbeck T. (2011): AMICE: Action 6. Hydraulic Sobek-model for the Dutch part of the Meuse. Deltares: Delft. Memo Nr. 1201007-000-ZWS-0014.
- Detrembleur S., Dewals B., Fournier M., Becker B., Guilmin E., Moeskops S., Kufeld M., Archambeau P., de Keizer O., Pontegnien D., Huber N.P., Vanneville W., Buiteveld H., Schüttrumpf H. und Piroton M. (2011): Effects of climate change on river Meuse / Hydraulic modelling from spring to mouth. WP1 report - Action 6. Eine Zusammenfassung des Berichts ist abrufbar unter [http://www.amice-project.eu/docs/pa1\\_pr4\\_1326132512\\_Summary\\_WP1\\_Action6\\_VF\\_en.pdf](http://www.amice-project.eu/docs/pa1_pr4_1326132512_Summary_WP1_Action6_VF_en.pdf).
- Dewals B., Detrembleur S., Becker, B., Moeskops S., Ercicum S., de Keizer O., Vanneville W., Buiteveld H., Piroton M., Archambeau P. (2012): Transboundary assessment of the effect of climate change on river Meuse: flood wave selection for hydraulic modelling from Aampsin (B) to Maaseik (NL). Beitrag Nr. 42621, 2nd IAHR Europe Congress, München, 27.-29. Juni 2012.

# Probenahmestrategien der Bodenseeanrainerstaaten – Konsequenzen für Prognosen von Stofffrachten und Wasserqualität

Philipp Schneider<sup>1</sup> und Harald Hetzenauer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Geographie, Universität Zürich, Schweiz

<sup>2</sup> Institut für Seenforschung, Langenargen, Deutschland

## Zusammenfassung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) definiert für die Bewertung und Untersuchung der Gewässerqualität von europäischen Wassereinzugsgebieten Mindeststandards. In der wasserwirtschaftlichen Praxis führt dies in Europa zu heterogenen Datensätzen, die nur sehr bedingt vergleichbar sind. Hinsichtlich des Monitorings von hydrochemischen Wasserqualitätsparametern ist in der Wasserrahmenrichtlinie zwar eine Mindestzahl an Wasserproben pro Jahr spezifiziert, für die Wahl der anzuwendenden Probenahmestrategie gibt es hingegen keine konkrete Empfehlungen, Kriterien oder Vorgaben. Für zuverlässige, langjährige Betrachtungen der Stofffrachten und zur Identifikation von Wasserqualitätstrends spielt jedoch die angewandte Probenahmestrategie eine zentrale Rolle. Am Beispiel der Bodenseeanrainerstaaten Deutschland, Österreich und der Schweiz wird in dieser Studie aufgezeigt, wie unterschiedliche Probenahmestrategien zu nur bedingt vergleichbaren, heterogenen Datensätzen führen. Die unterschiedlichen Probenahmestrategien tragen wesentlich dazu bei, dass sich aktuell die Entwicklung der Nährstoffkonzentrationen im See nicht mit den Nährstofffrachten der Zuflüsse in Einklang bringen lassen und beeinträchtigen somit Prognosen über die Entwicklung der Wasserqualität des Bodensees. In diesem Beitrag werden Lösungsansätze für dieses Problem aufgezeigt, indem verschiedene Probenahmestrategien verglichen und hinsichtlich ihre Aussagekraft für Frachtermittlungen bewertet werden.

## Repräsentative Probenahme

Die Beprobung von Fließgewässern zur Bestimmung von Wasserqualitätsparametern erfordert Kompromisse hinsichtlich der räumlichen- und zeitlichen Variabilität und der zur Verfügung stehenden Mitteln technischer und finanzieller Art (Chapman, 1996). Oberflächennah am Ufer genommene Schöpfproben (Einzelproben bzw. Stichproben) sind bei der Wasserqualitätskontrolle von Fließgewässern nach wie vor weit verbreitet – z.B. in Österreich an Alpenrhein und Bregenzer Aach (Abb. 1) – da sie die einfachste und kostengünstigste Art der Probenahme darstellen. Eine Probenahmestelle ist so zu wählen, dass eine vollständige Durchmischung einer flussaufwärts gelegenen Einleitung bzw. eines Zuflusses sichergestellt ist (DIN 38402-15, 2007).

Die saisonale und ereignisspezifische Variabilität z.B. von P-Konzentrationen im Flusswasser (Jarvie et al., 1998; Lazzarotto et al., 2005; Schneider, 2007; Svendsen et al., 1995) erfordert eine entsprechende Anpassung der Probenahmestrategie. Um die *zeitliche Variabilität* adäquat zu erfassen, spielt – neben der probenahmespezifischen Verteilung von systematischen und zufälligen Messfehlern – insbesondere die Beprobungsfrequenz eine zentrale Rolle (Kronvang and Bruhn, 1996; Stevens and

Smith, 1978; Walling and Webb, 1982). Für repräsentative Beprobungen zur Frachtermittlung von Nähr- und Schadstoffen in Fließgewässern ist die gewählte Probenahmeart von zentraler Bedeutung.

## Probenahmearten

Die *Einzelprobe* stellt die einfachste Form der Probenahme dar – sie benötigt keine zusätzliche Geräte wie z.B. automatische Probenahmegeräte. Sie umfasst eine in Bezug auf Zeit und/oder Ort zufällig durch einmalige Entnahme (meist durch Schöpfen) aus einem Wasserkörper gewonnene Probe (DIN 38402-11, 2007; DIN 38402-15, 2007). Sie wird meist in der Form einer oberflächennah am Flussufer genommenen Schöpfprobe manuell durchgeführt. Die *Zufallsprobenahme* ist eine Probenahme, bei der eine Streubreite der Konzentration eines Parameters zu erwarten ist, die der aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Konzentration des fraglichen Parameters abgeleiteten Streuung entspricht (DIN 38402-15, 2007). Die *Stichprobe* umfasst eine oder mehrere unmittelbar nacheinander entnommene und vereinigte Einzelproben zur Beurteilung eines momentanen Zustandes (DIN 38402-11, 2007; DIN 38402-15, 2007). Sie wird meist ebenfalls in der Form einer oberflächennah am Flussufer genommenen Schöpfprobe manuell durchgeführt. Die *qualifizierte Stichprobe* ist eine Sonderform der Mischprobe, bestehend aus mindestens fünf Stichproben, die in einem Zeitraum von höchstens 2 h im Abstand von nicht weniger als 2 min entnommen und gemischt wurde (DIN 38402-11, 2007; DIN 38402-15, 2007). Sie wird v.a. bei der Einleiterüberwachung eingesetzt.

Die *systematische Probenahme* ist eine Probenahme, bei der die Proben in vorher festgelegten Intervallen, oft in gleichen Zeitabständen, entnommen werden (DIN 38402-15, 2007). Die *Mischprobe* besteht aus zwei oder mehreren einzeln oder kontinuierlich entnommene Proben, die in geeignetem, bekannten Verhältnis vermischt wurden, um aus der Mischung den Durchschnittswert eines gewünschten Merkmals zu bestimmen (DIN 38402-15, 2007). Die *automatische Probenahme* ist eine Probenahme, bei der Proben entweder einzeln oder kontinuierlich nach einem vorbestimmten Programm automatisch entnommen werden (DIN 38402-15, 2007). Die *zeitproportionale Durchschnittsbeprobung* – beispielsweise in Form der Tagesmischprobe wie an der Schussen/D (Abb. 1) – ist eine Mischprobe, die sich aus Einzelproben zusammensetzt, die in vordefinierten Zeitabständen (z.B. 15-minütig oder stündlich) über einen definierten Zeitraum (z.B. Tag oder Woche) unabhängig vom Abflussgeschehen gezogen wird. Die *volumenproportionale Durchschnittsbeprobung* ist eine abflussproportionale Mischprobe, d.h. jede Teilprobe ist einem definierten probenahmeauslösenden Durchflussvolumen zuzuordnen (z.B. Alpenrhein/CH, NADUF-Station Diepoldsau, Abb. 2). Die Probenahmehäufigkeit ist dabei direkt an das Abflussgeschehen gekoppelt. Hierzu muss an der Probenahmestelle eine Wasserstands-Abflussbeziehung vorliegen und kontinuierliche Pegelmessungen erfolgen. Deshalb eignet sich diese Form der Probenahme besonders in der Umgebung von Abflussmessstationen.

## Ergebnisse und Diskussion

Schlussendlich stellt eine manuelle Schöpfprobe (Einzelprobe) räumliche eine Punktmessung und zeitlich eine Einzel- bzw. Stichprobe dar, deren limitierter Aussagekraft zu gravierenden Abweichungen (meist zu Unterschätzungen) bei der Konzentrationsbestimmung von abflussabhängigen Wasserqualitätskomponenten führt. Hinsichtlich der Erfassung von Stofffrachten kommt der Probenahmestrategie eine entscheidende Bedeutung zu. Vergleicht man die Durchschnittsbeprobung

(z.B. zeitproportional, Abb. 1 Schussen/D bzw. abflussproportional, Abb. 2 Alpenrhein/CH) z.B. mit monatlichen Einzel-/Stichproben gemäss WRRL (Abb. 1 Bregenzer Aach/A), sind die erfassten Konzentrationen – und entsprechend auch die Frachten – häufig um eine Grössenordnung zu niedrig (Eggestad et al., 1994; Haraldsen and Stalnacke, 2006; Kronvang and Bruhn, 1996; Schneider, 2007; Stevens and Smith, 1978). Bei Einzel-, Stich- bzw. Stichtagsbeprobungen mittels Schöpfprobe werden überwiegend Niedrigwassersituationen erfasst, während höhere Abflüsse deutlich unterrepräsentiert sind (siehe Abb. 1). Insbesondere im Falle von Stoffbilanzen sind jedoch Hochwasserabflüsse mit hohen Stoffkonzentrationen und hohem Abflussvolumen von grosser Bedeutung (Lazzarotto et al., 2005; Schneider, 2007). Aufgrund unterschiedlicher Konzentrationsdynamik und Hystereseverläufen bei verschiedenen Abflussereignissen ist zur Ermittlung von Stofffrachten grundsätzlich eine volumenproportionale Beprobung der Berechnung anhand von Abfluss-Konzentrationsbeziehungen vorzuziehen. Besonders für die prozessnahe Modellierung von Nährstoffeinträgen ist auf eine Datengrundlage mit hoher zeitlicher Auflösung zu achten.

Trotz verbesserter technischer Möglichkeiten – z.B. von Probenahmegeräten oder in situ-Messung von Nährstoffen wie gelöstem Phosphor (Cleary et al., 2007; Cleary et al., 2008; Hanrahan et al., 2001; Ingildsen and Olsson, 2002; Lazzarotto et al., 2005; Wiryawan, 2000) – wird dieser Fortschritt bei kontinuierlichen, überregionalen Messnetzen nach wie vor wenig berücksichtigt. Einerseits fordert die WRRL (European Commission, 2000) eine Einschätzung und Ermittlung der aus städtischen, industriellen, landwirtschaftlichen und sonstigen Anlagen und Tätigkeiten stammenden signifikanten Verschmutzungen durch diffuse Quellen (European Commission, 2000, Anhang II). Andererseits wird bzgl. der Überwachungsfrequenz von Flüssen nur ein Untersuchungsintervall von einem bzw. drei Monaten für alle physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten empfohlen (European Commission, 2000, Anhang V). Diese Empfehlung steht in Widerspruch zur Vorgabe der WRRL, dass mit der gewählten Überwachungsfrequenz der natürlich oder anthropogen bedingten Schwankungsbreite von Parametern Rechnung zu tragen ist. Ob die Qualität von Daten gemäss dieser Empfehlungen ausreicht um Modellrechnungen durchzuführen, Handlungsempfehlungen abzuleiten oder gar Prognosen hinsichtlich der Entwicklung des ökologischen Zustands von Gewässern abzugeben, ist fraglich.

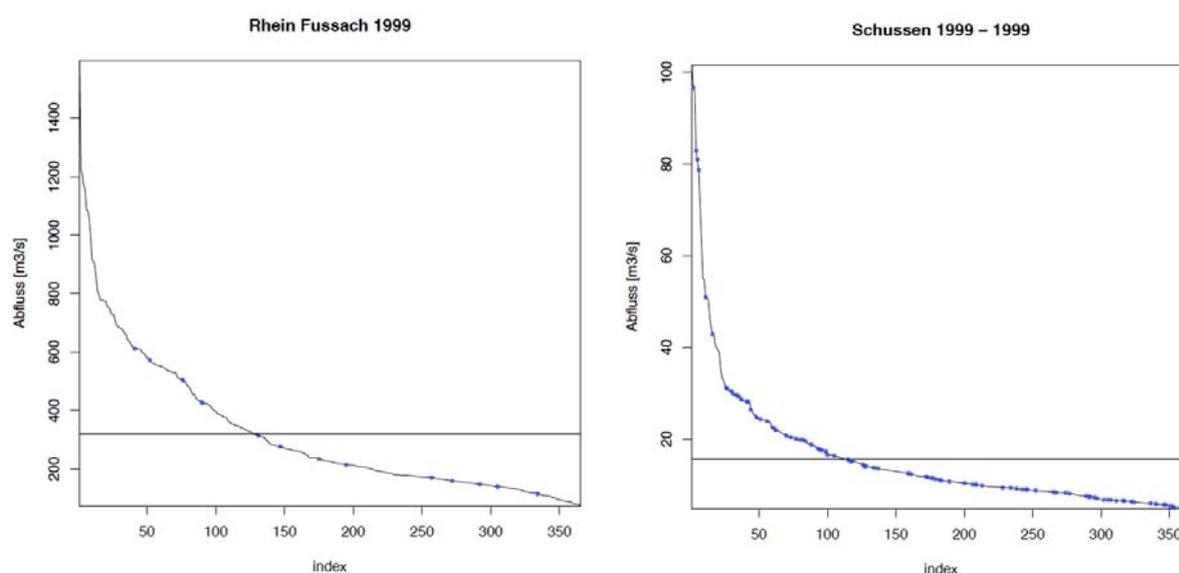


Abb. 1: Abflussdauerlinie und Verteilung der Probenahmezeitpunkte (Punkte) für verschiedene Probenahmestrategien am Beispiel von Alpenrhein/Fussach (eine Stichprobe/Monat, links) und Schus-

sen (ausgewählte zeitproportionale Tagesmischproben, rechts). Die horizontale Linie repräsentiert den mittleren Jahresabfluss (MQ). Im Falle der *Monats-Stichprobe* – gemäss Anforderung der WRRL – liegen für den Alpenrhein bei Fussach/A nur vier Proben im Hochwasserbereich. Diese Ereignis-Proben liegen zufällig verteilt im steigenden oder im fallenden Ast der Abflussganglinie und können infolge von Hysterese-Effekten wenig repräsentativ sein.

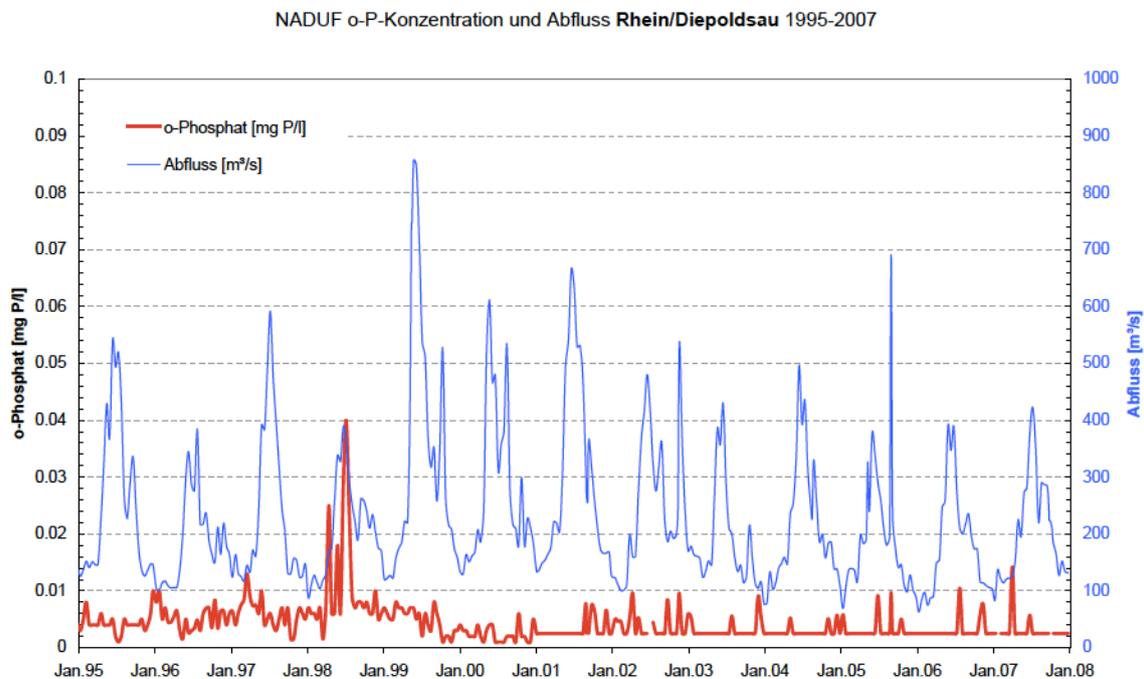


Abb. 2: Ganglinie von Abfluss und Orthophosphat(o-P)-Konzentration der NADUF-Station Diepoldsau/CH des Alpenrheins (*14-tägige volumenproportionale Durchschnittsbeprobung*). Im Januar 2001 wurde die Analytik für o-P umgestellt und dadurch die Nachweissgrenze verändert.

## Empfehlungen

Alpenrhein, Bregenzer Aach, Argen und Schussen sind für Nährstoffeinträge in den Obersee prägend. An diesen Hauptzuflüssen ist die *volumenproportionale Durchschnittsbeprobung* empfehlenswert, da diese sich besonders zur Ermittlung von Stofffrachten eignet. Eine Alternative stellt die *zeitproportionale Durchschnittsbeprobung* dar, wobei hier durch eine vordefinierte Probenauswahl – z.B. der Tag mit dem höchsten Tagesabfluss sowie der jüngsten Tagesmischprobe je Woche – der Analyseaufwand bei guter Abdeckung des Abflussspektrums reduziert werden kann (z.B. Abb. 1 Schussen). Hauptnachteil der zeitproportionalen gegenüber der volumenproportionalen Durchschnittsbeprobung ist die methodisch bedingt grösseren Unsicherheiten infolge variabler Konzentrations-Abfluss-Beziehung bzw. Hysterese-Effekte. Generell anzustreben ist eine Vereinheitlichung der Probenahmestrategie an den massgeblichen Hauptzuflüssen – d.h. im Falle des Bodensees aller Zuflüsse mit einem Volumen- bzw. Stofffracht-Anteil > 5-10%.

Für die kontinuierliche Erhebung von Mischproben ist die Installation von automatischen Probenahmegeräten erforderlich, wie sie z.B. zur Überwachung von Kläranlagen eingesetzt werden. Um Synergien zu nutzen, wird eine Installation/Probenahme möglichst in Pegelnähe empfohlen – einerseits um auf Wasserstands-Abflussbeziehungen und langjährige Messreihen zurückgreifen zu

können, andererseits um die vorhandene Infrastruktur optimal nutzen zu können (Zufahrt, Pegelhaus, Strom- ggf. Internetanschluss). Letztendlich sollten massgebliche Zuflüsse bedeutender Oberflächengewässer – insbesondere wenn diese direkt zur Trinkwasserversorgung dienen – in gleicher Quantität und Qualität untersucht werden, wie Einleitungen aus Kläranlagen. Dort sind automatische Probenahmegeräte seit Jahren Standard.

## Literatur

- Bartram, J., and R. Balance (1996), *Water Quality Monitoring. A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies.*, 1st ed., 348 pp., E. and F.N. Spon, London.
- Chapman, D. (1996), *Water Quality Assessments. A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.*, 2nd ed., 651 pp., E. and F.N. Spon, London.
- Cleary, J., et al. (2007), *Field-deployable microfluidic sensor for phosphate in natural waters*, 1001-1004 pp.
- Cleary, J., et al. (2008), An autonomous microfluidic sensor for phosphate: On-site analysis of treated wastewater, *Ieee Sensors Journal*, 8(5-6), 508-515.
- DIN 38402-11, D. I. f. N. (2007), Teil 11: Probenahme von Abwasser (A11) in *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A)*, edited, p. 21, Beuth, Berlin.
- DIN 38402-15, D. I. f. N. (2007), Teil 15: Probenahme aus Fließgewässern (A15) ENTWURF, in *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A)*, edited, p. 24, Beuth, Berlin.
- Eggestad, H., et al. (1994), Stofftransport og prøvetaking i nedborfelt., 67-72 pp, Technical Report 1994/24, Jordforsk, As (Norge).
- European Commission (2000), Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy, *Official Journal of the European Community*, L327, 1-72.
- Hanrahan, G., et al. (2001), High temporal resolution field monitoring of phosphate in the River Frome using flow injection with diode array detection, *Analytica Chimica Acta*, 440(1), 55-62.
- Haraldsen, T. K., and P. Stalnacke (2006), Methods for water quality sampling and load estimation in monitoring of Norwegian agricultural catchments, *Nordic Hydrology*, 37(1), 81-92.
- Horowitz, A. J. (1996), Spatial and temporal variations in suspended sediment and associated trace elements - Requirements for sampling, data interpretation, and the determination of annual mass transport, in *Advances in Limnology 47 - Suspended Particulate Matter in Rivers and Estuaries*, edited by W. Michaelis, pp. 515-536.
- Horowitz, A. J., et al. (1996), Problems associated with using filtration to define dissolved trace element concentrations in natural water samples, *Environmental Science & Technology*, 30(3), 954-963.
- Ingildsen, P., and G. Olsson (2002), Exploiting online in-situ ammonium, nitrate and phosphate sensors in full-scale wastewater plant operation, *Water Science and Technology*, 46(4-5), 139-147.
- Jarvie, H. P., et al. (1998), Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: Speciation, sources and biological significance, *Science of the Total Environment*, 210(1-6), 79-109.

- Kotlash, A. R., and B. C. Chessman (1998), Effects of water sample preservation and storage on nitrogen and phosphorus determinations: Implications for the use of automated sampling equipment, *Water Research*, 32(12), 3731-3737.
- Kronvang, B., and A. J. Bruhn (1996), Choice of sampling strategy and estimation method for calculating nitrogen and phosphorus transport in small lowland streams, *Hydrological Processes*, 10(11), 1483-1501.
- Lazzarotto, P., et al. (2005), Phosphorus export dynamics from two Swiss grassland catchments, *Journal of Hydrology*, 304(1-4), 139-150.
- Leeks, G. J. L., et al. (1997), The LOIS river monitoring network: Strategy and implementation, *Science of the Total Environment*, 194, 101-109.
- Rekolainen, S., et al. (1991), Evaluation of the accuracy and precision of annual phosphorus load estimates from 2 agricultural basin in Finland. *Journal of Hydrology*, 128(1-4), 237-255.
- Schneider, P. (2007), Hydrologische Vernetzung und ihre Bedeutung für diffuse Nährstoffeinträge im Hotzenwald / Südschwarzwald, PhD thesis, 174 pp, Universität Basel, Basel.
- Stevens, R. J., and R. V. Smith (1978), Comparison of discrete and intensive sampling for measuring loads of nitrogen and phosphorus in river Main, county Antrim., *Water Research*, 12(10), 823-830.
- Svendsen, L. M., et al. (1995), Dynamics of phosphorus-compounds in a lowland river system - importance of retention and nonpoint sources. *Hydrological Processes*, 9(2), 119-142.
- Walling, D. E., and B. W. Webb (1982), The design of sampling programmes for studying nutrient dynamics., paper presented at International Symposium on Hydrological Research Basins and their use in Water Resources Planning, Bern, 21.-23. September 1982.
- Wiryanawan, A. (2000), Use of flow injection analysis for continuous monitoring of river water quality, *Laboratory Robotics and Automation*, 12(3), 142-148.

# Optimale integrierte Bewirtschaftung gekoppelter Grundwasser-Landwirtschaft Hydrosysteme

Jens Grundmann, Niels Schütze und Franz Lennartz

Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, Deutschland

## Zusammenfassung

Um langfristig die Verfügbarkeit von Wasser in küstennahen ariden Gebieten zu sichern, sind im Lichte des globalen Wandels zuverlässige und hocheffiziente Methoden für eine integrierte Bewirtschaftung der knappen Wasserressourcen erforderlich. Dieses Ziel wird durch die Entwicklung eines neuartigen Bewirtschaftungssystems verfolgt, das die gekoppelten, dynamischen Prozesse zwischen Grundwasserleiter und Landwirtschaft in eine simulationsbasierte Optimierungsumgebung integriert. Dabei kombinieren wir physikalisch basierte Prozessmodellierung mit Methoden der künstlichen Intelligenz zur Konstruktion geeigneter Ersatzmodelle, um eine robuste und schnelle Anwendung des Bewirtschaftungssystems im Hinblick auf Wasserquantität und Wasserqualität zu erreichen. Wir demonstrieren die neue Methodik anhand der Süd-Batinah Region des Sultanats Oman, die von Meerwasserintrusion in einen Küstengrundwasserleiter infolge exzessiver Grundwasserentnahmen für die Bewässerungslandwirtschaft geprägt ist. Das Beispiel zeigt die Effizienz und Funktionalität des simulationsbasierten Bewirtschaftungssystems zur Optimierung und Bewertung verschiedener Bewässerungspraktiken, Anbaumuster und resultierenden Grundwasserentnahmen. Im Ergebnis der Optimierungsläufe wird deutlich, dass aufgrund vorhandener Zielkonflikte, wie z.B. kurzfristiger landwirtschaftlicher Profit vs. langfristige Nutzung des Grundwasserleiters, eine multikriterielle Optimierung nachhaltige Lösungen für die Bewirtschaftung der Ressourcen sowohl in Bezug auf die Umwelt als auch die Sozioökonomie bereitstellen kann.

## Einleitung

Gekoppelte Grundwasser - Landwirtschaft Hydrosysteme sind weltweit verbreitet. Speziell in ariden Regionen sind derartige Systeme aufgrund limitierter Wasserressourcen für die Grundwasserneubildung und einen ständig steigenden Wasserbedarf der Bewässerungslandwirtschaft sowie den zunehmenden Bevölkerungszahlen besonders gefährdet. Hinzu kommen Probleme der Wasserqualität, wenn insbesondere bei küstennahen Grundwasserleitern eine fortschreitende Absinkung der Grundwasserspiegel eine Intrusion von Meerwasser in den Aquifer bewirkt. Wird wie z.B. in der Batinah Region des Sultanats Oman dieses Grundwasser für die Bewässerung eingesetzt, so führt deren zunehmende Versalzung zu einer Schädigung wertvoller landwirtschaftlicher Ressourcen sowie der ökonomischen Basis der Landwirte. Ähnliche Beispiele sind an den Küsten Mexikos, Australien und des Mittelmeerraumes zu finden.

Um gerade im Lichte des globalen Wandels und der damit verbundenen Unsicherheiten langfristig die Bewirtschaftung derartig gekoppelter Systeme zu sichern, sind für eine zuverlässige Beschreibung der nichtlinearen Phänomene und Interaktionen zwischen den Kompartimenten Grundwasser und Land-

wirtschaft physikalisch basierte Modelle sowie die Anwendung von Optimierungsmethoden zur Identifikation bestmöglicher Bewirtschaftungspraktiken notwendig. Allerdings ist eine direkte Anwendung derartig komplexer Hydrosystemmodelle in Verbindung mit Optimierung schwierig, da insbesondere lange Simulationszeiten der Modelle die Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme verhindern (Loucks und van Beek, 2005). Bisher wird versucht, dieses Problem zu umgehen, indem zum Einen stark vereinfachte Modelle eingesetzt werden, um die Bewirtschaftungsprobleme mit herkömmlichen Optimierungsmethoden (z.B. linearer Optimierung) zu lösen oder indem zum Anderen anstelle einer Optimierung lediglich eine kleine Anzahl alternativer „Was ist wenn - Szenarios“ simuliert und aus der subjektiv generierten Stichprobe die beste Alternative in Bezug auf das Bewirtschaftungsziel gewählt wird (Harou et al., 2009, Schütze et al., 2011).

Im Rahmen unserer Forschung entwickeln wir einen alternativen Ansatz, der auf zwei Prinzipien aufbaut, nämlich der simulationsbasierten Optimierung und der Dekomposition individueller Optimierungsprobleme. Dabei zielt die simulationsbasierte Optimierung auf die Entwicklung von Optimierungsstrategien und Suchverfahren, die auf komplexe Simulationsmodelle angewandt werden können ohne die Beschränkungen der zuvor charakterisierten Auswege in Kauf nehmen zu müssen. Dieses Verfahren wird bereits seit kurzem erfolgreich zur Bewirtschaftung küstennaher Aquifere angewandt, wobei meist Künstliche Neuronale Netze als Ersatzmodelle anstelle von Grundwasserströmungsmodellen zum Einsatz kommen (Bhattacharjya und Datta, 2009; Schütze et al., 2011).

Innerhalb dieses Beitrages präsentieren wir einige Kernpunkte des neuartigen integrierten simulationsbasierten Bewirtschaftungssystems für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung arider Regionen. Dabei wird demonstriert, wie ein eng gekoppeltes Grundwasser - Landwirtschaft Hydrosystem in eine multikriterielle Optimierungsumgebung integriert werden kann, um optimale Bewirtschaftungsstrategien unter verschiedenen, meist gegensätzlichen Gesichtspunkten und Zielen zu ermitteln. Anhand einer beispielhaften Anwendung für die Süd-Batinah Region des Sultanats Oman, illustrieren wir die Funktionalität des Bewirtschaftungssystems zur multikriteriellen Entscheidungsfindung.

## **Methode**

Das simulationsbasierte integrierte Wasserbewirtschaftungssystem, dargestellt in Abbildung 1, besteht aus drei Hauptkomponenten: (a) dem Grundwassermodul zur Berechnung des Verhaltens des Aquifers, (b) dem Landwirtschaftsmodul zur Simulation der landwirtschaftlichen Produktion und (c) der Optimierungsumgebung, die beide Module miteinander verknüpft.

Das Verhalten des Aquifers inklusive des Phänomens der Meerwasserintrusion wird durch ein künstliches neuronales Netz (KNN), genauer ein Multilayer Perzeptron Netz (Nabney 2002), simuliert. Dazu wurde zunächst eine Szenariodatenbank generiert, die die Ergebnisse eines 3D dichteabhängigen Grundwasserströmungsmodells basierend auf dem OpenGeoSys Softwarepaket (Kolditz et al. 2008) für realistische Entnahmeszenarien und Konfigurationen enthält, und an der anschließend das Training des KNN erfolgte (siehe Abb. 1a).

Für die Simulation der landwirtschaftlichen Produktion wird eine Datenbank von Pflanzenertragsfunktionen (crop water production functions - CWPf) verwendet, die den Zusammenhang zwischen eingesetzter Wassermenge und erzieltm Ertrag für gegebene Kombinationen von Pflanze/Boden/Klima unter der Annahme einer optimalen Wasseraufbringung beschreiben. Die Erstellung der CWPf erfolgt mit Hilfe der OCCASION-Methodik (Schütze und Schmitz, 2010), bei der neben einem Wettergenera-

tor auch der GET-OPTIS evolutionäre Optimierungsalgorithmus für ein optimale Bewässerungsplanung und Steuerung sowie das SVAT-Modell APSIM (Keating et al., 2003) zur Simulation des Was-

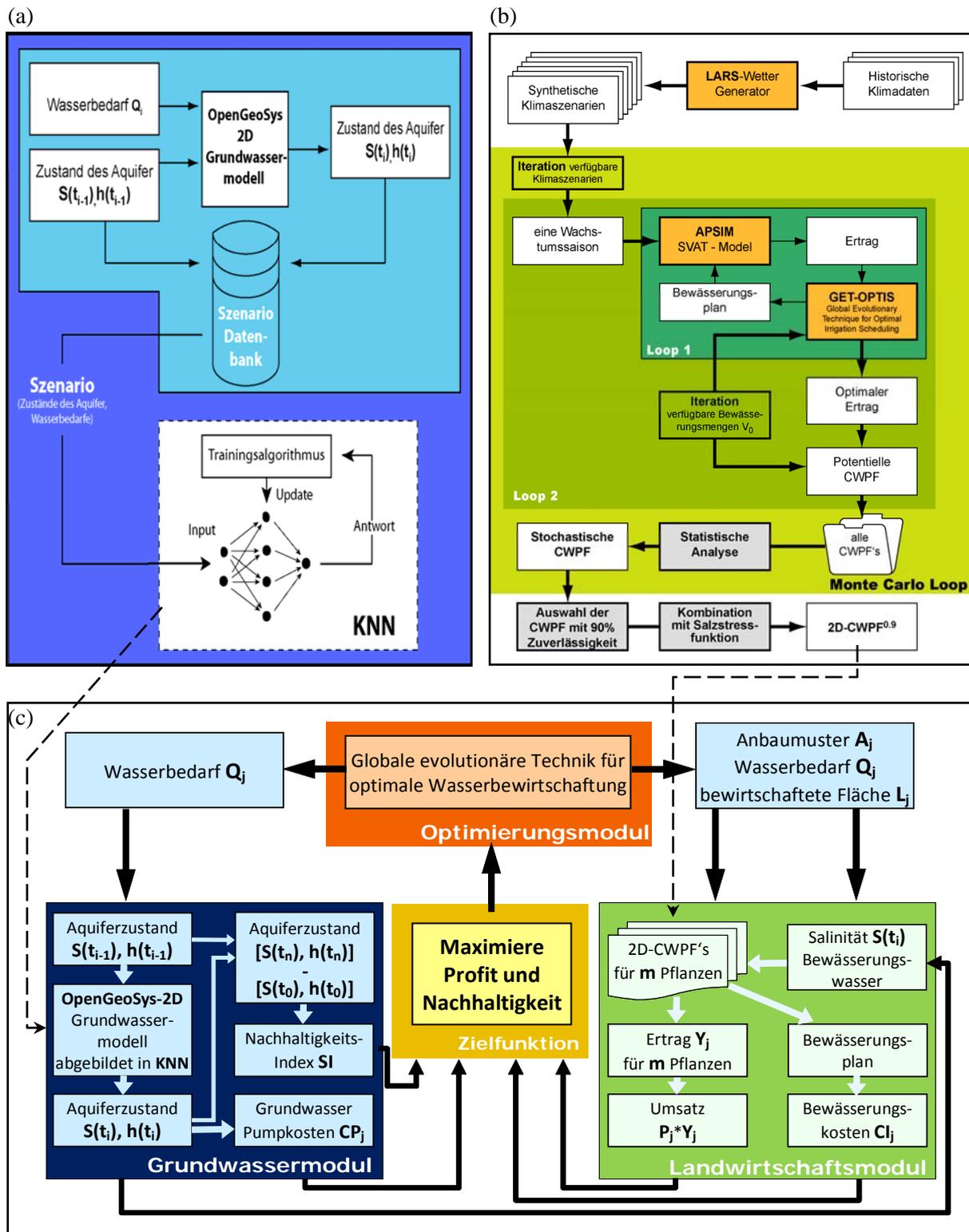


Abb. 1: Methodik zur Erstellung des Grundwasserersatzmodells (KNN) (a) der zweidimensionalen Pflanzenertragsfunktionen für eine Ertragszuverlässigkeit von 90% (b) sowie deren Verknüpfung in einer Optimierungsumgebung zur Ableitung optimale Bewirtschaftungsstrategien

sertransports und des Pflanzenwachstums zum Einsatz kommen. Aus den resultierenden stochastischen CWPF's werden, um Wachstumsstress durch die Verwendung salzhaltigen Bewässerungswassers zu berücksichtigen, die CWPF mit 90% Ertragszuverlässigkeit ausgewählt und um eine zweite Dimension durch Verwendung des Salz-Toleranz-Index (Steppuhn et al., 2005) erweitert. Die dabei entstehende 2D-CWPF<sup>0.9</sup> ermöglicht nun eine Ertragsprognose in Abhängigkeit der Wassermenge und -qualität und erlaubt eine Auswahl der Anbaumuster in Bezug auf die Salztoleranz der Anbaukulturen (siehe Abb. 1b).

Die Optimierungsumgebung (Abb. 1c) verknüpft das Grundwasser- mit dem Landwirtschaftsmodul und zielt auf deren optimale Bewirtschaftung in Bezug auf Wassermenge und -güte entsprechend der formulierten Zielfunktion (Gleichung 1). Zu diesem Zweck verwenden wir den CMA-ES globalen evolutionären Optimierungsalgorithmus (Hansen, 2006), um optimale Wasserentnahmen, Anbaumuster und bewirtschaftete Flächengrößen über einen Simulationszeitraum zu bestimmen. Dabei werden sowohl die erwirtschafteten Erträge und daraus resultierenden Umsätze sowie die anfallenden Kosten für die landwirtschaftliche Produktion erfasst und zusammen mit einem Nachhaltigkeitsindex, der den Aquiferzustand zu Beginn und am Ende der Simulationsperiode beschreibt, in der Zielfunktion berücksichtigt. Die Verwendung variierender Wichtungen zwischen den gegensätzlichen Optimierungszielen Profit und Nachhaltigkeit ermöglicht die Durchführung einer multikriteriellen Optimierung.

$$\max(OF) = w_1 \sum_{i=1}^n \left[ \left( \sum_{j=1}^m P_j Y_j(t_i) - CI_j(t_i) \right) - CP(t_i) \right] + w_2 SI(t_n) \quad (1)$$

## Ergebnisse

Die Demonstration der Funktionalität des Bewirtschaftungsmodells erfolgt anhand der Charakteristiken des Wadi Ma'awil, das sich an der Nordostküste des Sultanates Oman in der Batinah Ebene befindet und von Meerwasserintrusion infolge exzessiver Grundwasserentnahmen für die Bewässerungslandwirtschaft geprägt ist. Das Verhalten des Küstengrundwasserleiters inklusive der Salzwasserdynamik wird mit Hilfe eines 2D-Schnittes in x-z-Richtung des Aquifers beschrieben (Grundmann et al., 2011). Zur Simulation der landwirtschaftlichen Produktion werden Pflanzenertragsfunktionen für zwei verschiedene Anbaukulturen erstellt, nämlich Mais und Hirse. Dabei weist die Hirse gegenüber dem Mais eine größere Salztoleranz auf wohin gegen sich mit Mais ein höherer Preis erzielen lässt (Schütze et al., 2011). Weiterhin werden fixe und variable Kosten für die Installation und den Betrieb von Pumpen sowie Bewässerungstechnik angesetzt. Basierend auf dieser Konfiguration werden anschließend Optimierungsläufe für drei verschiedene Szenarien durchgeführt. Dabei zielt Szenario 1 auf einen maximalen Gewinn für den Landwirt in den nächsten 4 Jahren (kurzfristiger Profit), Szenario 2 auf einen maximalen Gewinn für den Landwirt in den nächsten 20 Jahren (langfristiger Profit) und Szenario 3 auf eine möglichst nachhaltige, ressourcenschonende und dennoch profitable landwirtschaftliche Produktion (multikriterielle Analyse) bei Verwendung von Profits und Nachhaltigkeit innerhalb der Zielfunktion. Die Entscheidungsvariablen für die Optimierung sind die jährlichen Anbauflächen, Anbaumuster sowie Bewässerungsmengen, was im Ergebnis für einen 20jährigen Zeitraum in der Anzahl von 60 Entscheidungsvariablen resultiert (Grundmann et al., 2011).

Die Ergebnisse der Optimierungsläufe sind in Abbildung 2 dargestellt. Die untere Reihe der Abbildungen illustriert den zeitlichen Verlauf des Profits, welcher für das Szenario 1 – kurzfristiger Profit – in den ersten beiden Jahren sehr schnell ansteigt (Abb. 2c). Allerdings sinkt der Profit anschließend fast ebenso schnell bedingt durch einen Anstieg der Salinität im Bewässerungswasser (Abb. 2b) was

gleichfalls einen Wechsel des Anbaumusters verursacht (Abb. 2a). Die Ergebnisse für das Szenario 2 – langfristiger Profit – zeigen ebenfalls einen Anstieg und Rückgang im zeitlichen Verlauf der Profitkurve (Abb. 2f). Jedoch tritt im Vergleich zu Szenario 1 der Scheitel später und mit einem geringeren Wert ein. Das Anbaumuster wechselt ebenfalls später (Abb. 2d). Die Salinität des Bewässerungswassers (Abb. 2e) steigt in den letzten 5 Jahren erheblich an und erreicht am Ende der 20jährigen Periode einen Wert bei dem der Landwirt keinen Profit mehr aus der landwirtschaftlichen Produktion erzielt. Die Ergebnisse der multikriteriellen Optimierung – Szenario 3 – zeigen sehr glatte Kurvenverläufe (Abb. 2g-i). Mais wird angebaut über die gesamte Zeit allerdings auf einer geringeren Anbaufläche als zu Beginn von Szenario 1 und 2 (Abb. 2g). Deshalb steigt die Salinität des Bewässerungswassers auch nicht (Abb. 2h) und die landwirtschaftliche Produktion wirft über den gesamten Zeitraum einen Gewinn ab (Abb. 2i). Der Gesamtgewinn, der sich aus dem Integral der Profitkurven über die Zeit ergibt, ist bei Szenario 2 am größten. Allerdings muss der Landwirt am Ende der 20 Jahre, ähnlich wie in Szenario 1, die Farm aufgeben bedingt durch die hohe Salzkonzentration im Bewässerungswasser. Im Gegensatz dazu kann der Landwirt in Szenario 3 erheblich länger produzieren aufgrund einer nachhaltigeren Aquiferbewirtschaftung und erzielt dann einen höheren Gewinn als der Landwirt in Szenario 2.

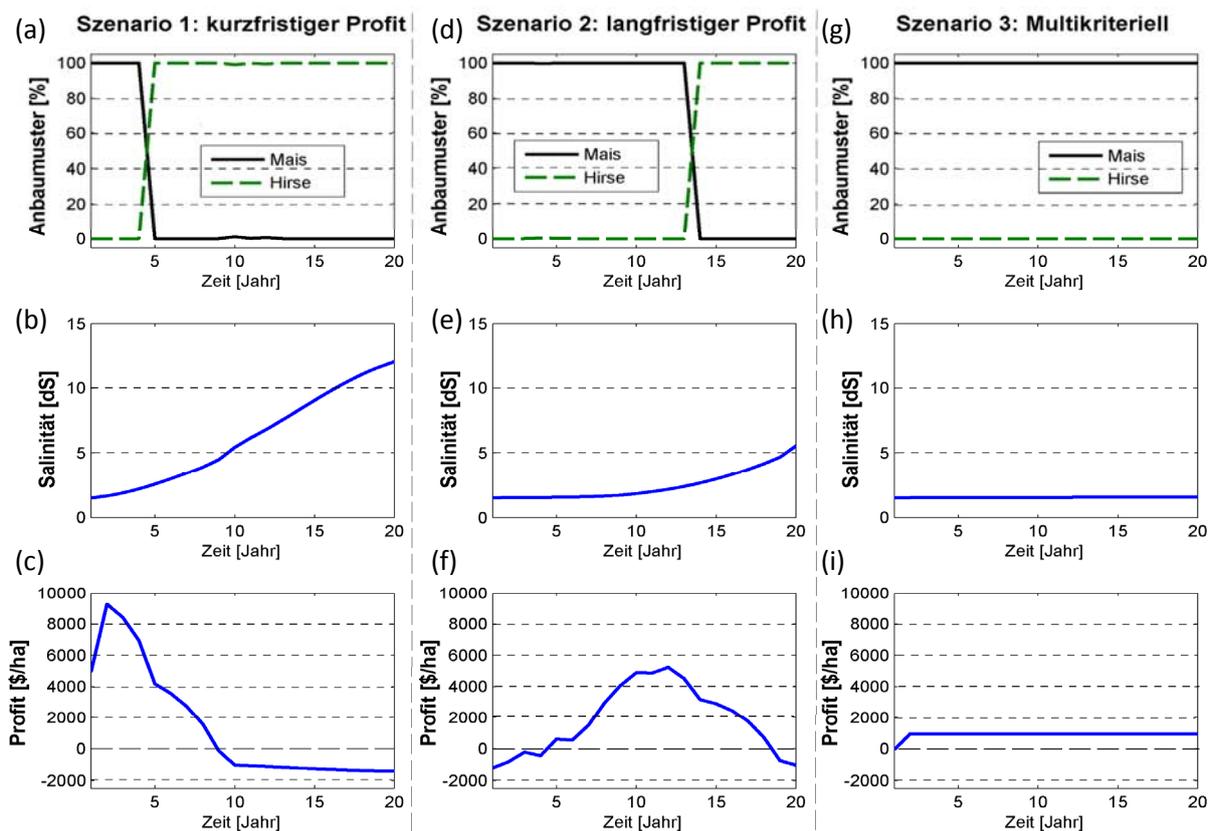


Abb. 2: Ergebnisse der drei Optimierungsläufe illustriert anhand des Anbaumusters, der Salinität des Bewässerungswassers sowie des Profits für Szenario 1, kurzfristiger Profit (2 a-c), Szenario 2, langfristiger Profit (2 d-f), sowie das multikriterielle Szenario 3 (2 g-i)

## Schlussfolgerung

Der präsentierte Prototyp eines simulationsbasierten Wasserbewirtschaftungsmodells ermöglicht die Bewirtschaftung eng gekoppelter Grundwasser - Landwirtschaft Hydrosysteme in Bezug auf Wasserqualität und -quantität. Dabei ist die Modellierung der dichteabhängigen Grundwasserströmung speziell für Küstenaquifere notwendig, um Ertragseinbußen der Anbaukulturen aufgrund von Aquiferübernutzung und Bewässerung mit salzhaltigem Wasser zu berechnen. Die beispielhafte Anwendung des Bewirtschaftungssystems zeigt, dass ein ausschließlich auf Profitmaximierung ausgerichteter landwirtschaftlicher Betrieb früher oder später zu einem weiteren Vordringen der Salzwasserfront führt. Deshalb muss die Nachhaltigkeit als zusätzliches Kriterium in der Optimierung berücksichtigt werden, um durch eine multikriterielle Optimierung nachhaltige Lösungen im Sinne der Umwelt und Sozioökonomie bereitstellen zu können. Dies kann allerdings nur zuverlässig und in akzeptabler Zeit erzielt werden durch eine rigorose Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz, um die Rechengeschwindigkeit der Prozessmodelle zu beschleunigen. Im vorliegenden Fall ist das KNN des Grundwassermodells circa 1000mal schneller als das physikalisch basierte Grundwasserströmungsmodell. Der präsentierte Prototyp bildet die Basis für die Entwicklung eines großskaligen Bewirtschaftungs- und Planungssystems für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen in ariden Gebieten.

## Literatur

- Bhattacharjya, R. K., & Datta, B. (2009). ANN-GA-Based Model for Multiple Objective Management of Coastal Aquifers. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 135(5), 314–322. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:5(314).
- Grundmann, J., Schütze, N., Schmitz, G.-H., & Al-Shaqsi, S. (2011). Towards an integrated arid zone water management using simulation based optimisation. *Environmental Earth Sciences*. Doi: 10.1007/s12665-011-1253-z.
- Hansen, N. (2006). The CMA evolution strategy: a comparing review. In: Lozano, J.A. (Ed.), Larranaga, P. (Ed.), Inza, I. (Ed.), Bengoetxea, E. (Ed.): *Towards a new evolutionary computation. Advances on estimation of distribution algorithms*. Springer, 75-102.
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627 – 643. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.037.
- Keating, B. et. al. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal Of Agronomy*, 18(3-4), 267–288.
- Kolditz, O., Delfs, J.-O., Bürger, C.-M., Beinhorn, M., & Park, C.-H. (2008). Numerical analysis of coupled hydrosystems based on an object-oriented compartment approach. *Journal of Hydroinformatics*, 10(3), 227–244. doi: 10.2166/hydro.2008.003.
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2005). *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. Paris: UNESCO.
- Nabney, I. (2002). *Netlab. Algorithms for Pattern Recognition*. Springer, London.
- Schütze, N., Grundmann, J., & Schmitz, G. H. (2011). Perspektiven für die integrierte Wasserbewirtschaftung durch den Einsatz simulationsbasierter Optimierungsmethoden am Beispiel landwirtschaftlich genutzter küstennaher arider Gebiete im Oman. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 55(2), S.104-115.
- Schütze, N., & Schmitz, G. H. (2010). OCCASION: A new Planning Tool for Optimal Climate Change Adaption Strategies in Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000266.
- Steppuhn, H., van Genuchten, M., & Grieve, C. (2005). Root-zone salinity: II. Indices for tolerance in agricultural crops. *Crop Science*, 45(1), 221–232.

# Urban geprägte Bäche und deren Stoffhaushalt – Integration der Niederschlagswasserbewirtschaftung

Berenike Meyer<sup>1</sup>, Sabine Keßler<sup>1</sup>, Jonas Haas<sup>1</sup>, Reinhard Bierl<sup>1</sup>, Eric Krischel<sup>2</sup> und Andreas Krein<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hydrologie, Universität Trier, Deutschland

<sup>2</sup> Tiefbauamt, Stadt Trier, Deutschland

<sup>3</sup> Department of Environment and Agro-Biotechnologies, Centre de Recherche Public-Gabriel Lippmann, Luxemburg

## Zusammenfassung

Im Einzugsgebiet des Olewiger Bachs (24,6 km<sup>2</sup>) wird der Einfluss naturnaher und konventioneller Siedlungswasserbewirtschaftungsformen untersucht. Die quantitativen und chemisch-qualitativen Aspekte einzelner Hochwasserereignisse werden auf verschiedenen Skalenniveaus analysiert. Hierzu werden zwei urban beeinflusste Teileinzugsgebiete (0,4 km<sup>2</sup>, 1,2 km<sup>2</sup>) ebenso untersucht, wie der Durchlauf von Hochwasserwellen im Gewässer. Die Untersuchungen zeigen, dass gerade urbane Direktleitungen kurzfristig einen sehr großen hydraulischen Gradienten mit erosivem Potential im betroffenen Bachabschnitt verursachen. Die mit den Einleitungen verbundenen stofflichen Emissionen können zudem das Gewässernetz kurzzeitig stark belasten. Die gewonnenen Informationen werden unter anderem für eine Optimierung der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie am Olewiger Bach sowie für die Planung von Rückhaltmaßnahmen herangezogen.

## Einleitung

In Ballungsräumen stehen mesoskalige Gewässersysteme zumeist unter einem hohen Nutzungsdruck. Verstärkter Oberflächenabfluss und reduzierte Grundwasserneubildungsraten auf Grund zunehmender Versiegelung vergrößern die Spanne zwischen Trockenwetter- und Ereignisabfluss (Göbel et al., 2004, Haase, 2009). Urban geprägte Bäche wurden deshalb in der Vergangenheit vor allem unter dem Aspekt der hydraulischen Leistungsfähigkeit ausgebaut. Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL; RL 2000/60/EG) tritt hingegen das Ziel des guten ökologischen und chemischen Zustandes in den Vordergrund, welches häufig im Konflikt mit der schadlosen Ableitung des Ereignisabflusses steht.

Mischkanalentlastungen sowie Trennsystemeinleitungen ohne Rückhalt verursachen kurzfristige Ereignisse mit großem Volumen. Insbesondere für kleine Gewässer stellt dies eine große hydraulische Belastung dar. Die Zunahme des Direktabflusses kann zudem die Hochwassergefahr für die Unterlieger verschärfen (Hatt et al., 2004, White und Geer, 2006). Naturnahe Niederschlagswasserbewirtschaftungsformen bilden im Idealfall den natürlichen Wasserhaushalt nach und haben daher weniger nachteilige Auswirkungen. In der Regel wird jedoch der natürliche Verdunstungsanteil nicht erreicht und ein größerer Anteil infiltriert oder wird kontrolliert in die Vorfluter eingeleitet (Holman-Dodds et al., 2003).

Ein weiterer Aspekt ist der zeitlich stark variierende stoffliche Eintrag in die Gewässer durch urbane Einleitungen. Neben punktuellen Einleitungen der Kläranlagen verändern diffuse Stoffeinträge, z.B.

Leckagen im Kanalsystem die chemische Zusammensetzung des Gewässers (Prasse et al., 2010). Zusätzlich zu dieser Grundbelastung werden während Niederschlagsereignissen weitere Stoffquellen kurzfristig aktiv. Von urbanen Oberflächen werden durch den sogenannten „wash-off“ Effekt mit dem Regenwasser Stoffe (z.B. Pestizide oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) mobilisiert. Im Falle eines Mischwasserkanalsystems wird zudem verdünntes, ungeklärtes Abwasser abgeführt, wodurch neben eutrophierenden Nährstoffen auch anthropogene Spurenstoffe wie Pharmazeutika in den Vorfluter gelangen (Diaz-Fierros et al., 2002, Meyer et al., 2011). Im Kanalsystem können außerdem durch den Spülstoß des Niederschlagwassers Ablagerungen remobilisiert werden (Schriewer et al., 2008, Wittmer et al., 2010). Die resultierenden Stoffeinträge können zu einer Stoßbelastung im Gewässer führen, die sich schädlich auf das Ökosystem auswirkt (Kidd et al., 2007).

Ziel der Arbeit ist es die Auswirkungen der urbanen Gebiete auf das Gesamteinzugsgebiet zu erfassen. Insbesondere werden die unterschiedlichen Einflüsse naturnaher und konventioneller Siedlungswasserbewirtschaftungsformen untersucht. Außerdem werden quantitative sowie chemisch-qualitative Aspekte einzelner Hochwasserereignisse analysiert. Die Frage nach dem Erfolg der Integration der urbanen Gebiete wird primär anhand der Vorgaben durch die WRRL sowie über den Hochwasserschutz der Unterlieger bewertet.

## **Untersuchungsgebiet und Methode**

Das Einzugsgebiet des Olewiger Bachs (24,6 km<sup>2</sup>) liegt im Süden der Stadt Trier, im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Luxemburg. Im Unterlauf durchfließt der Olewiger Bach das Stadtgebiet und mündet kanalisiert in die Mosel. Der mittlere Abfluss beträgt ca. 250 l s<sup>-1</sup> am Pegel Olewig, die mittlere Jahresniederschlagssumme 719 mm (1961-1990 DWD-Station Trier-Petrisberg). Das Bachtal hat sich tief in die devonischen Schiefer des Hunsrücks eingeschnitten. Im nördlichen Teil des Einzugsgebietes überlagern fluviale Sedimente und Lösslehm die Hunsrückschiefer. Diese pleistozäne Hauptterrasse der Mosel wird heute durch die Höhenstadtteile Triers dominiert (Abb. 1).

Seit 1962 hat die Besiedlung insbesondere im Unterlauf auf den stadtnahen Hochflächen stark zugenommen (heutiger Siedlungsanteil ca. 30 %). Der Oberlauf hingegen ist ländlich geprägt, hier entwässern vier kommunale Kläranlagen (insges. 2 200 Einwohnerwerte) in den Olewiger Bach. Im gesamten Einzugsgebiet bestehen 24 wasserrechtliche Genehmigungen für die Einleitung von Oberflächen- bzw. Mischwasser an Regenwettertagen (Abb. 1). Die genehmigten Einleitungsmengen orientieren sich in der Regel an einem dreijährigen Ereignis mit der Dauerstufe 3 h und variieren stark von 7 l s<sup>-1</sup> bis 3750 l s<sup>-1</sup>. Die Summe liegt bei über 13 000 l s<sup>-1</sup>.

Der Olewiger Bach wurde an zwei Messstellen, in Kernscheid (15 km<sup>2</sup>) vor dem Eintritt ins Stadtgebiet und in Olewig (24,6 km<sup>2</sup>) untersucht. Zusätzlich wurden an 13 weiteren Messstellen im Abstand von jeweils 1 km Gewässergüteparameter (gemäß WRRL) wöchentlich erfasst. Die beiden untersuchten Teileinzugsgebiete Trier-Petrisberg 0,4 km<sup>2</sup> (ca. 50 % befestigte Fläche) und Trier-Filsch 1,2 km<sup>2</sup> (ca. 16 % befestigte Fläche) unterscheiden sich hinsichtlich des urbanen Entwässerungssystems. Der Stadtteil Petrisberg (Konversionsprojekt seit 2000) wird über ein Trennsystem mit komplexen, semi-zentralen Rückhalten bewirtschaftet und der Regenwasserabfluss gedrosselt an den Vorfluter abgegeben. Trier-Filsch demgegenüber wird über ein konventionelles Mischwassersystem ohne Rückhalt entwässert.

An den beiden oben genannten Messstellen im Olewiger Bach werden mit Hilfe von einem Radarsensor bzw. einer Drucksonde die Wasserstände (15-min Mittelwert) gemessen und anhand der Wasserstands-Abfluss-Beziehung die Abflüsse berechnet. An den Gebietsauslässen der Teileinzugsgebiete Trier-Petrisberg und Trier-Filsch sind jeweils Thomson-Wehre installiert. Die Wasserstände werden mit Drucksonden (10-min Mittelwert) erfasst und über die Wehrformeln in Abflüsse umgerechnet.

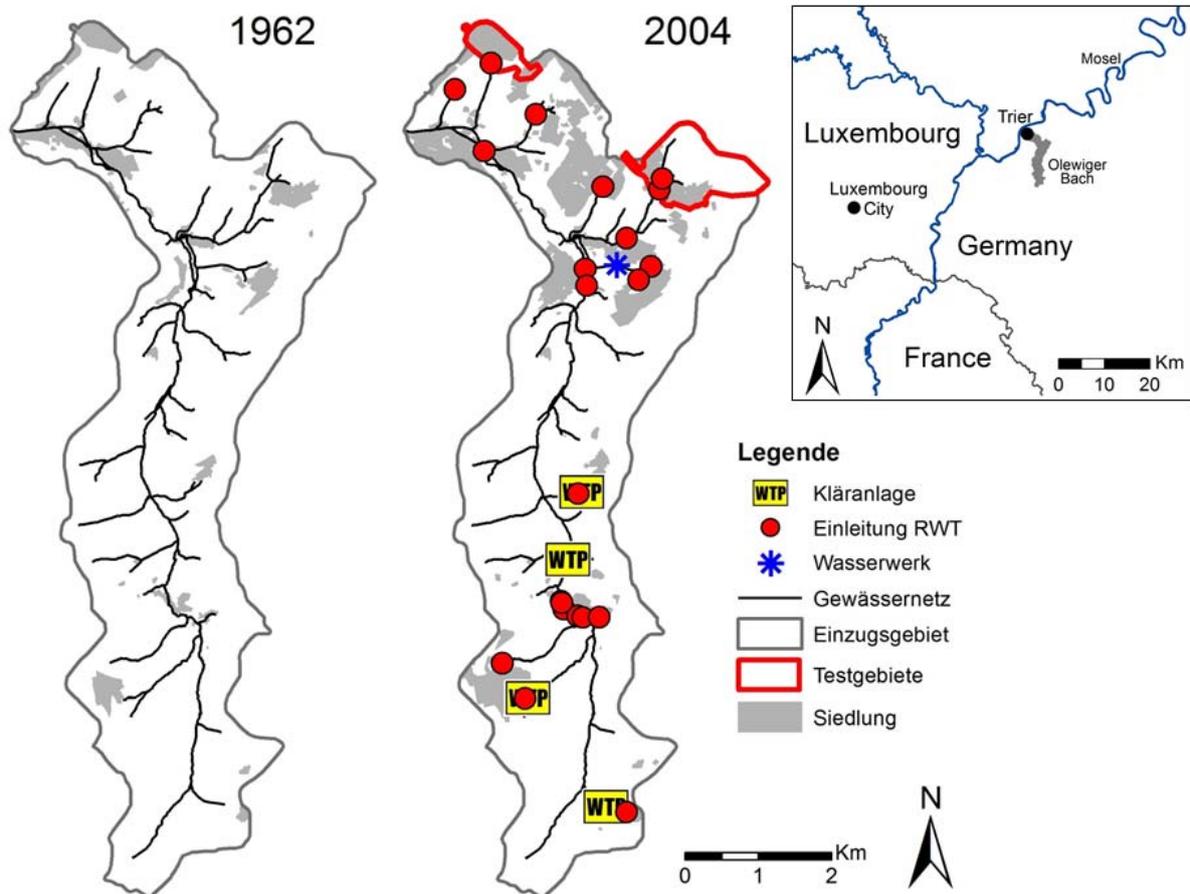


Abb. 1: Untersuchungsgebiet des Olewiger Baches mit den beiden urban geprägten Teileinzugsgebieten (Testgebiete) Trier-Petrisberg (0,4 km<sup>2</sup>) und Trier-Filsch (1,2 km<sup>2</sup>) sowie die für Regenwettertage (RWT) genehmigten Einleitungen (dokumentiert seit 1986).

Die Ereignisbeprobung erfolgte mit Hilfe von Autosamplern. Die gewonnenen Proben wurden anschließend binnen 24 h im Labor filtriert (0,45 µm) und für die verschiedenen Analysen entsprechend vorbereitet. Die Leitfähigkeit wurde mit Hilfe eines WTW Cond 340i in der unfiltrierten Probe gemessen. Die Konzentrationsbestimmung von Phosphat und Ammonium erfolgte photometrisch (Perkin Elmer Lambda 2). Die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat wurden mittels Ionenchromatographie (Metrohm 733) und die Metalle Eisen, Mangan und Zink mit Hilfe der Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (Analytik Jena Contr AA 300) quantifiziert. Im Rahmen der Längsprofilbeprobung (13 Messstellen) wurden Temperatur, Sauerstoffgehalt (WTW Oxi 340i) und Leitfähigkeit in-situ ermittelt. Für die restlichen Parameter (Chlorid, Nitrat, Sulfat, Ammonium und Phosphat) wurden Wasserproben entnommen, und in derselben Weise wie mit den Ereignisproben verfahren.

## Ergebnisse

Die Untersuchungen im Längsprofil des Olewiger Baches zeigen jeweils im Abstrom der kommunalen Kläranlagen eine Zunahme der Nährstoffgehalte. Mehrfach wurde lediglich die Zielvorgabe der WRRL hinsichtlich des Phosphatgehalts überschritten. Mit Eintritt in das Stadtgebiet treten keine signifikanten Änderungen auf. Die mit der Fließstrecke abnehmenden Nährstoffgehalte lassen sich zum Einen auf die Selbstreinigung und zum Anderen auf den steigenden Anteil unbelasteten Grundwassers zurückführen. Der Trockenwetterabfluss unmittelbar nach den Einleitungen der Kläranlagen kann im Extremfall zur Hälfte aus geklärtem Abwasser bestehen. Die Morphologie des Gewässers wurde behördlich aufgrund vielerorts auftretender Tiefenerosion sowie verbauter Abschnitte nur als schlecht bis mäßig eingestuft. Die Untersuchungen zeigten, dass die schlechte Morphologie häufig auf urbane Einleitungen an Regenwettertagen zurückzuführen ist. Umso größer die genehmigten Einleitungsmengen, umso wahrscheinlicher ist der Verbau des betroffenen Gewässerabschnittes. Im Stadtgebiet wurden deshalb neben dem Olewiger Bach zahlreiche Tributäre verbaut oder kanalisiert.

Die Untersuchungen in den Teileinzugsgebieten zeigen die große Bandbreite der Siedlungswasserbewirtschaftungskonzepte auf. Im Stadtteil Trier-Petrisberg (naturnahes Trennsystem), lag der maximale Abflussscheitel bei  $37,2 \text{ l s}^{-1}$ , in Trier-Filsch (Mischsystem) hingegen bei  $641 \text{ l s}^{-1}$  (Beobachtungszeitraum 2009-2011). Die Abflüsse des konventionellen Entwässerungssystems in Trier-Filsch treten unmittelbar nach Niederschlägen mit höheren Intensitäten auf. Die beobachteten Abflusspeaks haben ausgesprochen kurze Konzentrations- und Verweilzeiten ( $< 1 \text{ h}$ ). Das erosive Potential dieser Abflüsse ist groß, nimmt mit der Abflachung der Welle im Gewässer jedoch schnell ab, weshalb häufig nur kurze Abschnitte ( $< 500 \text{ m}$ ) verbaut sind. Die Abflüsse des naturnahen Systems werden über die Niederschlagsmenge sowie die hydro-klimatologischen Rahmenbedingungen (in erster Linie Vorregen, Bodenfeuchte und Verdunstung) gesteuert. Die Drosselungen der Muldenabflüsse führen zu einem Abflussplateau von ca.  $30 \text{ l s}^{-1}$  (Trier-Petrisberg), welches zum Teil über mehrere Tage anhält.

Den Einfluss der Siedlungsabflüsse zeigt auch der Vergleich der Pegel Kernscheid (Oberlauf) und Olewig. Insbesondere bei konvektiven Niederschlägen werden die Anteile der Siedlungsentwässerung in Form einer Vorentlastung deutlich sichtbar. Beispielsweise trat bei einem konvektiven Ereignis am 04. Dez 2011 am Pegel Olewig zweieinhalb Stunden vor dem Hauptpeak ein weiteres Abflussmaximum auf (Abb. 2). Der Wellenanstieg des Vorpeaks verlief deutlich steiler und der Scheitelabfluss betrug etwa das 1,3-fache des nachfolgenden Abflusspeaks. Der Ganglinienverlauf der Vorwelle zeigt eine dem Hydrographen Trier-Filsch sehr ähnliche Form, was darauf schließen lässt, dass es sich dabei zum Großteil um Kanalentlastungen und Straßenabläufe handelt. Der Pegel Trier-Petrisberg hingegen wies ein charakteristisches Plateau von  $30 \text{ l s}^{-1}$  über 24 Stunden auf und beeinflusste in erster Linie den Rezensionsast am Pegel Olewig. Typischerweise zeigt der Olewiger Bach bei advektiven Niederschlagsereignissen während der Wintermonate ein deutlich breiteres Abflussmaximum (über mehrere Tage), so dass in diesem Fall die retendierten und gedrosselten Siedlungsabflüsse den Scheitelabfluss in der Ortslage Olewig erhöhen.

Die Betrachtung des Pluvio- und des Hydrographen einer einzelnen Hochwasserwelle vom 04. Dez 2011 an der Messstelle Olewig verdeutlicht die schnelle Reaktion des Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis (Abb. 2). Beispielhaft sind in der Abbildung die Chemographen der Chlorid-, Ammonium- und Nitratkonzentrationen dargestellt. Kurz auf das Abflussmaximum folgend weist der Chemograph von Chlorid sein Minimum ( $17,98 \text{ mg l}^{-1}$ ) und von Ammonium seinen maximalen Gehalt während der Hochwasserwelle auf ( $0,26 \text{ mg l}^{-1}$ ). Das Konzentrationsminimum von Chlorid ist auf die

Verdünnung durch Niederschlagswasser zurückzuführen und dessen Entkopplung vom Abflussmaximum auf den kinematischen Welleneffekt im Gerinne. Das gleichzeitige Eintreten des minimalen Chlorid- mit der maximalen Ammoniumkonzentration zeigt den Einfluss von Mischwassereinleitungen im Mittel- und Unterlauf des Olewiger Bachs. Der Chemograph des Nitrats weist zu Beginn der Hochwasserwelle abnehmende Gehalte auf und steigt zum Ende der Welle hin deutlich an. Dies basiert auf dem hohen Anteil an Bodenwasser in der Rezession der Hochwasserwelle. Dieses gelangt aufgrund des oberflächennahen Untergrunds mit umfangreichen Verwitterungsdecken in der Talau sowie über Drainagen in den Olewiger Bach.

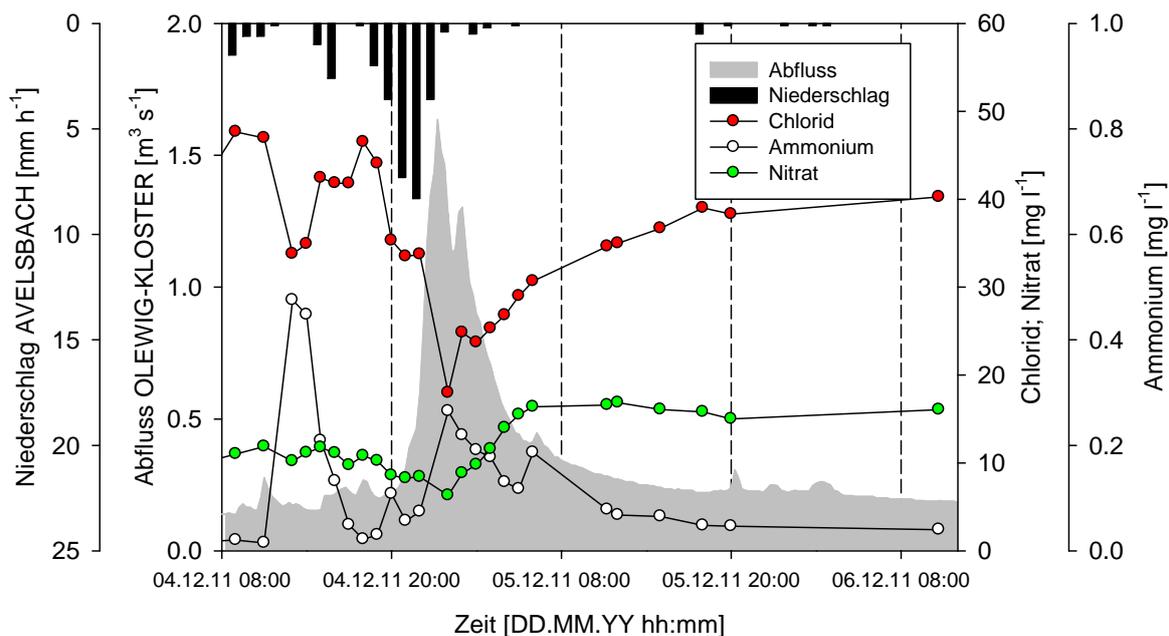


Abb. 2: Pluvio-, Hydro- und Chemographen am 04. Dez 2011 an der Messstelle Olewig.

## Schlussfolgerung

Die geplanten Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässermorphologie sollten, um einen dauerhaften Erfolg zu erzielen, mit Modifikationen von bestehenden Siedlungswassereinleitungen verbunden werden. Durch den (Aus-)Bau der Kläranlagen werden die Zielvorgaben der WRRL weitgehend eingehalten. Spitzenemissionen treten jedoch kurzfristig im Ereignisfall auf, weshalb mit Hinblick auf die erwartete Zunahme des Siedlungsdrucks und der Starkregenereignisse Optimierungsbedarf im Bereich der Mischwasserkanalbelastung besteht.

Im Hinblick auf die naturnahe Niederschlagswasserbewirtschaftung hat sich gezeigt, dass eine ansprechende Ausgestaltung der Anlagen („Grüne Schneisen“, parkähnliche Elemente) sowie eine frühzeitige Partizipation der Anwohner die Akzeptanz und damit auch die Funktionalität des Systems steigern. Selbst unter ungünstigen Voraussetzungen (z.B.  $k_f$ -Werte  $< 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  im Testgebiet) haben solche Anlagen im Vergleich zu konventionellen Mischwasserkanalbelastungen in der Regel geringere Auswirkungen auf das Gewässernetz. Die Hochwassersituation am Olewiger Bach ist durch die Vorentlastung (Kanalsystem und Straßenabläufe) für die Ortslage Olewig bereits grenzwertig, weshalb im Hinblick darauf von einem Ausbau dieser Systeme abzusehen ist. Größere Abkopplungsprojekte im Stadtbereich sind ebenfalls nicht empfehlenswert, da durch das langgestreckte Einzugsgebiet die Ab-

flüsse aus der Vorentlastung in den Bereich des nachfolgenden natürlichen Abflussmaximums verschoben würden. Zur Verringerung der Hochwassergefahr für die Ortslage Olewig sollen deshalb zeitnah zwei Rückhaltebecken geplant und umgesetzt werden.

## Danksagung

Wir danken Christina Wilcsek und Magret Roth für die unterstützende Arbeit im Labor sowie Alexander Hammel für die Unterstützung bei der Datenakquise. Die Untersuchungen wurde gefördert durch Stipendien des Fonds Nationale de la Recherche Luxembourg (AFR 08-065; AFR 08-096).

## Literatur

- Diaz-Fierros, F.T., Puerta, J., Suarez, J. und Diaz-Fierros, F.V. (2002): Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain. *Urban Water* 4, 291-299.
- Göbel, P., Stubbe, H., Weinert, M., Zimmermann, J., Fach, S. und Dierkes, C. (2004): Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. *Urban Hydrology. Journal of Hydrology* 299, 267-283.
- Haase, D. (2009): Effects of urbanisation on the water balance - A long-term trajectory. *Environmental Impact Assessment Review* 29 (4), 211-219.
- Holman-Dodds, J. K., Bradley, A. A. und Potter, K. W. (2003): Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. *Journal of the American Water Resources Association* 39, 205-215.
- Kidd, K.A., Blanchfield, P.J., Mills, K.H., Palace, V.P., Evans, R.E., Lazorchak, J.M. und Flick, R.W. (2007): Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 8897-8901.
- Meyer, B., Pailler, J.Y., Guignard, C., Hoffmann, L. und Krein, A. (2011): Dissolved pesticides and pharmaceuticals in a small catchment in Luxembourg. *Journal of Environmental Monitoring* 180, 127-146.
- Prasse, C., Schlüser, M. P., Schulz, R. und Ternes, T. A. (2010): Antiviral Drugs in Wastewater and Surface Waters: A New Pharmaceutical Class of Environmental Relevance?. *Environmental Science and Technology* 44, 1728-1735.
- Schriewer, A., Horn, H. und Helmreich, B. (2008): Time focused measurements of roof runoff quality. *Corrosion Science* 50, 384-391.
- White, M. D. und Greer, K. A. (2006): The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California. *Landscape and Urban Planning* 74, 125-138.
- Wittmer, I.K., Bader, H.-P., Scheidegger, R., Singer, H., Lück, A., Hanke, I., Carlsson, C. und Stamm, C. (2010): Significance of urban and agricultural land use for biocide and pesticide dynamics in surface waters. *Water research* 44, 2850-2862.

# **Wird der Starkregen immer stärker?**

## **Analyse von Sturzflut-relevanten Starkregen**

Eva Nora Mueller

Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Deutschland

### **Zusammenfassung**

Urbane Sturzfluten, starke Rillenerosion und das rapides Auswaschen von Nähr- und Schadstoffen durch Starkregen haben im Vergleich zur Hochwasserrisikoforschung in Deutschland im letzten Jahrzehnt nicht viel Beachtung gefunden. Eine hier vorzustellende Trendanalyse zeigt jedoch, dass es einen deutlichen Anstieg an Sturzflut-relevanten Starkregen innerhalb der letzten 35 Jahre gegeben hat. So traten innerhalb der letzten acht Jahrzehnte die untersuchten Starkregen von sehr hoher Intensität und kurzer Dauer von zwei bis zehn Minuten nur ca. 4-15 Mal im Jahr auf. Eine Mann-Kendall Trendanalyse ergab einen Trendanstieg von bis zu 0.5 Sturmereignis/Jahr: damit könnten sich die Starkregenereignisse in dem Sturzflut-relevanten Spektrum innerhalb von wenigen Dekaden vervielfachen. Die Auswirkungen einer möglichen Zunahme dieser Starkregen sind derzeit weder für urbane noch für ländliche Räume abschätzbar und lassen speziell hinsichtlich des Schadenspotenzials wie z.B. der Beeinträchtigung der Wassergüte und hinsichtlich einer möglichen Schadensminimierung viele Fragen offen. In der Studie werden die Ergebnisse der Mann-Kendall Analyse vorgestellt und ein erstes Schadensbild für urbane Sturzfluten und Stofftransfers auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gezeichnet.

### **Einleitung**

Eine Vielzahl von Studien untersuchte im letzten Jahrzehnt die möglichen Auswirkungen einer Klimaveränderung auf das regionale oder globale Niederschlagsregime. Hauptaugenmerk der meisten dieser Studien lag auf der Trenduntersuchung von zeitlichen oder räumlichen Zu- oder Abnahmen von Niederschlägen, welche Überflutungen oder Dürreperioden auslösen könnten. Im Besonderen wurde die Zunahme von Starkregenereignissen studiert, um für hydrologisch wichtige Fragestellungen wie Umsetzung der Flutvorhersage und Stadtentwässerung Maßnahmen ergreifen zu können. Mit Starkregen wird ein Niederschlag bezeichnet, der im Verhältnis zu seiner Dauer eine hohe Niederschlagsintensität hat. Dabei sind die zu untersuchenden Niederschlagsdauern, -mengen und -intensitäten von Starkregen nicht fachübergreifend definiert, sondern richten sich nach der jeweiligen räumlichen und zeitlichen Skalen, deren Prozesse betrachtet werden. Bei Flutereignissen werden dabei meist Stunden- bis Tageswerte extremwertstatistisch analysiert, für die Dimensionierung der Stadtentwässerung sind kleinere Dauerstufen von 15 Minuten bis Stunden relevant. Zur Analyse von Bodenerosion durch Starkregen sind besonders sehr kurze Dauern (< 5min) mit sehr hohen Intensitäten von Bedeutung.

Analysen von Starkregen mit kürzeren Dauerstufen (« 15 Minuten), regional und global, wurden bisher so gut wie gar nicht durchgeführt. In einer Studie von Mueller und Pfister (2011) wurde eine Trendanalyse dieser Starkregen, welche im besonderen Maße für das Auftreten von Bodenerosionser-

scheinungen verantwortlich sind, durchgeführt und eine Zunahme von erosionsrelevanten Starkregen festgestellt. Die Ergebnisse dieser Studie werden hier vorgestellt, sowie eine erste Übersicht über mögliche Folgen der Zunahme durch eine Untersuchung von Nährstoffeinträgen von landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Starkregen im norddeutschen Tiefland.

## Methoden

Die Analyse von Mueller und Pfister (2011) basierte auf acht zeitlich hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen der Emscher Genossenschaft / Lippe Verband mit einer Datenlänge von 51 bis 79 Jahren für ausgewählte Standorte innerhalb der Lippe und Emscher Einzugsgebiete. Die Niederschlagsdaten werden ab der 1990er Jahre digital aufgenommen; davor lagen die Daten als analoge Schreibstreifen vor, welche von der Emscher Genossenschaft digitalisiert und aufbereitet wurden. Die Niederschlagsdaten liegen in einer maximalen Auflösung von einer Minute vor; auf die Unsicherheiten, welche sich bezüglich der Genauigkeit der Daten durch die Digitalisierung von Regenschreibernaufzeichnungen ergeben, wurde in der Analyse eingegangen. Bei der Analyse wurden zwei Zeiträume betrachtet: zum einen der längst mögliche Zeitraum von ca. 70 Jahren, für den Zeitreihen mit hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung standen, zum anderen ein kürzerer Zeitraum von 35 Jahren, um sowohl die beschleunigten Veränderungen im Klimaregime innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte als auch die mögliche systematische Beeinflussung der Messdaten durch die Umstellung der Messtechniken in den 90ern berücksichtigen zu können. Die Trendanalyse wurde mit dem Mann-Kendall Test durchgeführt, welcher üblicherweise für die Analyse von hydrologisch-meteorologischen Zeitreihen wie Niederschlag, Abfluss und Temperatur eingesetzt wird (Schönwiese 2000, Helsel & Hirsch 2002, Yue *et al.* 2002). Die Niederschlagsreihen wurden so umformatiert, so dass für jeden Minutenschritt Summenniederschläge innerhalb eines gleitenden Zeitfensters mit einer festgesetzten Dauer  $t_{\text{Regen}}$  ( $t_{\text{Regen}}$  variabel zwischen 1 und 30 Minuten) aufaddiert werden. Extremniederschläge werden aus diesen Zeitreihen herausgefiltert, indem für jede Dauer  $t_{\text{Regen}}$  von 1 bis 30 Minuten die Anzahl der Ereignisse pro Monat bzw. Jahr ausgezählt wird, welche eine bestimmte Niederschlagshöhe  $h_{\text{Regen}}$  zwischen 1 und 10 mm aufweist. Eine Niederschlagsintensität von  $i_{\text{Regen}} = 20 \text{ mm/h}$  ( $0.3 \text{ mm/min}$ ) nach Salles *et al.* (2000) wird als minimaler, erosionsrelevanter Niederschlagsschwellenwert benutzt.

Die Daten zu Sediment- und Nährstoffeintrag auf landwirtschaftlichen Flächen in Brandenburg (Raum Ketzin) werden innerhalb der ECHO-Gruppe, Universität Potsdam seit 2009 kontinuierlich gesammelt und derzeit ausgewertet (Mueller *et al.* in preparation, ECHO, 2012).

## Ergebnisse

Die Zeitreihenanalyse von 1-min Niederschlagsdaten der letzten 70 Jahre zeigte eine Zunahme von Starkregen mit erosionsrelevanten Niederschlagsintensitäten, wobei dieser Trend für die letzten 35 Jahre statistisch signifikant ausgeprägt ist für eine kritische Zone mit Niederschlagscharakteristiken:  $i_{\text{Regen}}=0.3-0.7 \text{ mm/min}$ ,  $t_{\text{Regen}}=2-10 \text{ min}$  und  $h_{\text{Regen}}=1-3 \text{ mm}$ . Abb. 1 zeigt für zwei Stationen (Soest und Essen) exemplarisch die Entwicklung von ausgewählten erosionsrelevanten Starkniederschlagsereignissen innerhalb der letzten 70 Jahre mit Intensitäten von  $0.5-2 \text{ mm/min}$  ( $30-120 \text{ mm/h}$ ), welche durchschnittlich 4-15 Mal im Jahr auftreten. Die Zeitreihen sind charakterisiert durch große jährliche Schwankungen. Einige Zeitreihen zeigen eine relativ hohe Anzahl an Starkregenereignissen in den 1950ern und der zweiten Hälfte der 1960ern, gefolgt von einer Abnahme in den 1970ern und einer

stetigen Zunahme nach 1975 (hier gezeigt am Beispiel der Station Essen). Einige, aber nicht alle der Zeitreihen weisen einen positiven, linearen Trend auf, wenn man den gesamten Zeitraum betrachtet (welcher wiederum nicht bei allen statistisch signifikant ist). Für den Zeitraum der letzten 35 Jahre (seit 1975) zeichnet sich hingegen für alle untersuchten Zeitreihen eine deutliche Zunahme an Ereignissen pro Jahr ab (Abb. 2).

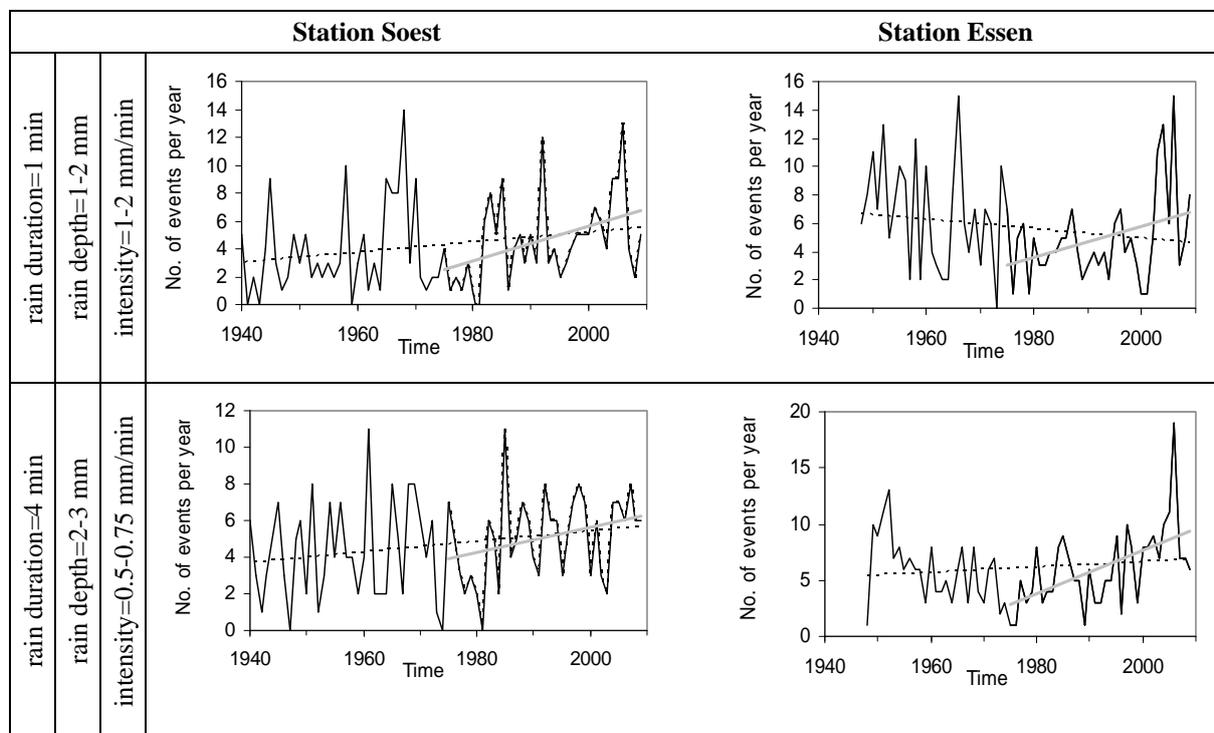


Abb. 1: Zeitreihen für die Stationen Soest (links) und Essen (rechts) von Starkregen mit unterschiedlichen Intensitäten. Die gestrichelte Linie zeigt die Trendlinie für das gesamte Messintervall (1940er-2009), die graue Linie nur für das letzte Segment (1975-2009).

Nach Mueller & Pfister (2011) sind die Zunahmen an Starkregeneignissen in den letzten 35 Jahren in der Sommerjahreszeit (Juli-September) besonders ausgeprägt, aber auch in den anderen Jahreszeiten werden Zunahmen verzeichnet. Die Anzahl der Gewitter bleibt für den gleichen Betrachtungszeitraum konstant; klassische Sommergewitterregen können also nicht allein für den Anstieg von erosionsrelevanten Niederschlägen verantwortlich gemacht werden.

Geht man nun von einem möglichen, klimabedingten Anstieg von erosionsrelevanten Starkregen innerhalb der letzten Dekaden aus, ohne diesen Anstieg im Detail quantifizieren zu können, muss man sich mit den möglichen Folgen für die betroffene Region auseinandersetzen. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen könnte ein vermehrtes Auftreten an erosionsrelevanten Starkregen zu einem Anstieg an Bodenerosionserscheinungen an Hängen, Auslaugen der Böden, verstärktem Ausspülen von Nähr- und Schadstoffen und Verlagerung dieser Stoffe in die Oberflächengewässer mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Gewässerökologie führen. Durch die Verlagerung von Schwebstoffen innerhalb des Gewässernetzes kann es außerdem zu weiteren, indirekten Folgeschäden kommen, wie z.B. Sedimentation von Fließrinnen oder Schäden an Wasserbauwerken.

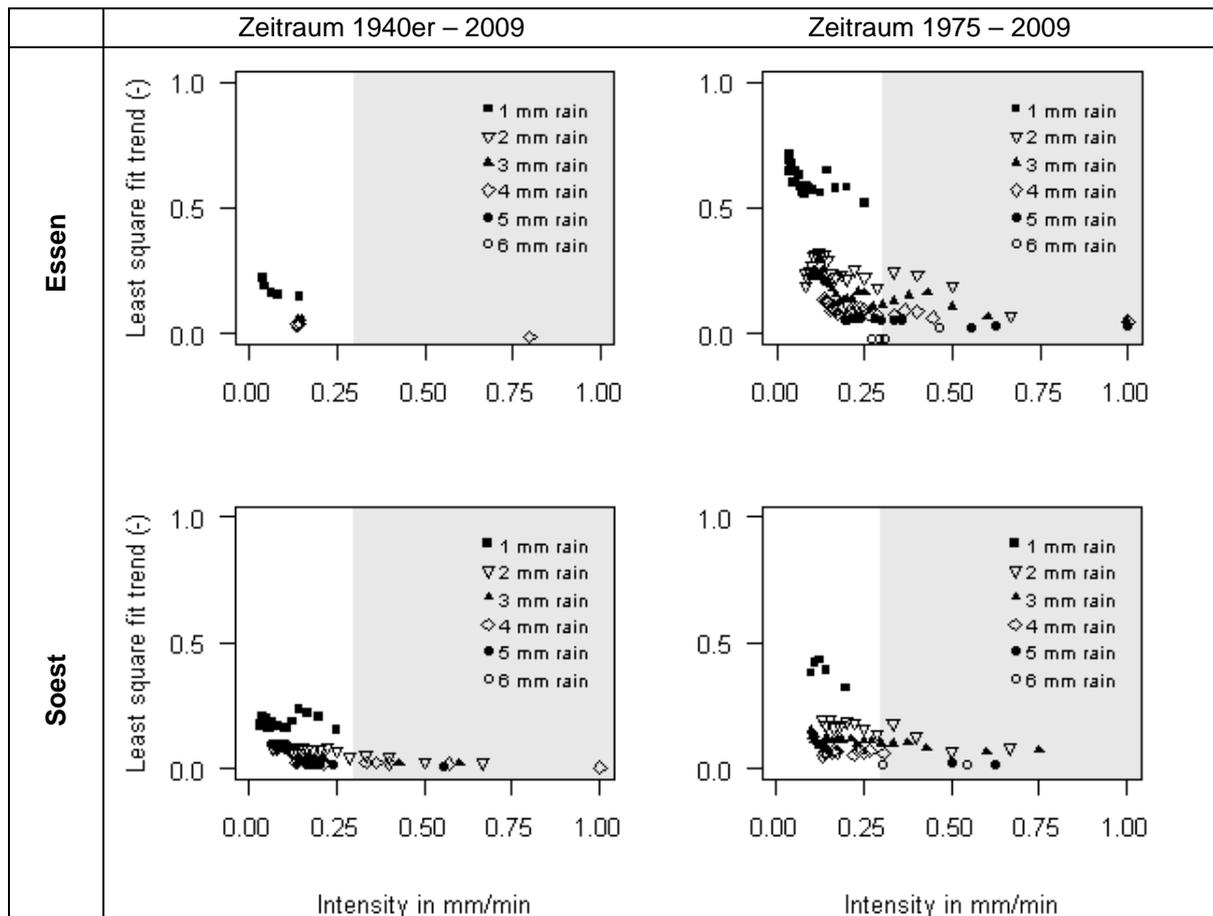


Abb. 2: Linearer Trend für die Zeitreihen von Starkniederschlägen mit bestimmter Dauer, Niederschlagstiefe und Intensität für den gesamten Zeitraum (1940er-2009) und den Zeitraum 1975-2009 für alle acht Stationen (Grafiken zeigen nur statisch signifikante Trends nach Mann-Kendall Test), grauschraffierter Bereich: Niederschlagsintensitäten, welche als erosions-relevant eingeschätzt werden.

Feldstudien zu Sediment- und Nährstoffverlagerungen haben gezeigt, dass eine kleine Anzahl an Starkregenereignissen ausreicht, um einen Hauptanteil der Frachten von landwirtschaftlichen Flächen zu verlagern. Lennox *et al.* (1997) zeigt z.B. dass nur ca. 10-20 Niederschlagsereignisse pro Jahr notwendig sind, um auf mesoskaligen Tiefland Einzugsgebieten den Hauptanteil an Gesamtphosphor von landwirtschaftlichen Flächen in den Vorfluter zu verlagern. Leider sind jedoch wenig Datensätze zugänglich, die eine genügend hohe zeitliche Auflösung von Nährstoffeinträgen aufweisen.

Innerhalb einer laufenden Messkampagne des ECHO-Projektes (ECHO, 2012) wurden Nährstoffkonzentrationen (u.a. partikulärer Phosphor) zwei-wöchentlich in kleineren Gräben neben landwirtschaftlich genutzten Flächen gemessen. In Abb. 3 sieht man, dass es einen Zusammenhang zwischen erosionsrelevanten Starkregen und gemessenen partikulären Phosphorkonzentrationen an den drei Messstandorten speziell im Hochsommer gibt; die zeitliche Auflösung der drei Messreihen lässt jedoch keine weitergehende Analyse zu.

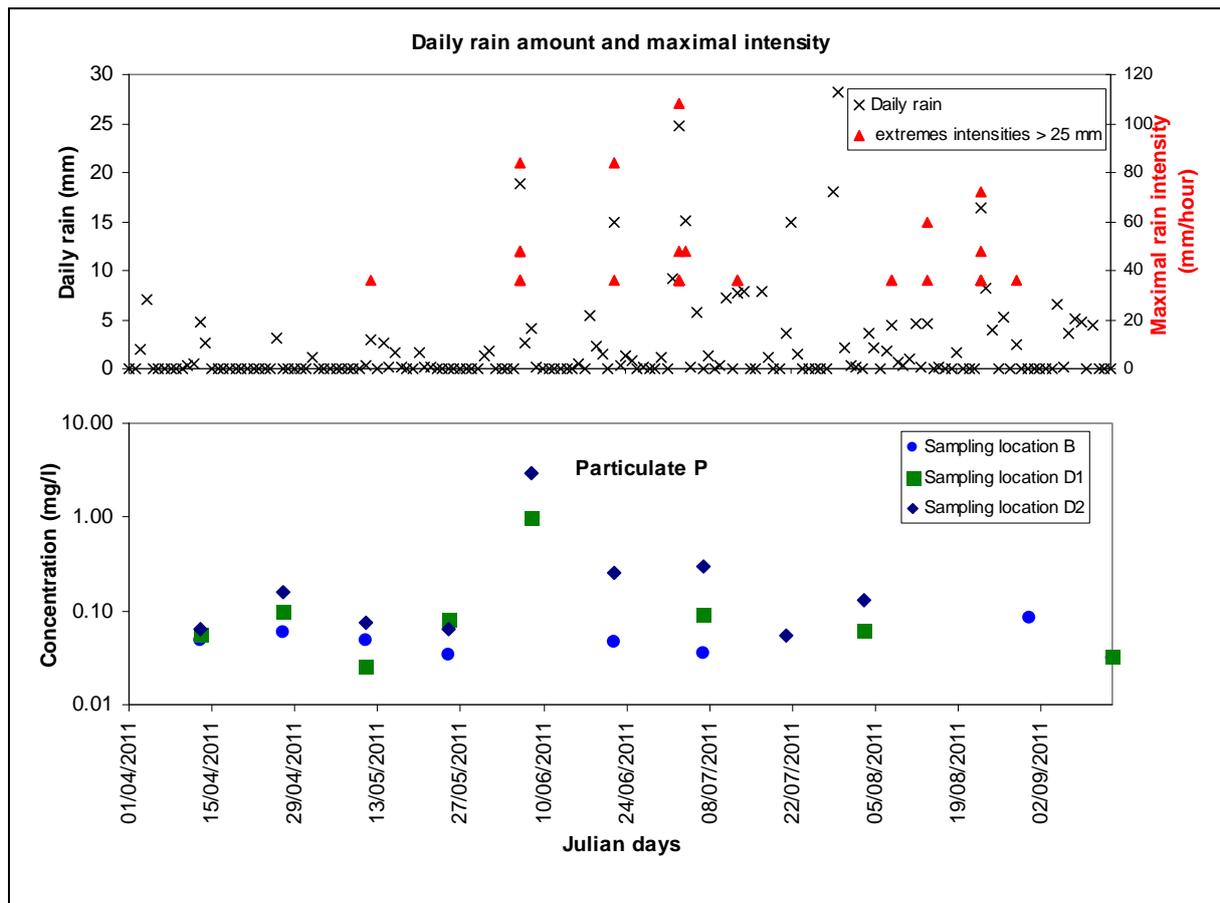


Abb. 3: Konzentration von partikulärem Phosphor (Messintervall 2 Wochen) in kleinen Gräben neben landwirtschaftlich genutzten Flächen in der norddeutschen Tiefebene (Ketzin, Brandenburg) im Vergleich zu täglichen Regen und dem Auftreten von erosionsrelevanten Niederschlägen.

Zwei weitere Datengrundlagen wurden auf ihre ... untersucht, die jedoch auf Grund der Kürze des Beitrages hier nicht vorgestellt werden können:

- Eine Modelstudie mit dem prozess-basierten, räumlich verteilten, kontinuierlichen Model MAHLERAN (Wainwright *et al.* 2008), welches in Starkregenphasen den Sedimenttransfer in bis zu Sekundenzeitschritten berechnen kann, zeigte für Simulationen für einen unbewachsenen Hang eine signifikante Zunahme an jährlichem Sedimentaustrag für ein Durchschnittsjahr in den 2000ern im Vergleich zu einem Durchschnittsjahr der 1970er (bei vergleichbarem Jahresniederschlag).
- Eine Auswertung der Jahrbücher der Berliner Feuerwehren von 2000-2010 zeigt eine kontinuierliche Zunahme an Einsätzen von Kleinsatzfahrzeugen, welche für den klassischen Wasserschaden ‚Keller auspumpen‘ benutzt werden, und zwar von knapp 2000 Einsätzen in 2001 zu ca. 7500 Einsätzen in 2010. Da die Anzahl der Keller in diesem Zeitraum in Berlin nicht signifikant gestiegen ist, könnte diese Zahlenexplosion ein Indiz dafür sein, dass die Regenrinnen, Dach- und Schachtabläufe dem derzeitigen Starkregenregime nicht angepasst sind.

## Schlussfolgerung

Falls es zu einer klimabedingten Zunahme an erosionsrelevanter Starkregen für den Raum Deutschland / Zentraleuropa kommen sollte, könnte dies eine Reihe von negativen Effekten für den Bodenwasserhaushalt der Region haben. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen könnte ein vermehrtes Auftreten an erosionsrelevanten Starkregen zu einem Anstieg an Bodenerosionserscheinungen an Hängen, Auslaugen der Böden, verstärktem Ausspülen von Nähr- und Schadstoffen und Verlagerung dieser Stoffe in die Oberflächengewässer mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Gewässerökologie führen. Eine Vervielfachung von erosionsrelevanten Starkregen könnte damit eine einschneidende Auswirkung auf die Landschaftsökologie haben. Bei den genannten Verlagerungsprozessen spielt jedoch nicht nur eine Zunahme an erosionsrelevanten Starkregen im untersuchten Intensitäts-/Dauerspektrum eine Rolle, sondern auch weitere hydrologische Eigenschaften des Niederschlags- und Abflussregimes, wie Gesamtniederschlagsdauer und -verlauf, Vorregencharakteristika, aktuelle Bodenfeuchte, Abflusskonzentrationsmerkmale und aktuelle Bodenbeschaffenheit. Für eine Abschätzung zum Ausmaß möglicher Schäden bietet sich die Anwendung von prozessbasierten Erosionsmodellen an, welche die Auswirkungen der hier untersuchten Starkregenveränderungen berechnen kann. Eine konkrete Folgeabschätzung geht jedoch über den Umfang dieser Studie hinaus.

## Literatur

- ECHO Online Resources (2012) [online], Information on the ECHO Project (Feedbacks between ecological and hydrological systems), University of Potsdam, Germany. Available from: <http://www.uni-potsdam.de/ECHO>.
- Helsel, D. R. und R.M. Hirsch (2002): Statistical Methods in Water Resources. Hydrologic Analysis and Interpretation. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Suwanee River Basin, Florida.
- Lennox, S. D., R. H. Foy, R. V. Smith, C. Jordan (1997): Estimating the contribution from agriculture to the phosphorus load in surface water, p. 55–75. In Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. [eds.], Phosphorus loss from soil to water. CAB International, Wallingford, UK.
- Mueller, E.N., Pfister, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology* 411, 266–278.
- Mueller, E. N., P. Hunke, P. Biro, S. Jacobi (in preparation) Multi-spatiale Analyse von Nährstoffverlagerungen in Oberflächengewässern in einem landwirtschaftlich genutzten Einzugsbiet in Brandenburg.
- Schönwiese, C.-D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Berlin.
- Wainwright, J., A. J. Parsons, E. N. Müller, R. E. Brazier, D.M. Powell, B. Fenti (2008): A transport-distance approach to scaling erosion rates: 1. Background and model development, *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.1624.
- Yue, S., P. Pilon, B. Phinney, B., G. Cavadias (2002): Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259, 254–271.

# Starkregengefahrenkarten und Risikomanagement im Glems-Einzugsgebiet

André Assmann<sup>1</sup>, Stefan Jäger<sup>1</sup>, Kathrina Fritsch<sup>1</sup> und Christian Brauner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> geomer GmbH, Heidelberg, Deutschland

<sup>2</sup> Risk Management, Horben, Deutschland

## Zusammenfassung

Nachdem jeweils im Sommer der Jahre 2009 und 2010 das Einzugsgebiet der Glems (nordwestlich von Stuttgart) von hohen Schäden und zwei Todesopfern durch Starkregenereignisse betroffen war, schlossen sich die acht Kommunen des Einzugsgebietes zusammen, um gemeinsam eine Risikomanagement-Strategie zu entwickeln. Zunächst wurden für das Einzugsgebiet der Glems Starkregengefahrenkarten für drei verschiedene Niederschlagsszenarios erarbeitet. Die Karten dienen nun neben den Entwürfen der Hochwassergefahrenkarten als Grundlage zur Lokalisierung und Priorisierung von Risikoschwerpunkten und der Entwicklung eines ganzheitlichen und nachhaltigen Ansatzes des Risikomanagement.

## Einleitung

Unterhalb von abflusswirksamen Flächen bergen „lokale extreme Hochwasser infolge, hoher, zeitlich und räumlich eng begrenzter Niederschläge“ (DWA, 2010) eine besonders starke Gefährdung. Häufig finden sich Problemstellen am Übergang von landwirtschaftlichen Flächen zur Ortslage. Dies liegt zum einen daran, dass sonst trockene Tiefenlinien durchflossen werden oder aber der Eintritt in die Verdolung durch Überlastung oder Verklausung nicht möglich ist. Daneben „ertrinken“ aber auch insbesondere stark versiegelte Siedlungsbereiche sowie Muldenlagen am eigenen Überschusswasser. In der Folge kommt es zu Überflutungen, Erosions- und Akkumulationsschäden und als Konsequenz daraus wiederum zu Beschädigungen von Gebäuden und Infrastruktur.

Die Erstellung von Gefahrenkarten bietet nun die Möglichkeit, räumliche Gefährdungsmuster zu erkennen und die damit verbundenen Risiken zu bewerten. Somit sind die Gefahrenkarten wichtiges Planungsinstrument für Entscheidungsträger und Risikomanager, ebenso sind sie aber auch Grundlage für die Information und Sensibilisierung der Bevölkerung.

## Methodische Vorgehensweise zur Erstellung von Starkregengefahrenkarten

Grundlage der Darstellung in den Starkregengefahrenkarten ist eine instationäre Modellierung des oberirdischen Abflusses mit einem rasterbasierten, hydrodynamischen 2D-Simulationsmodell. Die hierfür benötigten Inputdaten werden in drei Hauptmodulen für die Berechnung aufbereitet.

Der Niederschlagsinput wird in Form von räumlich und zeitlich variierenden Niederschlagsrastern in das Modell eingespeist. Somit können für die bei Starkregenereignissen stark variierenden und lokal begrenzten Niederschlagsintensitäten zeitlich und räumlich verändert und angepasst werden. Für das vorgestellte Projekt an der Glems wurde neben der Nachrechnung des Realereignisses aus 2010 ein

einstündiger, endbetonter Niederschlagsverlauf verwendet, der nur in seiner Intensität im Gebiet modifiziert wurde. Die Niederschlagsintensitäten wurden dabei für drei verschiedene Szenarios für ein häufiges (ca. 60mm), ein mittleres (ca. 120mm) und ein seltenes Ereignis (ca. 240mm) festgelegt. Aufgrund der „erlebten“ Niederschlagsintensitäten von bis zu 180mm/h während der stattgefundenen Ereignisse wurde deutlich von den üblicherweise verwendeten KOSTRA-Werten und definierten Jährlichkeiten abgewichen. In Abbildung 1 ist exemplarisch ein Ausschnitt der Berechnungsergebnisse an der Glems für die drei verschiedenen Niederschlagszenarios dargestellt.

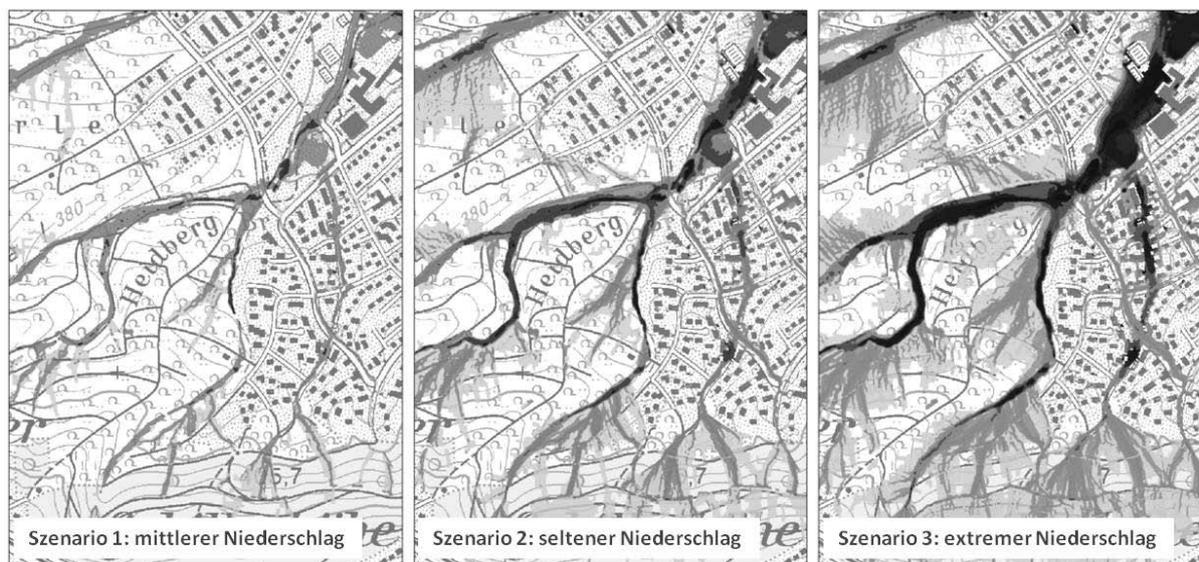


Abb. 1: Ausschnitt aus den Starkregengefahrenkarten für drei Niederschlagsszenarien.

Der Anteil des gefallenen Niederschlages, der nun zum direkten Oberflächenabfluss führt (Effektivniederschlag) wird mit einem datenbankbasierten Infiltrationsmodell berechnet. Dieses Modell basiert auf dem Infiltrationsansatz nach Green & Ampt und gibt abhängig von Niederschlagsintensität, Bodenart und Sättigungszustand des Bodens Infiltrationsverläufe und daraus abgeleitete zeitvariable Verläufe des Abflussbeiwertes aus. Die jeweiligen Endabflussbeiwerte werden Datenbank-basiert aus den Faktoren Boden, Relief und Landnutzung abgeleitet und mit den Basisdaten verknüpft.

Die räumliche Differenzierung und Auflösung der verwendeten Daten spielt eine entscheidende Rolle für die in einem dritten Schritt durchgeführte Berechnung des Fließverhaltens in der Fläche. Zur Verfügung standen das 1m Laserscanmodell von Baden-Württemberg, ATKIS/ALK Landnutzungsdaten und die Bodendaten aus der BÜK50. Durch hohe Auflösung der Geländedaten konnte ein hoher Detaillierungsgrad der Berechnungsergebnisse ermöglicht werden. Die eigentliche hydraulische Berechnung wird mit der Simulationssoftware FloodArea<sup>HPC</sup> durchgeführt, wobei an der Glems alle 3 Minuten als Zwischenergebnis Überschwemmungstiefen, Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen ausgegeben wurden. Dies ist für eine zeitliche Analyse des Abflussgeschehens sowie als Basis für die Erstellung von Animationsfilmen notwendig.

Das ca. 300 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet der Glems wurde nach der beschriebenen Methodik in der Auflösung des Geländemodells modelliert. Die Durchführung der Simulationsberechnungen mit derart hochauflösten Daten und den sich daraus ergebenden großen Datenmengen (300 Mio Berechnungsknoten) wird durch den Einsatz von Parallelprozessierung auf einem Computercluster ermöglicht (Assmann et al., 2007). Die Ergebnisse zeigen die räumlichen Gefährdungsmuster von abfließendem Niederschlagswasser selbst für kleinräumige topographische wie anthropogene Strukturen.

## Plausibilisierung der Berechnungsergebnisse

Eine Überprüfung der Berechnungsergebnisse auf deren Plausibilität wurde bereits nach einer ersten Probesimulation durchgeführt. So wurden während der Geländekartierung kritische Punkte wie zum Beispiel Rückstaubereiche an Straßenübergängen, kleine Mauern und Verdolungen erfasst und ins Geländemodell eingearbeitet. Weiter wurden Validierungsdaten gesammelt bzw. erfasst und mit den Berechnungsergebnissen abgeglichen (siehe Tab.:1).

Die Überarbeitung der Geländedaten und die Integration von Kleinstrukturen ist bei der Simulation von kleinräumigen Fließstrukturen ein besonders wichtiger und zeitintensiver Arbeitsschritt. Eine Überprüfung und Korrektur der Reliefstrukturen ist unverzichtbar um die vorherrschenden Abflussverhältnisse plausibel berechnen zu können.

In folgender Tabelle (Tab.:1) sind die an der Glems zur Verfügung stehenden Validierungsdaten aufgelistet und mit einer kurzen Bemerkung zu ihrer Verwendung versehen.

Tab. 1: Vorliegende Validierungsdaten und gesammelte Erfahrungen.

Datentyp	Bemerkungen/ Verbesserungsvorschläge
Fotos (von Mitarbeitern der Kommune oder Privatpersonen während des Ereignisses aufgenommen)	Die nachträgliche Referenzierung von Bilddateien kann durch den Einsatz von GPS-Kameras erheblich vereinfacht werden, zumindest die Kommune sollte hier entsprechend vorbereitet sein, ideal sind auch Angaben zur Blickrichtung
Analoge Einträge in Karten	Überprüfung von korrekten Lageeinträgen zum Beispiel bei Wegschäden oder dokumentierten Fließwegen nötig
Feuerwehrmeldungen	Ursache der Einsatzmeldung ist nicht bekannt, bereits eine einfache Zuordnung (Ankreuzen auf Auswahlliste) würde den Nutzen der Information deutlich erhöhen
Videos (youtube etc.)	Unbekannte Autoren und/oder ungenaue Lagebeschreibung, nicht beeinflussbar, aber eine wichtige Informationsquelle für abgelaufene Ereignisse
Luftaufnahmen während des Ereignisses (Polizei)	Meist fehlen genaue Zeitangaben und Ansprechpartner, diese Informationen wären aber eine hilfreiche Grundlage für eine zeitliche Rekonstruktion von Ereignissen
Ereigniskartierung von Hochwassermarken etc.	Gute Validierungsgrundlage für Ereignis-Nachrechnungen, die Qualität sehr stark von der Qualifikation des Bearbeiters abhängig, eine derartige Aufbereitung ist leider nur selten verfügbar
Mündliche Situationsberichte während Geländebegehungen	Sind teilweise sehr subjektive Darstellungen, viele interessante Detailinformationen sind so erhältlich, diese Information lässt sich aber nicht gezielt erheben
Flurnamen (z.B. Am Bächle, Feuersee...)	Hinweise auf ehemalige oder noch vorhanden Strukturen und Phänomenen inkl. Oberflächenabfluss oder Muldenlage

Bei dem Vergleich der Validierungsdaten mit den Modellberechnungen zeigte sich eine sehr große Übereinstimmung. Generell lässt sich bei der Simulation von Starkregenereignissen aufgrund der Datenlage eine Validierung nur punktuell durchführen, die restliche Fläche kann nur auf Plausibilität überprüft werden (geomer, 2011). Die Abbildung von großräumigen Gefährdungsmustern und Hauptfließstrukturen ist durch die Rückmeldungen von betroffenen Gemeinden bestätigt. Auch lokale Schadensdokumentationen wie beispielsweise die Überflutung von Tiefgaragen können in den Modellergebnissen nachvollzogen werden (siehe Abb. 2).

Da die Starkregengefahrenkarten kein einzelnes real mögliches Ereignis zeigen, sondern eine Überlagerung vieler potentieller Einzelereignisse darstellen, die Beobachtung aber immer auf reale Ereignisse bezogen ist, bedarf es bei der Plausibilisierung einer hohen Abstraktion. Dies ist für nicht eng mit der Thematik befasste Personen oft schwierig zu leisten und bedarf ausführlicher Erläuterung.



Abb. 2: Überflutete Tiefgaragen während des Starkregenereignisses 2010 und deren Abbildungen in den Karten. (Fotos: Gemeinde Ditzingen)

### Konzeption der Risikomanagementphase

Nachdem die Erstellung und Plausibilisierung der Starkregengefahrenkarten für das Einzugsgebiet an der Glems abgeschlossen ist, müssen die aus den Karten ableitbaren Informationen nun optimal genutzt werden. Hierbei sind unter der hohen Anzahl von Problempunkten zunächst die besonders wichtigen zu extrahieren. Dies sind Bereiche mit besonders hoher Gefährdung (große Überflutungstiefen oder hohe Fließgeschwindigkeit) oder besonders hoher Vulnerabilität (Gefährdung von Menschenleben, hohe Empfindlichkeit von Gebäuden bzw. Inhalten gegenüber Wasser). In der Zusammenarbeit von Fachbehörden und Experten sind kritische Objekte zu identifizieren (z.B. Kindergarten, Heime, Rettungsleitstellen) und ihre jeweilige Gefährdung unter Einbeziehung von bereits getroffenen

Schutzmaßnahmen zu und baulichen Besonderheiten beurteilen. Des Weiteren werden besonders die Themenfelder Energieversorgung, Telekommunikation, Umweltauswirkungen, Verkehr und Kulturgüter bearbeitet. Dabei stellen sich u.a. die Fragen, welche Objekte prioritär zu schützen sind und welche ggf. als erste wieder in Betrieb genommen werden sollten.

Ziel ist es, mit Hilfe von gemeinsamen Seminaren und Workshops, den Kommunen einen Einstieg in ein ganzheitliches und vor allem nachhaltiges Risikomanagement zu ermöglichen. Dabei ist es wichtig, dass die Entscheidungsträger mit den komplexen Informationen aus den Starkregengefahrenkarten umzugehen lernen und die für sie relevanten Fragen beantworten können und nur bei vielschichtigen Themen auf externe Fachexpertise angewiesen sind.

An der Glems wurde auf der Basis der Starkregengefahrenkarten bereits eine Vorauswahl von Risikoschwerpunkten getroffen, die aktuell mit den Kommunen gemeinsam diskutiert und priorisiert werden. Folgender Ausschnitt einer Arbeitskarte (Abb. 3) zeigt exemplarisch zwei dieser Risikoschwerpunkte mit einer kurzen Beschreibung:

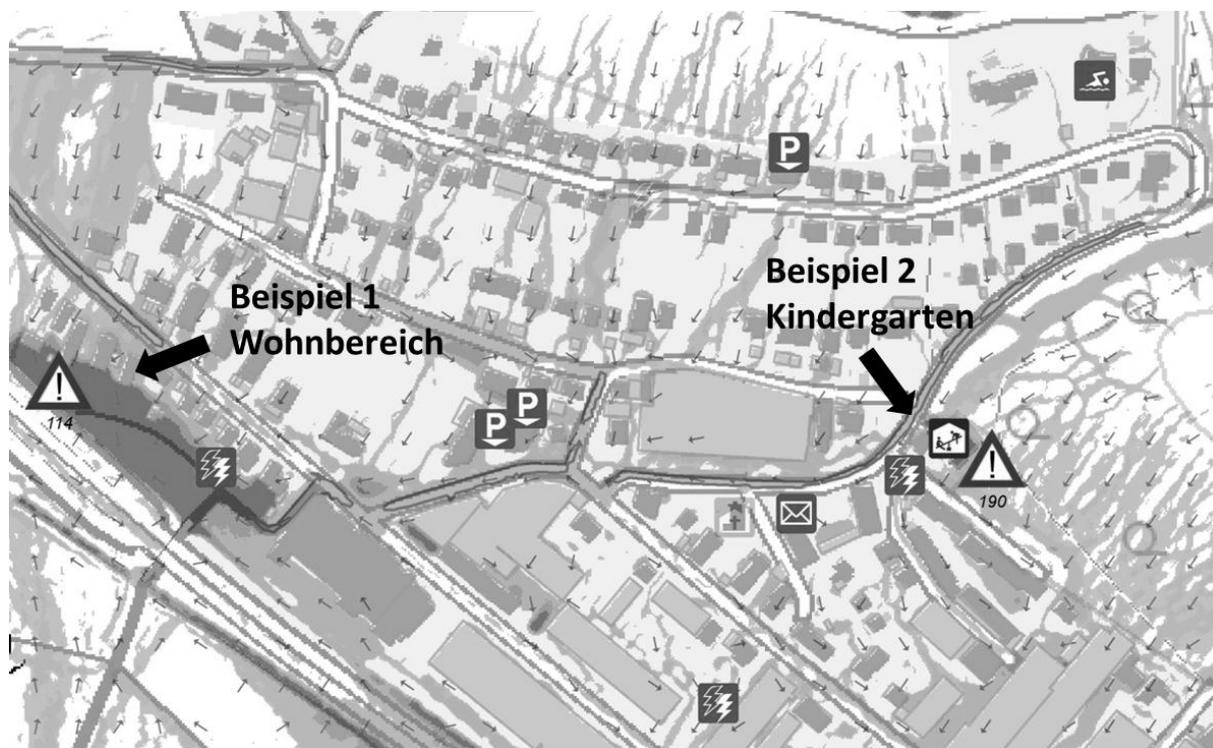


Abb. 3: Priorisierte Risikoschwerpunkte im Wohnbereich mit sehr hohen Überschwemmungstiefen (Beispiel 1) und in öffentlichen Einrichtungen (Kindergarten, Beispiel 2)

**Beispiel 1:** Tiefer gelegener Wohnbereich an einem hohem Straßendamm mit Verdolung. Nach Dokumentationen von Anwohnern ist der Bereich bei Starkregen schnell überschwemmt und es treten sehr große Überflutungstiefen auf.

**Maßnahmenvorschlag:** Objektschutz direkt am Gebäude und vertikale Evakuierungsplanung sowie Reduzierung des Zuflusswassers.

**Beispiel 2:** Kindergarten, dieser war bei den vergangenen Starkniederschlägen, überwiegend durch Hangwasser aus dem angrenzenden Waldbereich real betroffen. Im Ereignisfall ist das Gebäude direkt durch eintretendes Hangwasser gefährdet, zudem können die Zufahrtswege unzugänglich sein und

Wasser aus dem Straßenbereich ins Gebäude eintreten. In dem entsprechenden Straßenabschnitt ist zudem mit hohen Fließgeschwindigkeiten zu rechnen

**Maßnahmenvorschläge:** Rückhalt des vom Hang kommenden Wassers, Ableitung weiterer Wassermengen bei Extremereignissen, Evakuierungsplanung, Sicherung des Eingangsbereiches um zu vermeiden, dass Wasser von der Straßenseite her eintreten kann (Schwelle). Die Maßnahmen sind hier bereits in Planung.

### **Schlussfolgerung**

Der im Projekt betriebene hohe Aufwand an Datenerfassung und Modellierungstechnik hat ein Ergebnis mit hoher Genauigkeit und damit hoher Akzeptanz ermöglicht. Ebenso stehen mit den erfassten und modellierten Daten vielfältige Zusatzinformationen zur Verfügung, die eine Risikobewertung und weiteren Planungsschritte deutlich erleichtern. Um möglichst effektiv und zeitnah praktischen Nutzen aus den gewonnenen Informationen zu ziehen, ist eine enge Abstimmung mit den betroffenen Fachgebieten notwendig. Ohne eine Einbeziehung der Betroffenen ist auch eine allseits akzeptierte Priorisierung von Risikoobjekten und Maßnahmen nicht möglich. Um nachhaltig die verfügbaren Informationen nutzen zu können, ist es ebenso wichtig, dass die Betroffenen lernen, die jeweils für sie relevanten Informationen aus den Karten zu entnehmen. Ebenso müssen auch längerfristig die Informationen der Bevölkerung in geeigneter Weise zur Verfügung stehen.

### **Literatur**

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2010): Audit „Hochwasser – wie gut sind wir vorbereitet“, Merkblatt 551.
- geomer GmbH (2011): Hochwassergefahrenkarte für Starkregenereignisse im Einzugsgebiet der Glems, Projektbericht.
- Assmann, A, Schröder, M und Hristov, M. (2007): High Performance Computing für die rasterbasierte Modellierung. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2007: Beiträge zum 19. AGIT-Symposium Salzburg, 750-755.

# **Änderung von Bemessungsniederschlag – relevant in Hydrologie und Meteorologie**

Gabriele Malitz

Abteilung Hydrometeorologie, Deutscher Wetterdienst, Berlin, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Schon seit einiger Zeit werden im Deutschen Wetterdienst (DWD) Untersuchungen zum Starkniederschlag vor dem Hintergrund der Anpassung an den Klimawandel durchgeführt. Die für hydrometeorologische Leistungen erarbeiteten Ergebnisse dienen dem vorbeugenden Schutz vor pluvial, pluvionival oder fluvial verursachten Hochwassern. Der vorliegende Beitrag ist auf die Starkniederschläge im Kurzzeitbereich und die daraus abgeleiteten Bemessungsniederschläge fokussiert, die z. B. für Vorsorgemaßnahmen bei pluvialen Überflutungen relevant sind. Besondere Beachtung finden Niederschlagsdauern von weniger als 6 Stunden. Kommt es doch sowohl im urbanen Raum als auch im unbeobachteten Terrain zu gravierenden Folgen, wenn z. B. durch zwei quasistationäre Schwergewitter innerhalb von 4 Stunden beträchtliche Niederschlagsmengen in die Ortskanalisation gelangen oder der Gebirgsbach sturzflutartig anschwillt.

Auf den korrekten Umgang mit den Inputwerten muss sehr geachtet werden, obwohl die Erwartungshaltung der Öffentlichkeit zzt. kein anderes Ergebnis als eine Niederschlagszunahme in allen Regionen Deutschlands zuzulassen scheint. Es werden generell schneller und mehr Ereignisse an Standorten überall in Deutschland bekannt. In einigen Regionen Deutschlands haben Kurzzeit-Starkniederschläge tatsächlich zugenommen, in anderen Regionen handelt es sich nur um eine gefühlte Zunahme.

Der vorliegende Beitrag beteiligt sich mit Beispielen aus der Fortschreibung von KOSTRA-DWD unter besonderer Berücksichtigung von Messwerten aus dem Jahrzehnt 2001 bis 2010 und unter Hinweis auf das DWA-Arbeitsblatt A 531 „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrintervall und Dauer“ an der Diskussion über die Veränderung von Bemessungsniederschlägen. Dabei wird explizit auf Grenzüberschreitungen an Schnitt- bzw. Nahtstellen Bezug genommen, z. B. zwischen Meteorologie und Hydrologie, zwischen Schauer- und Dauerniederschlag, zwischen klein- und großräumigem Niederschlag, zwischen Starkniederschlag in der öffentlichen Wahrnehmung und in der Bemessungspraxis.

## **Einleitung**

Wenn Zeitreihen auf der Basis von Stundenwerten untersucht werden, wird bspw. konstatiert, dass sich die Anzahl der Werte ab 10 mm/h im Laufe der Jahre erhöht hat. Dieser Fakt wird als Zunahme des Starkniederschlags dokumentiert. Ohne den Einbezug notwendiger Kontextinformationen gilt das jedoch nicht uneingeschränkt. Standortbezogen gefundene Resultate sind nicht zwangsläufig überall in Deutschland zutreffend. Ein anderer Aspekt ist der Umstand, dass im wasserwirtschaftlich relevanten Sinn beispielsweise ein Niederschlag von 10 mm/h noch kein wirklicher Starkniederschlag gemäß DIN 4049 ist (Malitz, 2011). Im Folgenden geht es um Starkniederschläge besonderer Art – um die

Bemessungsniederschläge, wie sie bei der Dimensionierung von wasserwirtschaftlichen Anlagen bspw. in der Siedlungsentwässerung Anwendung finden (DWA, 2006).

## Methoden

Die Ergebnisse der von den Hydrometeorologen des DWD durchgeführten extremwertstatistischen Untersuchungen der Niederschlagshöhe wurden u. a. als KOSTRA-Atlas (Basiszeitraum 1951 bis 1980) veröffentlicht. Das Akronym KOSTRA "Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung" symbolisiert eine konzertierte Aktion von Hydrometeorologie und Wasserwirtschaft in den 1980er- und 1990er-Jahren. Der KOSTRA-Atlas "Starkniederschlagshöhen für Deutschland" (DWD, 1997) wurde als bundesweit einheitliche, verbindliche Regel durch das "Niederschlagsregelwerk" (Stalman et al., 2004) eingeführt. Bezogen auf den Basiszeitraum 1951 bis 2000 gelten heute die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2000 (DWD, 2005). Im hydrologischen Winterhalbjahr sind sowohl unter meteorologisch-klimatologischen als auch hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Aspekten die hohen Werte des Niederschlagsdargebots (Summe aus Schmelzwasser aus der Schneedecke plus Regen) von Bedeutung - insbesondere in Höhenlagen oberhalb 400 m. Die von den Hydrometeorologen des DWD (in Anlehnung an das KOSTRA-Prinzip) ermittelten REWANUS-Werte (Regionalisierte Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland) quantifizieren (für unterschiedlicher Dauer von 1 Tag bis 10 Tage) im Falle pluvio-nival verursachter Überflutungen die relevanten hydrometeorologischen Input-Werte (DWD, 2008).

Gemäß dem KOSTRA-Prinzip werden mithilfe eines ausgewählten Analyseverfahrens die extremwertstatistische Bewertung der innerhalb eines Messzeitraums ausreichender Länge zufällig aufgetretenen Ereignisse und die Extrapolation auf sehr seltene Niederschlagsereignisse vorgenommen. Der extremwertstatistische Ansatz geht für jede Dauerstufe  $D$  von einer jährlichen oder partiellen Serie aus, die sich aus einer Niederschlagszeitreihe ergibt. Jeder Serie der Niederschlagshöhe  $h_N$  wird durch eine Regressionsrechnung die theoretische Verteilungsfunktion  $h_N(D;T) = u(D) + w(D) \cdot \ln T$  in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall  $T$  angepasst. Die Regressionsgerade wird durch den Parameter  $u(D)$ , Schnittpunkt mit der Ordinate, und den Anstiegsparameter  $w(D)$  charakterisiert. Um eindeutige Niederschlagshöhen über alle Dauerstufen hinweg zu erhalten, werden im Dauerstufen-Bereich I (5 min bis 60 min) ein hyperbolischer Ausgleich des Verteilungsparameters  $u(D)$  und ein doppeltlogarithmischer Ausgleich des Verteilungsparameters  $w(D)$ , im Dauerstufen-Bereich II (60 min bis 12 h) ein doppeltlogarithmischer Ausgleich von  $u(D)$  und  $w(D)$  vollzogen. Für jeden Standort in Deutschland lässt sich eine Starkniederschlagstabelle gemäß KOSTRA-DWD-2000 angeben.

Entsprechend KOSTRA-DWD liefert auch KOSTRA-DWD-2000 mehrere Karten, die deutschlandweit flächendeckend die räumliche Verteilung von Starkniederschlagshöhen für Rasterfelder von 8,45 x 8,45 km in Abhängigkeit von der Dauerstufe  $D$  (von  $D = 5$  min bis  $D = 72$  h) und vom Wiederkehrintervall  $T$  (von  $T = 1$  a bis  $T = 100$  a) enthalten.

Für KOSTRA-Werte gelten in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall  $T$  bestimmte Toleranzangaben:

- Toleranzbetrag von  $\pm 10$  % bei  $1 \text{ a} \leq T \leq 5 \text{ a}$ ,
- Toleranzbetrag von  $\pm 15$  % bei  $5 \text{ a} < T \leq 50 \text{ a}$ ,
- Toleranzbetrag von  $\pm 20$  % bei  $50 \text{ a} < T \leq 100 \text{ a}$ .

Die wesentlichen Gründe dafür sind die große zeitliche Variabilität des Niederschlags und die zwangsläufig eingeschränkte Repräsentativität von Messreihen für die Zukunft. Bei der Nutzung angegebener KOSTRA-Werte in Planungsprojekten, wie z. B. in der Überflutungsvorsorge kommunaler Entwässerungssysteme, ist durch den Planer jeweils zu entscheiden, in welchem Maße der Toleranzbetrag berücksichtigt werden muss.

Die Untersuchungen zum Starkniederschlag beschränkten sich nicht auf die im Abstand von rund zehn Jahren vorgenommenen KOSTRA-Fortschreibungen. Vielmehr sind vor dem Hintergrund der Anpassung an den Klimawandel zahlreiche kleinere Einzelprojekte durchgeführt worden (Malitz, 2010). Anhand ausgewählter Stationen wurde getestet, inwieweit die Starkniederschlagsaussagen, bestehend aus KOSTRA-Werten mit Toleranzangaben, generell oder teilweise hinsichtlich bestimmter Dauerstufen oder Wiederkehrintervalle sowie zumindest in einigen Regionen zu spezifizieren sind. Die wasserwirtschaftlichen Landesbehörden erhielten dann besondere Anwendungsempfehlungen, wenn der Toleranzbereich der KOSTRA-Werte in Richtung einer Zunahme überschritten wurde.

Auf der Grundlage der im Basiszeitraum 1951 bis 2010 gemessenen Niederschlagsdaten wird in den Jahren 2011 und 2012 erneut an der Aktualisierung der KOSTRA-Werte gearbeitet, so dass im Jahre 2013 die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2010 verfügbar sein werden. Nach Abschluss der gegenwärtigen KOSTRA-Fortentwicklung, wird klar sein, in welchen Regionen Deutschlands Änderungen der KOSTRA-Werte im Bereich kleiner und großer Dauerstufen zu berücksichtigen sind. Derzeit werden die stationsbezogenen extremwertstatistischen Auswertungen laut DWA-Arbeitsblatt A 531 (DWA, 2012) vorgenommen.

Die Angaben zu Häufigkeit und Menge von Starkregen für Dauerstufen von  $D > 12$  h werden wie bisher auf der Grundlage des großen Datenfonds von Tageswerten der Niederschlagshöhe berechnet. Im Anschluss an die stationsbezogenen extremwertstatistischen Auswertungen wird der Regionalisierungsschritt vollzogen. Dabei geht es um die Übertragung von Ergebnissen, welche für Stationsstandorte ermittelt wurden, auf die vielen Standorte ohne Niederschlagserfassung.

## **Ergebnisse**

Die Tab. 1 zeigt einen Auszug aus der punktuellen Starkniederschlagstabelle (1951 bis 2010), die nach der Auswertung der langen, hoch aufgelösten Niederschlagszeitreihe (Monate Mai bis September) für die Wetterwarte Öhringen entstanden ist. Die aufgelisteten Starkniederschlagshöhen basieren auf Messwerten, die aus digitalisierten Niederschlagsschreiberstreifen und automatisch erfassenden Ombrometern in den Kalendermonaten Mai bis September gewonnen wurden. Die Befunde gelten jedoch praktisch im ganzen Jahr, da neben den beiden Übergangsjahreszeiten auch der Winter zunehmend sommerliche Eigenschaften aufweist.

Im Falle der Wetterwarte Öhringen sind die Starkniederschlagshöhen im Basiszeitraum 1951 bis 2010 für fast alle in Tab. 1 aufgeführten D,T-Kombinationen größer als die entsprechenden Werte im Basiszeitraum 1951 bis 1980. Für Öhringen ist im Falle sehr kleiner Dauerstufen (z. B.  $D = 15$  min) eine mehr als 20%-ige Zunahme der extremwertstatistisch ermittelten Starkniederschlagshöhe zu verzeichnen. An Standorten in Öhringen sollte heutzutage in Planungsaufgaben, in denen bspw. der 20-jährige 15-min-Niederschlag relevant ist, ein Wert angesetzt werden, welcher Anfang der 1990er-Jahre noch als hundertjähriger 15-min-Niederschlag galt.

Tab. 1: Starkniederschlagshöhen (in mm) für verschiedene Dauerstufen D und Wiederkehrintervalle T an der Wetterwarte Öhringen (Monate Mai bis September, 1951 bis 2010, ohne 1966 und 1992) einschließlich der Fehlerangaben

D	T = 1 a	T = 5 a	T = 20 a	T = 100 a
5 min	6,0 ± 0,3	10,0 ± 1,1	13,5 ± 1,9	17,5 ± 2,8
15 min	10,4 ± 0,7	17,6 ± 2,2	23,9 ± 3,5	31,0 ± 5,1
30 min	13,2 ± 0,9	22,4 ± 2,8	30,4 ± 4,5	39,6 ± 6,5
60 min	15,9 ± 1,1	27,2 ± 3,4	36,9 ± 5,5	48,2 ± 7,9
120 min	18,5 ± 1,2	30,6 ± 3,6	41,0 ± 5,8	53,1 ± 8,5
240 min	21,4 ± 1,2	34,4 ± 3,8	45,6 ± 6,2	58,6 ± 9,1

An einer nicht geringen Anzahl von Stationen gibt es ähnliche Ergebnisse. Andererseits fehlt es auch nicht an Stationen, an denen bei zunehmender Länge der Messreihe die ergiebigen Starkregenereignisse seltener aufgetreten sind, als es statistisch gesehen zu erwarten gewesen wäre.

Für insgesamt 60 Stationen wurden Sonderuntersuchungen durchgeführt. In der Abb. 1 sind am Beispiel einer bewusst ausgewählten D,T-Kombination - und zwar für die Dauerstufe D = 15 min und das Wiederkehrintervall T = 100 a - die Änderungen der Starkniederschlagshöhe auf der Basis des Zeitraums 1981 bis 2010 im Vergleich zu den entsprechenden Werten auf der Basis des Zeitraums 1951 bis 1980 visualisiert worden. Punktuell gesehen, kam es bei den 60 untersuchten Paaren von jeweils 30-jährigen Zeitreihen hoch aufgelöster Niederschlagswerte (in den Kalendermonaten Mai bis September) einerseits zu einer Abnahme (Beispiel: -4 % in Chemnitz) und andererseits zu einer leichten (Beispiel: +8 % in Hamburg-Fuhlsbüttel) oder größer als 20%-igen Zunahme (Beispiel: +29 % in Augsburg-Mühlheim) der für die Dauerstufe D = 15 min extremwertstatistisch ermittelten Starkniederschlagshöhe, mit deren Erreichen oder Überschreiten nur sehr selten gerechnet zu werden braucht.

Hervorzuheben ist, dass sich die Vergleichsergebnisse für einige der anderen D,T-Kombinationen von diesem Bild teilweise deutlich unterscheiden. Daher können weder Meteorologen noch Klimatologen die Frage nach der Zunahme von Starkregen mit wenigen Sätzen beantworten. Starkniederschlagsereignisse können sowohl Niederschläge kurzer Dauer und hoher Intensität als auch mehrere Stunden oder Tage anhaltende Niederschläge mit insgesamt großer Niederschlagsmenge sein. Die vorrangig mit dem Ziel ihrer Anwendung in der wasserwirtschaftlichen Praxis ermittelten Bemessungswerte werden auch in der Meteorologie selbst genutzt. Sie sind unter anderem dann von Interesse, wenn es um die Aktualisierung von Schwellenwerten für Wetterwarnungen unter Berücksichtigung der Niederschlagsdauer geht. Als Beispiel für ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Agrarmeteorologie zu nennen, wo Aussagen über Kurzzeit-Starkniederschläge zur Lösung von Fragen hinsichtlich der durch Intensivniederschlag verursachten Bodenerosion dienen.

Eine regelmäßige Überprüfung der KOSTRA-Werte ist auch in Zukunft notwendig, um beobachtete Änderungen im Hinblick auf dekadische Variabilitäten und langfristige Trends einschätzen und die Ergebnisse in Bezug auf extremwertstatistische Auswertungen von Klimaprojektionen einordnen zu können. Dabei ist es wichtig, nicht nur mit den Fachleuten zu kommunizieren, sondern eine gezielte Öffentlichkeitsarbeit zu leisten.

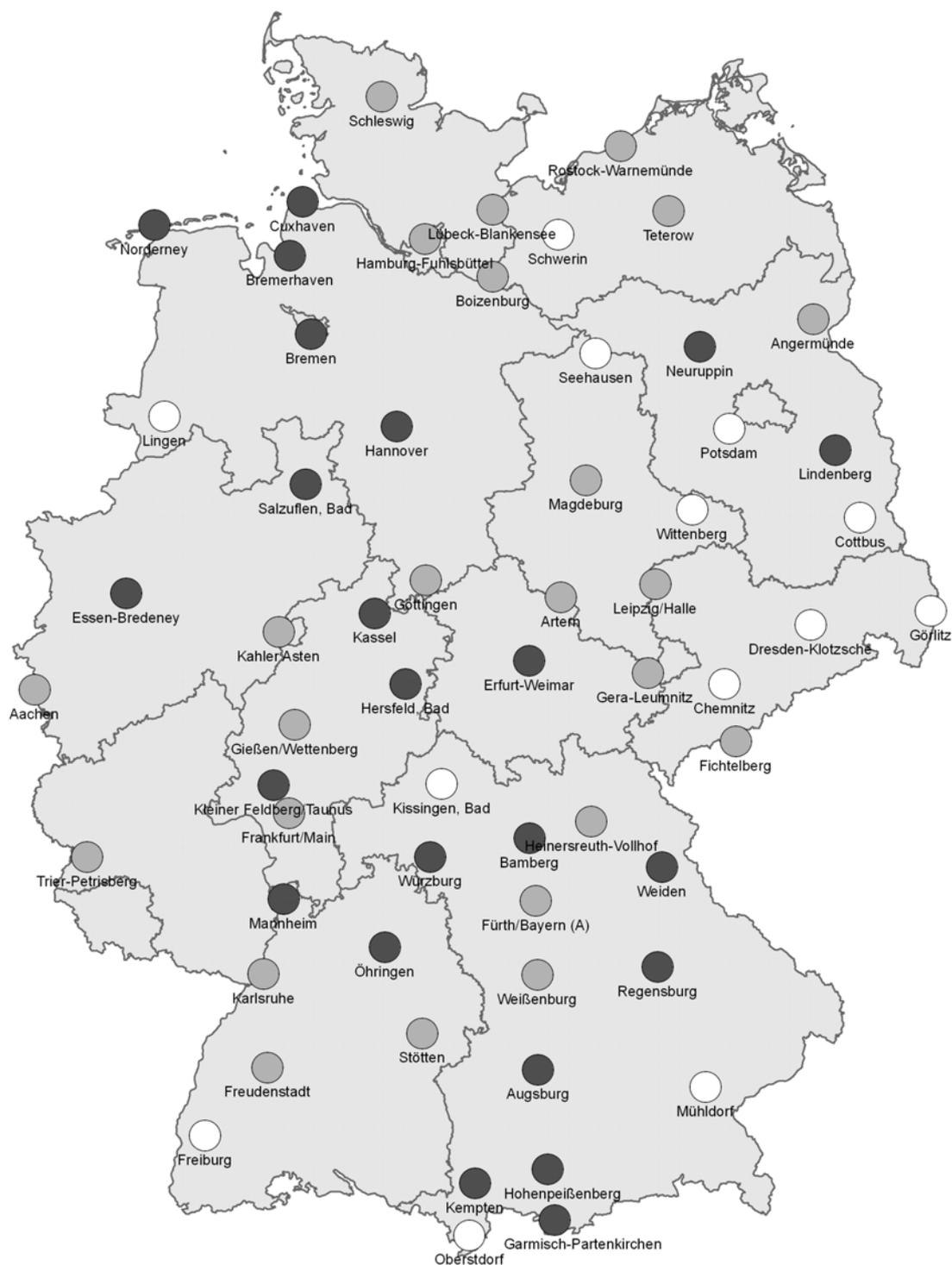


Abb. 1: Stationsbezogene Änderung der Starkniederschlagshöhen für die Dauerstufe  $D = 15$  min und das Wiederkehrintervall  $T = 100$  a auf der Basis des Zeitraums 1981 bis 2010 im Vergleich zu den entsprechenden Werten auf der Basis des Zeitraums 1951 bis 1980

(dunkle Kreise = Zunahme ( $> 20\%$ ), graue Kreise = leichte Zunahme, helle Kreise = Abnahme)

## **Ausblick**

Im Jahre 2013 werden die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2010 verfügbar sein, um sowohl beim Klimamonitoring von Extremwerten als auch bei der Dimensionierung zukunftsfähiger Entwässerungsanlagen von belastbaren Werten ausgehen zu können.

Mit dem Einsatz automatischer Niederschlagsmesser ist eine Zunahme der bisherigen Stationsanzahl für hoch aufgelöste Niederschlagswerte verbunden. Im Jahr 2020 werden an den rund 1000 Ombrometer-Stationen 25-jährige Zeitreihen hoch aufgelöster Niederschlagswerte vorliegen. Damit wird eine wesentliche Verbesserung der Datenbasis zur Aktualisierung von Bemessungsniederschlag aller Dauerstufen in den unterschiedlichen Regionen Deutschlands erwartet. Das führt einerseits insbesondere zu einer besseren Quantifizierung von winterlichen Bemessungsniederschlägen im Kurzzeitbereich. Andererseits könnten auch Untersuchungen zu extremen Starkniederschlagshöhen, wie sie seltener als einmal in 100 Jahren auftreten (Verworn et al., 2010), wieder aufgenommen werden.

Mit der Entwicklung einer Radar-gestützten Niederschlagsklimatologie zur flächendeckenden Ermittlung der räumlichen Struktur von Starkniederschlägen - insbesondere hinsichtlich der extremwertstatistischen Auswertung von konvektiven Starkniederschlägen - wurde begonnen. Die damit einhergehende hohe räumliche Auflösung braucht nicht erst als Ergebnis der Anwendung spezieller Regionalisierungsverfahren erzeugt zu werden. Erste Tests zur Nutzung der Radarklimatologie für Starkniederschlagsauswertungen werden bereits durchgeführt.

## **Literatur**

- DWA (2006): Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung. DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 100, Hennef
- DWA (2012): Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrintervall und Dauer. DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 531, Hennef (im Druck)
- DWD (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland – KOSTRA, Offenbach, Selbstverlag
- DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951–2000). Fortschreibungsbericht und Grundlagenbericht, [www.dwd.de/kostra](http://www.dwd.de/kostra)
- DWD (2008): Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze. REWANUS (1961/62 bis 2005/06), Informationsblatt des DWD, Berlin
- Malitz, G. (2010): Stark- und Extremniederschlag im Kurzzeitbereich. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 28.10, "Abflüsse aus extremen Niederschlägen", Herausgeber: Markus Casper, Beiträge zum Workshop am 14./15. September 2009 in Trier, 69 - 77.
- Malitz, G. (2011): Konvektive Starkniederschläge: verschiedene Formen von Starkniederschlägen und ihre Systematisierungen nach DIN 4049. In: Programmheft zum 6. Extremwetterkongress, 12.-15.04.2011, Hamburg, S. 85
- Verworn, H.-R., G. Malitz und A. Pfister (2010): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN) zwischen KOSTRA, MGN und NIEFLUD. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 28.10, "Abflüsse aus extremen Niederschlägen", Herausgeber: Markus Casper, Beiträge zum Workshop am 14./15. September 2009 in Trier, 79 - 87.
- Stalman, V., R. Draschoff, T. Günther, A. Pfister, D. Prellberg, H.-R. Verworn, G. Malitz (2004): Das Niederschlagsregelwerk für die deutsche Wasserwirtschaft. Wasserwirtschaft, Heft 10, S. 8 - 27

# Skalenübergreifende Modellierung der Abflussbildungsprozesse bei der Entstehung von Hochwasser mit dem Modell DROGen

Andreas Steinbrich und Markus Weiler

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Es wird ein nicht zu kalibrierendes, GIS-basiertes Niederschlag-Abflussmodell vorgestellt, das in der Lage ist flächendeckend für Baden-Württemberg und in hoher räumlicher Auflösung, die Abflussbildungsprozess und die Abflusskonzentration bei der Entstehung von Hochwasser abzubilden. Das Modell nutzt dazu flächendeckend verfügbare Geodaten sowie Prozesswissen, das in zahlreichen weltweit durchgeführten Experimenten zur Abflussbildung in der Standort- und Hangskale gewonnen wurde. So berücksichtigt das Modell zum Beispiel auch die Infiltration und den schnellen Zwischenabfluss durch präferentielle Fließwege. Die Eignung des Modells, die Abflussbildungsprozesse bei der Entstehung von Hochwasser realistisch abzubilden, wurde in acht unterschiedlich ausgestatteten mesoskaligen Einzugsgebieten für unterschiedliche Niederschlagsereignistypen und Vorbedingungen erfolgreich getestet. Da das Modell aufgrund von Geodaten und in Abhängigkeit der Vorbedingungen räumlich hoch verteilt parametrisiert und nicht kalibriert ist, kann es flächendeckend über unterschiedliche Naturräumen und skalenübergreifend von der Landesfläche über mesoskalige Einzugsgebiete bis in die Hangskale eingesetzt werden und ist unabhängig von den herrschenden Klimabedingungen. Dadurch ist das Modell u. A. prädestiniert, die Gefährdung von Siedlungs- und Wirtschaftsflächen durch so genanntes wild abfließendes Wasser abzuschätzen.

## Einleitung

Wild abfließendes Wasser (flash floods), verursacht durch Starkniederschlagsereignisse, führt immer wieder zu hohen Schäden, die in der Summe durchaus mit den Schäden durch Überflutungen entlang der großen Flüsse vergleichbar sind. Die Entstehungsflächen dieser Wasserströme können dabei sowohl innerhalb als auch außerhalb von Siedlungsflächen liegen. Da wild abfließendes Wasser, anders als etwa die Abflüsse in Gewässern, in der Regel nicht gemessen wird, ist es auch nicht möglich Niederschlags-Abfluss-Modelle auf diese Zielgröße zu kalibrieren. Eine verlässliche Abschätzung der auftretenden Abflüsse erfordert daher detaillierter Kenntnisse der räumlich verteilt auftretenden Abflussbildungs- und Konzentrationsprozesse. Dazu werden räumlich hoch aufgelöste Informationen zur Beschaffenheit der Erdoberfläche in und außerhalb von Siedlungsflächen, sowie fundiertes Verständnis der Abflussbildungsprozesse benötigt. Im Rahmen des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) wurde am Institut für Hydrologie Freiburg das Modell „Distributed RunOff GENERation“ (DROGen) entwickelt, das in der Lage ist, Abflussbildungsprozesse und Abflusspfade für die Landesfläche von Baden-Württemberg in hoher räumlicher Auflösung ( $1 \times 1 \text{m}^2$ ) abzubilden (Steinbrich und Weiler 2012 a - c).

## Methode

In Abb. 1 sind die Prozesse dargestellt, die im Modell implementiert sind. In Abhängigkeit von Vorfeuchte, Bodenart und Niederschlagsintensität kann der Niederschlag gänzlich in die Bodenmatrix infiltrieren (Matrix-Inf) (Green und Amt 1911) oder fließt im Falle, dass die Infiltrationskapazität der

Böden überschritten wird teilweise oder komplett als Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA) ab. Dieser kann wiederum gänzlich oder teilweise durch Makroporen in den Boden gelangen (MP-Inf) (Weiler 2001). Wird im Boden die Feldkapazität überschritten, kann Wasser bis zur Grenze zwischen Boden und geologischem Untergrund sickern, wo sich ein gesättigter Bereich bildet, sobald der Strom des Sickerwassers die Kapazität der Tiefenperkolation (TP) in das Gestein überschreitet. In diesem gesättigten Bereich findet Zwischenabfluss in der Matrix- und in Makroporen statt. Letzterer (MP-ZA) ist auch für die Hochwasserentstehung relevant. Im Modell hängt die Fließgeschwindigkeit im Makroporensystem von der Tiefe im Boden, der Mächtigkeit des gesättigten Bereiches sowie dem Gefälle ab. Dies spiegelt Erkenntnisse wieder, die in Feldversuchen gewonnen wurden (z. B. Mikovari et al. 1995, Weiler et al. 1998, Kienzler und Naef 2007, Retter 2007, Anderson et al. 2009). In Bereichen hoher Grundwasserstände oder geringmächtiger Böden über undurchlässigem Untergrund kann der gesamte Boden schnell aufgesättigt werden, was zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss (SFA) führt. Der Grundwasserflurabstand wird im Modell von den Gewässern ausgehend iterativ geschätzt (Olaya 2004).

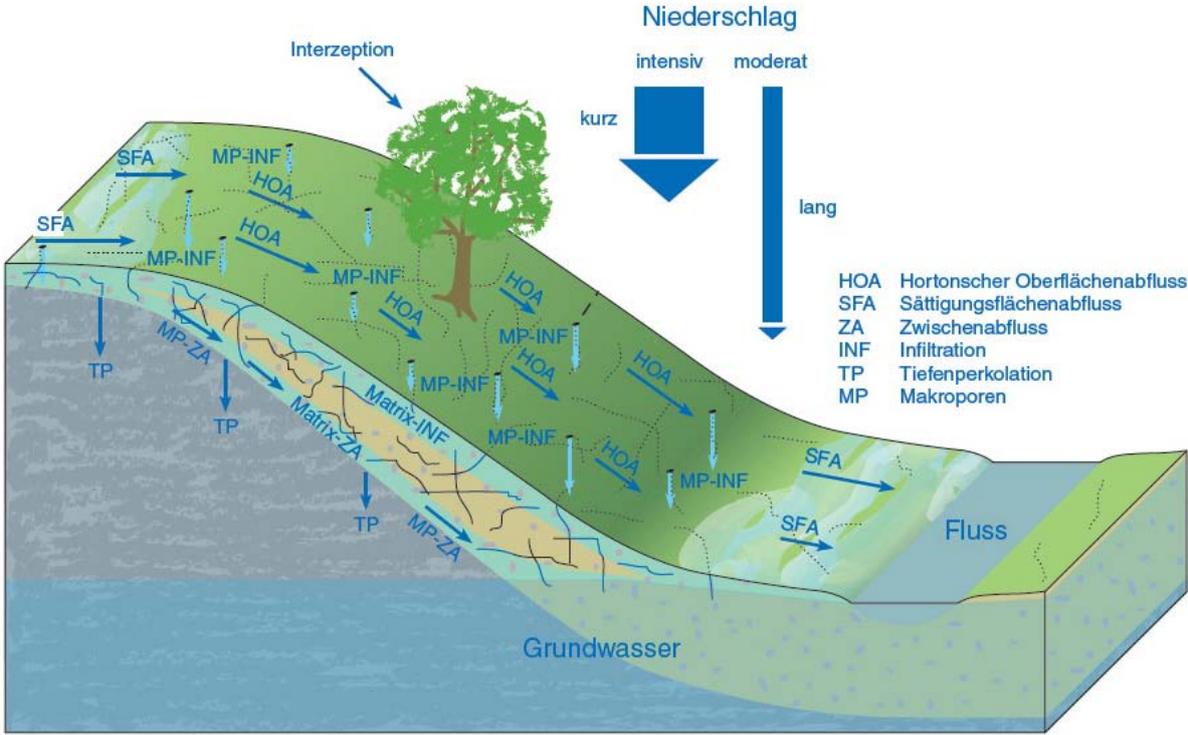


Abb. 1: Übersicht über die im Modell repräsentierten Prozesse

Die Abflusskonzentration wird mit einem einfachen Ansatz nach Manning-Strickler unter Annahme von Schichtfließen in der Fläche und einheitlicher Fließgeschwindigkeiten im Gewässer (3 m/s) abgebildet. Der relativ hohe Wert der Fließgeschwindigkeit im Gewässer ist der Annahme geschuldet, dass Hochwasserverhältnisse herrschen, da das Modell mit Fokus auf Hochwasser erstellt wurde. Für schnelle Grundwasserfließwege in Karstgebieten wird eine einheitliche Fließgeschwindigkeit von 0.012 m/s angesetzt, die in Tracereexperimenten zur Abgrenzung von Quellschutzzonen ermittelt wurde (Pohl 2000). Das Modell ist für die Simulation von Hochwasserereignissen ohne den Einfluss von Schnee und gefrorenen Böden konzipiert.

Für eine genauere Abbildung der Landnutzung, die großen Einfluss auf viele der beschriebenen Prozesse hat, wurden Laserscann-Daten herangezogen, um höherer Vegetation (Sträucher/Bäume) zu identifizieren. Informationen zum Versiegelungsgrad der Erdoberfläche stehen abgeleitet aus ATKIS DLM 25 und dem amtlichen Liegenschaftskataster (ALK) in einer Auflösung von 1\*1 m<sup>2</sup> zur Verfügung (Kern 2007). Welche Modellparameter für das Modell aus welchen Daten abgeleitet werden ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Modellparameter und zugrunde liegende Daten

Parameter	Quelle	Definition
Landnutzung	CORINE, Laser-Scann-Daten, ATKIS DLM25	Klassen
Grad der Versiegelung der Erdoberfläche	WaBoA (ATKIS DLM25, ALK) 1*1m <sup>2</sup>	Werte
Dichte der vertikalen Makroporen	In Abhängigkeit von der Landnutzung, Literatur	Werte
Länge der vertikalen Makroporen		
Dichte der hangparallelen Makroporen		
Mittlerer Durchmesser der Makroporen	Literatur	Werte
Mittlere Fließgeschwindigkeit in den hangparallelen Makroporen	In Abhängigkeit der Tiefe und des Gefälles	Werte
Rauhigkeit der Erdoberfläche	Literatur	Werte
Bodenart	Bodenübersichtskartierung (BÜK) 1:200.000	Klassen
Bodengründigkeit	Bodenübersichtskartierung (BÜK) 1:200.000	Wertebereich
Skelettgehalt		
Nutzbare Feldkapazität		
Effektive Porosität der Böden	Pedotransferfunktion	Wertebereich
Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Böden	Literatur	Werte
Saugspannung an der Sättigungsfront		
Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des geologischen Untergrundes	Hydrogeologische Übersichtskartierung (HÜK) 1:200.000	Wertebereich
Gefälle der Erdoberfläche	Laser-Scann-Daten 1*1 m <sup>2</sup>	Werte
Fließrichtung	Laser-Scann-Daten 1*1 m <sup>2</sup>	Werte
Vegetation Baum / hoher Strauch	Laser-Scann-Daten	1/0
Vorfeucht der Böden	Modellausgabe aus GWN-BW	Werte
Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Karst	Literatur	Werte
Interzeptionsspeicher	In Abhängigkeit von der Landnutzung, Literatur	Werte
Grundwasserflurabstand	Gewässernetz, Laser-Scann-Daten	Werte

## Ergebnisse

Das Modell wurde anhand von Abflussdaten und RADOLAN-Niederschlagsdaten (korrigierte Radar Daten im 1h Zeitschritt) für beobachteten Hochwasserereignissen in acht meso-skaligen Einzugsgebieten in unterschiedlichen Naturräumen Baden-Württembergs getestet und dann für landesweite Szenarien eingesetzt (Steinbrich und Weiler 2012 a -c). Die Modellierung der beobachteten Hochwasserereignisse zeigte eine gute Eignung des Modells, insbesondere die verschiedenen Abflussbildungsprozesse zu reproduzieren. Die Dynamik der Abflusswelle am Pegel (Anstiegs- und Rezessionsverhalten) spiegelt die räumliche Verteilung der Bildung der unterschiedlich schnellen Abflusskomponenten im Einzugsgebiet wieder. Gerade die Dynamik der Hochwasserwellen wurde vom Modell für verschiedene Niederschlagstypen und Vorfeuchtebedingungen gut getroffen (Steinbrich und Weiler 2012 b).

Am Beispiel eines Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet Hirschbronnzulauf/Ölbach (25 km<sup>2</sup>) im Alpenvorland soll im folgenden die besondere Eignung eines nicht kalibrierten Modells gezeigt wer-

den um a priori nicht vorhandene Modellstrukturen zu identifizieren. In Abbildung 2 werden die modellierten Abflussganglinien dem gemessenen Abfluss gegenüber gestellt. Der grau hinterlegte Bereich (Modell (min-max)) ergibt sich aus der Unsicherheit des Niederschlags und Vorfeuchte von 10% sowie der Wahl der Unter- bzw. Obergrenze für Modellparameter, die als Wertebereiche vorliegen (siehe Tab. 1). Die durchgehende dicke Linie zeigt den Verlauf des gemessenen Abflusses. Die dicke gestrichelte Linie den modellierten Abfluss am Pegel ohne Zu- und Abschlüge und mit den Bereichsmittelwerten für Modellparameter, die als Wertebereiche vorliegen. Zusätzlich werden die Ganglinien der einzelnen Abflusskomponenten dargestellt (dünnere Linien). Abb. 2a zeigt das Modellergebnis, wie es sich anhand der landesweit verfügbaren Geodaten ergibt. Der Abfluss wird deutlich unterschätzt. Der Verlauf der Rezession der gemessenen Ganglinie weist auf den Einfluss einer verzögerten Abflusskomponente hin, bei der es sich um schnellen Zwischenabfluss handeln dürfte. In der Fläche wird im Modell auch Makroporenzwischenabfluss gebildet. Dieser erreicht den Pegel in Folge der tiefgründigen Böden und des überwiegend geringen Gefälles im Einzugsgebiet nur zu einem geringen Teil innerhalb des modellierten Zeitraumes und führt zum Unterschied zwischen dem Abflussbeiwert der sich aus der Abflussbildung in der Fläche ergibt und dem aus dem am Pegel modellierten Abfluss in Tab. 2. Die Region, in der das Einzugsgebiet liegt, ist geprägt durch frische bis feuchte Böden und ausgeprägte landwirtschaftliche Nutzung. Daher sind weite Flächen künstlich drainiert. Die Einbeziehung von Drainagen in das Modell führte dazu, dass innerhalb des modellierten Zeitraumes wesentlich mehr von dem in der Fläche gebildeten Makroporenzwischenabfluss am Pegel ankommt (Abb. 2b, Tab. 2).

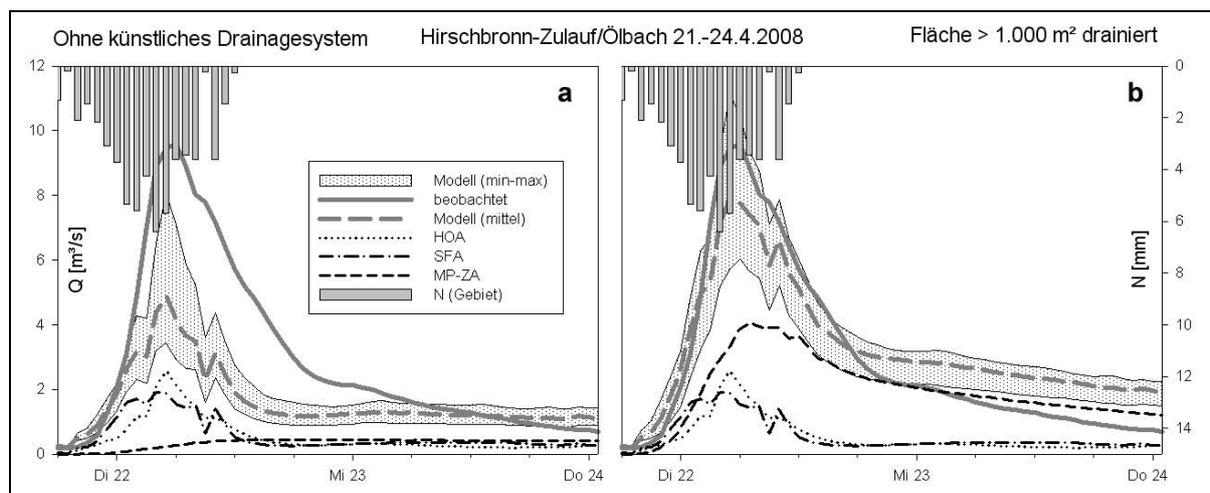


Abb. 2: Modellergebnis für das Einzugsgebiet des Pegels Hirschbronnzulauf/Ölbach (Stundenwerte)

Tab. 2: Quantitative Zusammenfassung der Modellergebnisse

Mittlerer Gebiets- niederschlag [mm]	Vorfeuchte [% nFK]	Abflussbeiwerte (HOA + SFA + MP-ZA) [%]	
		in der Fläche	am Pegel gem.
57.6	92	in der Fläche	53
		am Pegel gem.	38
		am Pegel mod.	ohne Drainagen 12

Im Einzugsgebiet der Starzel (Westabdachung der Schwäbischen Alb) ereignete sich am 2.6.2008 ein Starkniederschlagsereignis, das sowohl entlang der Gewässerläufe als auch in den Hanglagen zu gro-

ßen Schäden führte. Das Ereignis wurde anhand der verfügbaren RADOLAN Daten, unterstützt durch Stationsdaten, modelliert. Für die Mesoskale erfolgte die Modellierung des Pegelinzugsgebietes Rangendingen/Starzel (123 km<sup>2</sup>) auf Stundenbasis (Abb. 4a). In der Hangskale wurde das Gebiet der Gemeinde Jungingen in 5-Miuntenschritten modelliert. Abb. 3 und 4b. Die mesoskalige Modellierung ergab eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Abflussganglinien. Horton'scher Oberflächenabfluss dominierte das Abflussgeschehen, was auf die hohen Niederschlagsintensitäten und die tonigen Böden mit geringer Infiltrationskapazität zurückzuführen ist. Die Modellierung im Gebiet der Gemeinde Jungingen zeigt, dass der Abfluss in diesem Fall vor allem in der betroffenen Siedungsfläche selbst gebildet wurde (Abb. 3 rechts). Die Hauptabflusspfade verlaufen entlang der Straßen. An den Gebietsauslässen treten im Modell Spitzenabflüsse von 600-800 l/s auf (Abb. 4b). Das Modell berücksichtigt im dargestellten Fall nicht den Einfluss der Kanalisation, die einen Teil des modellierten Oberflächenabflusses unterirdisch abführt.

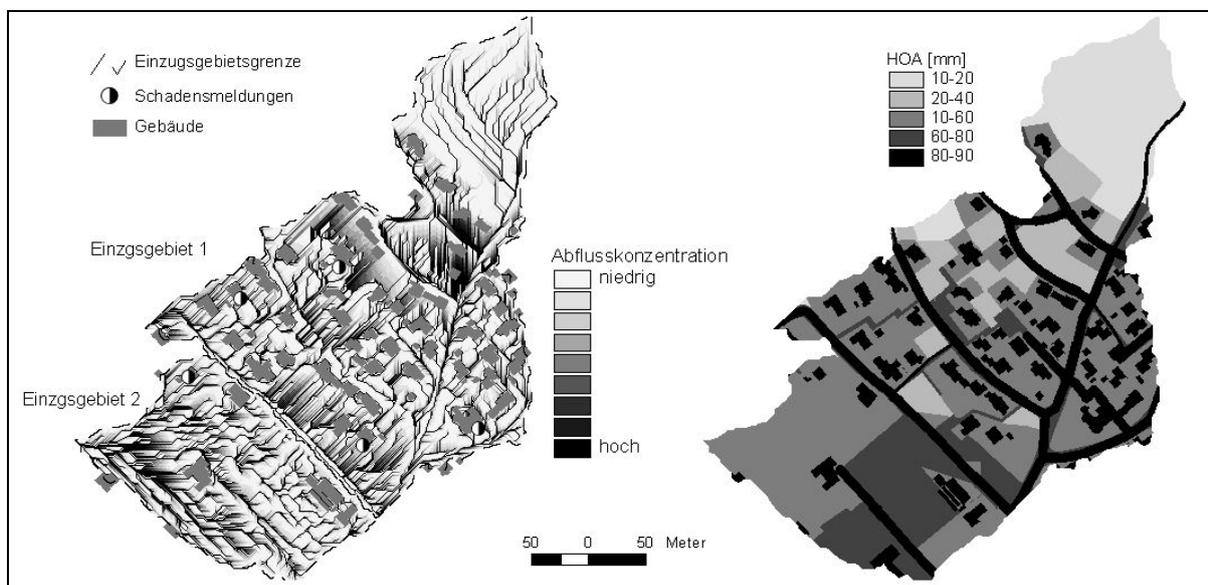


Abb. 3: Abflussbildung (rechts) und Abflusskonzentration (links) für das Starkregenereignis vom 2.6.2008 im Starzel-Einzugsgebiet für ein Teilgebiet der Gemeinde Jungingen

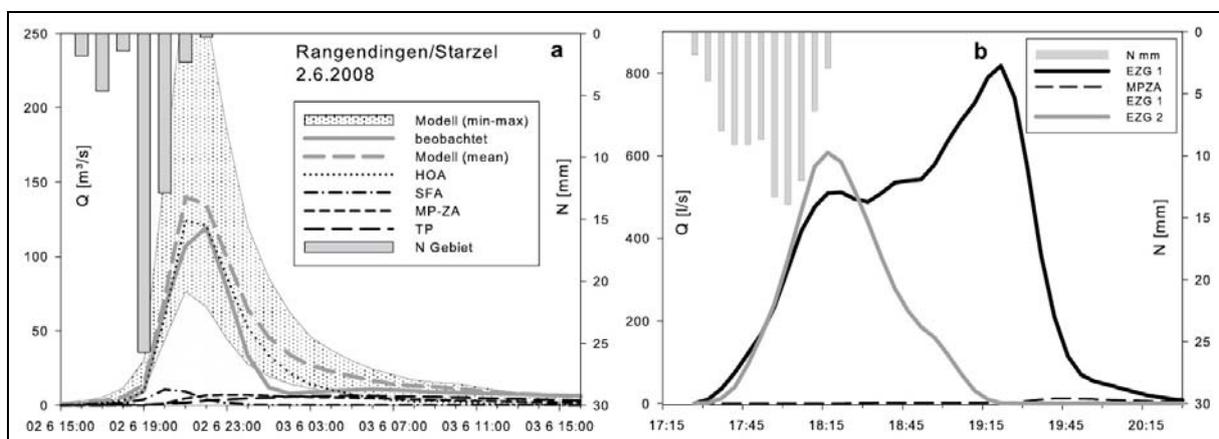


Abb.4: Modellergebnis für das Einzugsgebiet des Pegels Rangendingen/Starzel (a) (Stundenwerte) und eine Teilfläche der Gemeinde Jungingen (b) (5-Minuten-Werte)

## Schlussfolgerung

Das Modell DROGen ermöglicht die Modellierung der Abflussbildung und –konzentration bei Hochwasserereignissen in unterschiedlichen Naturräumen, für unterschiedliche Vorbedingungen und Niederschlagsereignistypen sowie über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen hinweg. Es ermöglicht die Abschätzung der Gefährdung von Siedlungsbereichen durch wild abfließendes Wasser für die Planung von geeigneten Schadensvermeidungsstrategien. Die Eignung des Modells, Prozesse angemessen abzubilden, hängt dabei stark von der Datenlage ab. Geodaten zu Strukturen wie Drainagen, Kanalisation, kleine Gräben, Mauern oder Rohrdurchlässe sind in der Regel nicht flächenhaft verfügbar und müssen teilweise erst vor Ort erhoben werden. Da das Modell für die derzeit in Baden-Württemberg flächenhaft verfügbaren Geodaten konzipiert wurde erfordert die Anwendung außerhalb Baden-Württembergs oder die Einbeziehung weiterer Daten Anpassungen des Modells an die jeweilige Datenlage. Neue Erkenntnisse zur Abflussbildung oder verbesserte Datengrundlagen können aber problemlos in die bestehenden Strukturen eingebunden werden. So ist z.B. vorgesehen das Schrumpfen und Quellen von Tonböden bei der Parametrisierung der Makroporendichte zu berücksichtigen oder die detaillierteren Bodeninformationen der BK50 zu Nutzen, sobald diese Landesweit vorliegen.

## Literatur

- Anderson, A. E., Weiler, M., Alila, Y., Hudson, R. O. (2009): Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow *Water Resources Research*, 45
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911): Studies in soil physics. 1 The flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science*, 4, 1-24.
- Kern F.-J.. (2007): Flächenversiegelung (Atlastafel 6.2) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA), 3. Lieferung 2007.
- Kienzler, P. M. and Naef, F (2007). Subsurface storm flow formation at different hillslopes and implications for the ‘old water paradox’. *Hydrological Processes* 22: 104 - 116.
- Mikovari, A., Peter, C., Leibundgut Ch. (1995). investigation of preferential flow using tracer techniques. *IAHS publication* 22: 87-97.
- Olaya. V., 2004. A gentle introduction to SAGA GIS. Edition 1.1.
- Pohl, B. (2000): Charakterisierung der hydrologischen Systemparameter des Einzugsgebietes einer Trinkwasserquelle im Karst am Beispiel Röschenz (Nordwestschweiz), zur differenzierten Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie (unveröffentlicht)
- Retter, M. (2007), Subsurface Flow Formation, Universität Bern.
- Steinbrich A., Weiler M. (2012 a): Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlastafel 6.5) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart: Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.
- Steinbrich A., Weiler M. (2012 b): Einzugsgebietsbezogene Abflussbildung (Atlastafel 6.6) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart: Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.
- Steinbrich A., Weiler M. (2012 c): Direktabflusshöhen: Hundertjährliches Niederschlagsereigniss (Atlastafel 6.7) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart: Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.
- Weiler, M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration. Dye tracer experiments and simulations. *Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich*, Band 7: 150.

# Gekoppelte Niederschlag-Abfluss-Statistiken en gros et en detail

Michael Wagner und Robert Schwarze

Institut für Hydrologie und Meteorologie, Technische Universität Dresden, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Bemessung von Bauwerken in bzw. an Gewässern bedarf der Kenntnis des statistischen Hochwasserregimes am Ort. Für Stauanlagen werden dafür z. B. Angaben bis zu einem  $HQ(10\ 000)$  gefordert. Die bisherige Praxis sieht häufig vor, das Hochwasserregime lokal an einzelnen Standorten im Fließgewässernetz auszuwerten. Dabei fehlt es den Ergebnissen häufig an regionaler Konsistenz und Plausibilität.

Es wird hier eine Strategie vorgestellt, die lokale Details wie auch regionale Zusammenhänge gleichermaßen berücksichtigt und zusammenführt. Das Ziel ist eine verbesserte Darstellung des statistischen Hochwasserregimes bis zum  $HQ(10\ 000)$ . Dazu werden

- die systematischen lokalen Messwerte des Durchflusses auf regionaler Ebene zum Einen durch historische Durchflussinformationen und zum Anderen durch aktuelle wie auch historische Niederschlagsinformationen bzw. vermutlich maximale Niederschläge erweitert.
- Die lokale Ebene wird durch archivarisch ermittelte Hochwasserinformationen kleinräumiger, meist nicht gemessener Ereignisse unterstützt.
- Die lokale und die regionale Ebene werden gleichermaßen gestärkt, indem Gewässerinformationen einbezogen werden. Darunter fallen die Gewässertopologie, die Lage von Stauanlagen, maximale Scheitelabflussbeiwerte und weitere Parameter, z. B. Bodenkennwerte.

Die genannten Daten und Informationen werden mittels dreier miteinander korrespondierender Methoden verarbeitet, auf denen die Strategie basiert:

1. Für Niederschlagssummen wird eine flexibel anzupassende Verteilungsfunktion mit oberem Grenzwert hergeleitet. Diese ist zweigeteilt, um den mit Messwerten untersetzten Basisbereich und den Verlauf des Extrapolationsbereiches bis zum Maximum gleichermaßen plausibel darstellen zu können.
2. Für die Statistik über die Durchflussscheitel wird die Niederschlagsinformation aus 1. mit einem erweiterten neuen Kopplungsprinzip von Niederschlag und Abfluss nutzbar gemacht. Dabei wird der statistische Scheitelabflussbeiwert sukzessive maximiert.
3. Die Regionalisierung der lokalen Ergebnisse erfolgt auf der Basis äquivalent reagierender Referenzpegel. Dabei wird u. a. die Gewässertopologie direkt berücksichtigt.

Die Strategie wird anhand sächsischer Flüsse vorgestellt. Beispiele untermauern die einzelnen Methoden und beleuchten lokale sowie regionale Aspekte. Im Ergebnis liegt das regionale Hochwasserregime vom  $HQ(1,1)$  bis zum  $HQ(10\ 000)$  weitgehend flächendeckend für Sachsen vor.

## Einleitung

In Sachsen traten in der Vergangenheit regelmäßig z. T. verheerende Hochwasser auf. Ihnen zu Grunde lagen Niederschläge nahe der angenommenen physikalischen Maxima. Es gab gleichermaßen regionale (z. B. Juli 1954 und August 2002) wie auch lokale (z. B. Juli 1999 im Raum Marienberg oder August 2010 im Elbsandsteingebirge) Ereignisse. Demgegenüber steht die Forderung eines  $HQ(10\ 000)$  für den Nachweis der Standsicherheit großer Stauanlagen (DIN 19700-12). In diesem Spannungsfeld wird deutlich, dass eindimensional ausgerichtete und lokal abgeleitete Bemessungshochwasser mitunter unplausibel bezüglich der Einordnung am Standort wie auch im regionalen Kontext sind.

Es wird hier eine Strategie vorgestellt, mit der das regionale statistische Hochwasserregime plausibler dargestellt werden kann. Diese beruht darauf, dass zusätzliche Informationen erschlossen und neue Methoden entwickelt und miteinander kombiniert werden.

## Untersuchungsgebiet und Inputdaten

Es werden Flussgebiete in Sachsen mit Ausnahme der Elbe betrachtet (siehe auch Abb. 2). Insgesamt liegen Durchflussdaten an 159 Pegeln (unterteilt in insgesamt 4500 Teileinzugsgebiete) vor und können als Stützstellen der statistischen Auswertung dienen. Als Inputdaten werden (i) Tagesdaten des Durchflusses ( $Q$  bzw. als Spende  $q$ ), (ii) monatliche Scheiteldurchflüsse, (iii) historische Hochwasserinformationen, (iv) kleinräumige, archivarisch ermittelte Hochwasserinformationen, (v) regionale Tagessummen des Niederschlages ( $P$  bzw. als Spende  $p$ ), (vi) historische Niederschlagssummen sowie (vii) maximierte Gebietsniederschläge ( $MGN$ ) genutzt. Die kleinräumigen Hochwasserinformationen liegen zumeist qualitativ vor und können nicht direkt statistisch ausgewertet werden. Jedoch erlauben die Daten Rückschlüsse darauf, ob eine Region besonders zu kleinräumigen Hochwassern neigt.

## Methoden

Der Anspruch an die statistischen Ergebnisse ist derart, dass Hochwasserdurchflüsse bis zu einem Ereignis der Jährlichkeit von  $T = 10\ 000$  a abgeschätzt werden können. Daraus resultiert eine erhebliche Erweiterung der Aussageweite von Verteilungsfunktionen, wofür alle verfügbaren Daten auf geeignete Weise einbezogen werden müssen. Deren Auswertung beruht auf drei Ansätzen. (i) Alle Niederschlagsinformationen werden mit einer flexibel anzupassenden Verteilungsfunktion mit oberem Grenzwert ausgewertet. (ii) Anschließend wird diese Verteilungsfunktion mit der neu entwickelten Methode der Abflussbeiwertapproximation mit der Verteilungsfunktion der Durchflüsse gekoppelt. (iii) Die lokal ermittelten Daten müssen auf alle Teileinzugsgebiete regionalisiert werden.

### *Eine Niederschlagsstatistik bis zum MGN*

In der Hydrologie werden einige Verteilungstypen mit oberem Grenzwert verwendet. Allen Typen gemein ist, dass sie einen Kompromiss bilden aus der Darstellung des mit Messwerten untersetzten Bereiches und der Extrapolation bis zu einem Maximalwert. Hier wird ein Funktionstyp vorgeschlagen, der beide Bereiche mit zwei Teilfunktionen berücksichtigt. Die Teilfunktionen werden an der

Grenzfählichkeit  $T_{GP}$  getrennt und Basisfunktion ( $T \leq T_{GP}$ ) bzw. Extrapolationsfunktion ( $T > T_{GP}$ ) genannt. Die Basisfunktion kann durch einen beliebigen Verteilungsfunktionstyp dargestellt werden. Der Extrapolationsbereich erhält eine eigene Funktion des Typs:

$$P = \frac{1}{1/MGN + bT^{c-1}} \quad (1)$$

Die Parameter  $b$  und  $c$  werden unter der Maßgabe geschätzt, dass Wert und Anstieg an  $T_{GP}$  stetig sind. Mit der Lösung des sich ergebenden Gleichungssystems kann die zweigeteilte Verteilungsfunktion

$$F(P) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1 + k \frac{P-\mu}{\sigma}\right)^{-1/k}\right] & \text{wenn } P \leq P_{GP} \\ 1 - \left(\frac{1-1/MGN \cdot P}{bP}\right)^{\frac{1}{c-1}-1} & \text{wenn } P > P_{GP} \end{cases} \quad (2)$$

berechnet werden. Der Basisbereich ist hierbei durch die allgemeine Extremwertverteilung geschätzt. Ein Beispiel am Pegel Berthelsdorf / Freiburger Mulde ist in Abbildung 1 dargestellt.

#### *Die Abflussbeiwertapproximation*

Die recht sicher zu schätzenden statistischen Werte der Niederschlagsverteilung sollten zur sichereren Abschätzung statistischer Durchflusswerte herangezogen werden. Erstmals formulierten Guillot und Duband (1969) ein Kopplungsprinzip von Niederschlag und Abfluss – das GRADEX-Verfahren. Dabei wird ab einem Sättigungspunkt  $T_{GQ}$  (je nach Region bei 10 bis 50 a, Lang und Oberlin, 1994) der exponentielle Gradient der Niederschlagsverteilung auf den exponentiellen Gradienten der Durchflussverteilung aufgeprägt. Die resultierende Verteilung besitzt zumeist einen deutlichen Knick an  $T_{GQ}$  und neigt zur Überschätzung der Durchflusswerte oberhalb dieser Stelle. Als Weiterentwicklung von GRADEX wird von Lang und Oberlin (1994) das AGREGEE-Verfahren vorgeschlagen. Dabei wird eine asymptotische Annäherung der exponentiellen Gradienten angestrebt. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass nur Funktionstypen verwendet werden sollten, die einem konstanten exponentiellen Gradienten zustreben. Das ist u. a. bei oben limitierten Funktionen nicht der Fall.

Ein neues Modell sollte auf jeden Verteilungsfunktionstyp anwendbar sein. Außerdem sollten die Niederschlagsinformationen sukzessive genutzt und ein plausibler Verlauf des Extrapolationsbereiches ab  $T_{GQ}$  gewährleistet werden. Aus den Anforderungen heraus wird ein neues Verfahren – die Abflussbeiwertapproximation – entwickelt. Es werden zwei Annahmen vorausgesetzt. Erstens steigt mit dem Niederschlag der absolute Betrag des Gebietsrückhaltes und zweitens sinkt mit dem Niederschlag der prozentuale Gebietsrückhalt. Es existiert nach den Annahmen ein Scheitelabflussbeiwert  $\psi_S$ , der sich mit zunehmendem Niederschlag zu einem maximalen Scheitelabflussbeiwert  $\psi_{Smax}$  vergrößert. Für das Verhalten von  $\psi_S$  kann eine Approximationsfunktion formuliert werden:

$$\psi_S(T) = \frac{\psi_{Smax} - a}{1 - bT^{-c}} + a \quad (3)$$

wobei für  $T > T_{GQ}$  die empirische Formel zur Abflussschätzung mit  $q(T) = p(T) \psi_S(T)$  gilt. Wird vorausgesetzt, dass Werte und Anstiege über die gesamte Funktion stetig sein sollen, können die Parameter  $a$  und  $b$  der Gleichung (3) analytisch berechnet werden. Der Parameter  $c$  bestimmt die Schnelligkeit der Approximation und wird nach Tests im Gebiet konstant bei  $c = 0,7$  belassen. Der maximale

Scheitelabflussbeiwert wird in homogenen Regionen anhand von Messwerten bestimmt.

### Die Referenzpegelmethode

Das Hochwasserregime ist nicht nur an Pegelstandorten von Interesse sondern gleichfalls an Teileinzugsgebieten, welche keinen eigenen Pegel besitzen. Der Referenzpegelmethode liegt zugrunde, dass Teileinzugsgebiete zu ähnlichen Zeitpunkten und in äquivalenter Höhe Hochwasser generieren, wie ihnen zuzuordnende Referenzpegel. Für Referenzpegel wird ein Regelwerk entwickelt, welches neben der Pegeltopologie besondere regionale Aspekte berücksichtigt. Darunter fallen z. B. die relative Lage zu Stauanlagen, Bodeneigenschaften und die Neigung zu kleinräumigen Hochwassern. Es werden vier primäre Regeln formuliert:

1. Wenn oberhalb kein Pegel und keine Stauanlage liegen, wird der Referenzpegel durch Ähnlichkeitsbeziehung zu allen anderen Pegeln oberhalb von Stauanlagen in der maximalen Entfernung der Einzugsgebietsschwerpunkte von 15 km ermittelt. Das gleiche wird angewandt, wenn sich oberhalb eine Stauanlage aber kein Pegel oberhalb oder unterhalb befinden.
2. Wenn oberhalb eine Stauanlage aber kein Pegel vor der Stauanlage liegt, dann wird der nächste Pegel unterhalb als Referenzpegel eingesetzt.
3. Wenn oberhalb und unterhalb Pegel ohne Stauanlage dazwischen liegen, wird der Referenzpegel durch Ähnlichkeitsbeziehung zu den betreffenden Pegeln ermittelt.
4. Wenn oberhalb mindestens ein Pegel ohne Stauanlage dazwischen und unterhalb kein Pegel oberhalb einer Stauanlage liegt, wird der Referenzpegel durch Ähnlichkeitsbeziehung zu allen Pegeln oberhalb ermittelt.

Die Ähnlichkeitsbeziehung berücksichtigt die Einzugsgebietsgröße und den Niederschlag mit  $T = 10\,000$  a. Neben den primären Regeln gibt es noch sekundäre Regeln, die v. a. die Kopfeinzugsgebiete betreffen und im Nachgang angewendet werden. Mit der Gleichung:

$$q_{S\,TEZG} = p_{TEZG} \frac{\psi_{S\,TEZG}^*}{\psi_{S\,RefPegel}^*} \psi_{S\,RefPegel} \quad (5)$$

kann der Hochwasserdurchfluss eines konkreten Ereignisses am Referenzpegel auf das Teileinzugsgebiet übertragen werden.  $q_{S\,TEZG}$  bzw.  $p_{TEZG}$  sind der Scheiteldurchfluss bzw. der Niederschlag im Teileinzugsgebiet.  $\psi_{S\,RefPegel}$  bezeichnet den aktuellen Scheitelabflussbeiwert am Referenzpegel und der Quotient  $\psi_{S\,TEZG}^*/\psi_{S\,RefPegel}^*$  steht für den mittleren Unterschied zwischen Scheitelabflussbeiwerten der jeweiligen Gebietsgrößen. Damit können in jedem Teileinzugsgebiet eine Liste von Scheiteldurchflüssen berechnet und statistisch ausgewertet werden.

## Ergebnisse

### Auswertung an Pegeln

Abbildung 1 zeigt die Niederschlags- und Durchflussverteilungen am Pegel Berthelsdorf / Freiburger Mulde bis  $T = 10\,000$  a. Am Pegel Berthelsdorf entwässert ein Gebiet von  $244\text{ km}^2$  Größe. Die Grenzfähigkeiten für Niederschlags- bzw. Durchflussverteilung liegen bei  $T_{GP} = 100$  a bzw.  $T_{GQ} = 50$  a. Es gibt 72 Durchfluss- und 128 Niederschlagswerte. Der maximierte Gebietsniederschlag

liegt bei  $4000 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$  und der regionale maximale Scheitelabflussbeiwert bei 0,96. Daneben gibt es am Pegel Abschätzungen der historischen Hochwasser von 1573 und 1771. In diesem Vergleich muss auch das Ereignis von 2002 (das größte aller gemessenen Ereignisse) als repräsentativ für den historischen Zeitraum eingeschätzt werden. Die drei Eintragsstellen basieren auf der Formel nach Cunnane (1978) mit  $T = 1/[1 - (i - 0,4)/(n + 0,2)]$ , wobei in der Formel der gesamte Zeitraum von 435 a (1573 bis 2007) eingeht.

Wird die zweigeteilte Verteilungsfunktion (Gl. 2) für den Niederschlag eingesetzt, ergeben sich ab etwa  $T = 1000 \text{ a}$  signifikante Unterschiede zur unbegrenzten Verteilungsfunktion. Die Verteilungsfunktion des Durchflusses ohne Kopplung mit der Niederschlagsverteilung zieht durch den einen Extremwert (August 2002) stark nach oben und führt in unplausible Bereiche. Wird hingegen die Information des Niederschlages einbezogen, zeigt die Durchflussverteilung einen plausibleren Verlauf. Dieser Verlauf wird durch die Eintragsstellen der großen Hochwasser im historischen Kontext unterstützt.

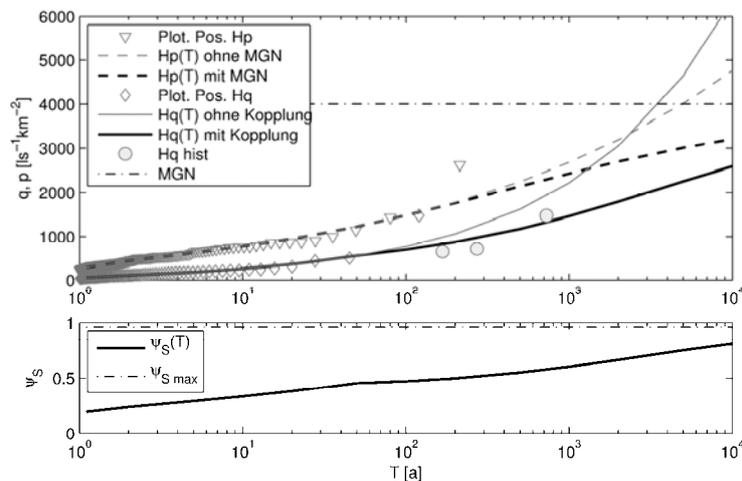


Abb. 1: Verteilungen von Niederschlag  $p$  und Durchfluss  $q$  und die dazugehörige Kurve der Scheitelabflussbeiwerte  $\psi_S$  am Pegel Berthelsdorf / Freiberger Mulde

### Regionale Auswertung

Als Ergebnisauszug sind die  $Hq(200)$  in Sachsen in Abbildung 2 visualisiert. In Sachsen gibt es demnach drei Schwerpunktgebiete mit sehr hohen Scheitelspenden: das Westerzgebirge, das Osterzgebirge und das Lausitzer Bergland. In diesen Gebieten werden Spenden bis über  $2000 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$  erreicht. Daneben soll auf drei Details eingegangen werden. Bei **Nummer 1** (mittleres Erzgebirge) ist ein abrupter Wechsel der Spenden von  $850 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$  auf  $450 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$  zu sehen. Das entspricht der Wirkung der Tal Sperre Fláje, welche an dieser Stelle ihr Absperrbauwerk besitzt und das Hochwasserregime signifikant beeinflussen kann. Ähnliche Bilder ergeben sich bei den Absperrbauwerken anderer großer Speicher. Die **Nummer 2** befasst sich mit einem lokalen Effekt im Einzugsgebiet des Rödelbaches und kleiner umliegender Teileinzugsgebiete. In dem Gebiet liegt der Pegel Wolfersgrün, dessen Hochwasserspenden sich markant von denen umliegender Gebiete unterscheiden. Inkonsistenzen oder Inhomogenitäten können hierbei weitgehend ausgeschlossen werden. Ein Grund für den Unterschied ist die signifikant höhere gesättigte Leitfähigkeit des Oberbodens in dem Gebiet. Damit kommt es zu höheren Infiltrationsraten und im Gegenzug zu geringerem Direktabfluss, welcher maßgeblich für den Scheitel verantwortlich ist. Die Bodeneigenschaften können mit der angewandten Methode in die

Schätzung der Verteilungsfunktion eingehen. Die **Nummer 3** zeigt auf ein helleres Band in der unmittelbaren Umgebung des Hauptflusses. Ähnliche Eigenschaften sind im gesamten Untersuchungsgebiet anzutreffen. Das hängt einerseits mit der Darstellung zusammen. Die Hochwasserspende eines Teileinzugsgebietes gilt ausschließlich für den Auslasspunkt des Teileinzugsgebietes und nicht für die Vorländer. In dem Fall bei Nummer 3 hat die Freiburger Mulde bereits eine Größe von etwa 600 km<sup>2</sup>. Die umliegenden, kleineren Gebiete liefern tendenziell größere Hochwasserspenden als das große Gebiet, da Niederschläge leichter das gesamte kleine Gebiet überregnen können.

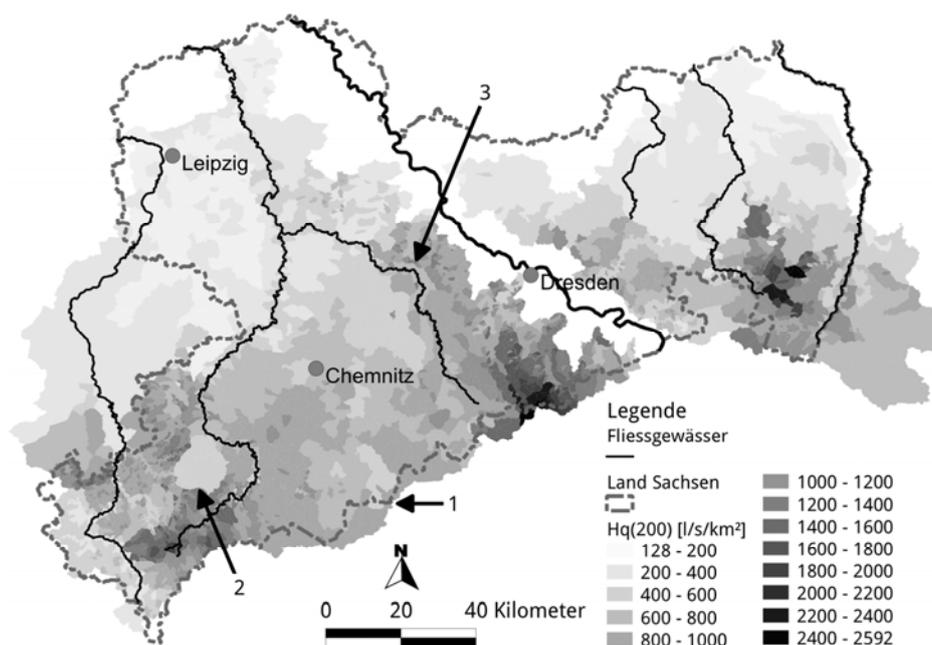


Abb. 2: Regionalisierte  $Hq(200)$  im Untersuchungsgebiet mit Detailnummern

## Fazit

Die hier vorgestellte Strategie, ein regionales Hochwasserregime belastbar abzuleiten, ist für die Darstellung großräumiger Gebiete gleichermaßen geeignet wie für die Einschätzung lokaler Effekte. Durch die modulare Struktur fällt die Kopplung mit anderen Verfahren leicht. Beispielsweise können Ergebnisse einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung – auch lokal – problemlos einbezogen werden. Die Einbeziehung weiterer Informationen zur Schätzung des Hochwasserregimes wird ausdrücklich empfohlen (siehe auch DWA, 2011).

## Literatur

- Cunnane, C. (1978): Unbiased plotting positions – a review. *Journal of Hydrology* 37, 205-222.
- DWA (2011): Merkblatt DWA-M 552 (Entwurf); Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. DWA e.V.
- Guillot, P. und D. Duband (1969): La method du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies . Floods and their computation. IAHS 84, 560-569.
- Lang, M. und G. Oberlin (1994): Preliminary test for mapping the 100-year flood with the AGREGEE Model. – In: Seuna, P., Gustard, A., Arnell, N. W. und G. A. Cole (1994): FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data. IAHS 221, 275-284.

# Niederschlagsanalyse objektiver Wetterlagen in Klimasimulationen

Ulf Riediger, Heiko Steiner, Monika Rauthe und Annegret Gratzki

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Projekt KLIWAS werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und Schifffahrt ressortübergreifend (BMBVS) untersucht. Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes sind die zahlreichen Klimaprojektionen zu validieren und zu bewerten, um Klimaszenarien für den hydrologischen Wirkungsbereich bereitzustellen. Viele hydrologische Fragestellungen im Bereich der Daseinsvorsorge und des Katastrophenschutzes befassen sich mit der Analyse wetterbedingter Extremereignisse wie lang anhaltende Trockenheit und Hochwässer. Um dazu belastbare Aussagen zum Klimawandel und dessen Folgen zu treffen, bleibt es erforderlich die Unsicherheiten der Simulationen zu quantifizieren und Defizite der Klimamodelle zu erkennen.

Bei der hydrologischen Verwertung von simulierten Niederschlagsdaten bestehen verschiedenartige Probleme (z.B. Modellbias, Skalentransfer). Die Repräsentativität der örtlichen Niederschlagsstatistik kann in den Klimakontrollläufen im Vergleich zu den Beobachtungen (Messungen) stark abweichen – vor allem in statistischen Kenngrößen wie in den Extremwerten oder in der Anzahl an Trockentagen. Für die hoch aufgelösten Niederschlagsimulationen aus den regionalen Klimamodellen liefert das antreibende globale Klimamodell kontinuierlich die atmosphärischen Randbedingungen. Sollten stärkere Abweichungen niederschlagsrelevanter Wetterlagen bereits in den globalen Klimasimulationen auftreten, so ist zu untersuchen, inwieweit diese Fehler sich auf die Niederschlagsstatistik auswirken können.

Mithilfe der objektiven Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes wurden zahlreiche globale Simulationen mit verschiedenen Reanalysen verglichen. Im nächsten Schritt wurden für den Kontrollzeitraum von 1961 bis 2000 die simulierten Niederschlagsfelder mit dem im KLIWAS Projekt erarbeiteten, hoch aufgelösten DWD/BfG-HYRAS-Datensatz verglichen, so dass die Auswirkung einer fehlerhaft simulierten Wetterlagenhäufigkeit auf die Niederschläge quantifiziert werden konnte. Durch die Anwendung des Multi-Model-Ansatzes ließen sich die Modelldefizite der regionalen und globalen Simulation gut differenzieren. Für die hydrologischen Impact- und Folgemodelle stellen diese Auswertungen eine weitere Möglichkeit dar, mit evaluierten Modellläufen zu arbeiten und Chancen und Grenzen der aufgestellten Klima- und Abflussprojektionen zu erkennen.

## Einleitung

Hydrometeorologische Ereignisse (wie heftiger Starkregen oder lang andauernde Trockenperioden) sind häufig an besondere atmosphärische Randbedingungen (Wetterlagen) gekoppelt. Im Sommer 2003 oder im Frühjahr 2011 verursachten persistente Hochdruckgebiete sehr geringe Niederschlagsmengen. Es folgten historische Niedrigwasserstände in den großen deutschen Wasserstraßen. Auch Hochwässer vergangener Jahre (z.B. Winterhochwässer an der Donau 1990, am Rhein 1993, an der

Elbe 2002 oder am Main 2005) verursachten enorme wirtschaftliche Schäden. Jedoch sind häufig neben diesen kurzlebigen Phänomenen, auch die mittleren klimatischen Zustände von Interesse, die das Wasserangebot in den hydrologischen Systemen beeinflussen (z.B. Grundwasserstände).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt werden im KLIWAS Projekt umfassend über den Multi-Model-Ansatz (z.B. Klimamodellensemble) analysiert. Zukünftige Zustände der Gewässer werden für die Wirkungsbereiche Abfluss, Sediment, Ökologie, Morphologie u.a. modelliert. Meteorologische Eingangsgrößen aller Modelle sind relevante Parameter des Wasserkreislaufes der Referenz- und Klimasimulationsdatensätze (z.B. DWD/BfG-HYRAS-Daten, ENSEMBLES Projekt).

Diese Datenpakete werden vom Deutschen Wetterdienst vor der Anwendung in Impaktmodellen aufbereitet (z.B. Downscaling, Biaskorrekturen) und unter Anwendung von Qualitätskriterien mit Referenzdaten evaluiert (hier z.B. atmosphärische kombiniert mit bodennahen Größen). Wie gut die simulierten und beobachteten Datensätze im Klimakontrollzeitraum (1961-2000) übereinstimmen, wird in der hier vorgestellten Studie anhand des statistischen Niederschlagsverhaltens bei objektiven Wetterlagen belegt. Auf diese Weise wurde einerseits die Abweichung der Häufigkeitsstatistik der Wetterlagen detektiert und andererseits wurden die damit verbundenen Auswirkungen auf den Niederschlag quantifiziert.

Hauptsächlich werden drei Probleme behandelt:

- (1) Welche Zusammenhänge existieren bei der Bildung örtlicher Niederschläge bei unterschiedlichen Wetterlagen in den Referenz- und Simulationsdaten?
- (2) Wie gut können die Klimasimulationen die aus den Referenzdaten abgeleiteten Kenngrößen wiedergeben?
- (3) Welche Konsequenzen lassen sich für Klima- und Impaktmodellierer feststellen, wenn sie Klimasimulationsdaten nutzen (z.B. für die Biaskorrektur oder die Abflussmodellierung)?

## **Methode**

Die Datengrundlage zur Bestimmung von objektiven Wetterlagen (Bissolli & Dittmann 2001) sind Reanalysen (ERA-40, ERA-Interim, NCEP/NCAR) und globale Klimasimulationen (BCCR-BCM2.0, CNRM-CM3, ECHAM5-MPI, ECHAM5-DMI, EGMAM, HADCM3C). Für die Analyse der Niederschläge wurde auf die in KLIWAS erstellten DWD/BfG-HYRAS-Datensätze (Tagesbasis, 5x5 km) zurückgegriffen (siehe Beitrag im Tagungsband: *Hydrologisch relevante Rasterdatensätze (HYRAS) für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe*). Diese räumlich und zeitlich konsistenten Datensätze beruhen auf der Regionalisierung von Messdaten der mitteleuropäischen Messnetze für alle deutschen Flusseinzugsgebiete mit den dazugehörigen internationalen Anteilen. Verschiedene regionale Klimamodelle (RCA3.0, REMO5.7, RACMO2, REGCM3, CLM, RM4.5) liefern über die Kopplung mit globalen Antrieben (z.B. auch ERA-40 Hindcasts) realitätsnahe, lokale Niederschlagsstatistiken (Van der Linden & Mitchell 2009).

In Abhängigkeit von der täglichen Wetterlage im entsprechenden globalen Modell werden die mit den regionalen Modellen simulierten Niederschläge mit den Referenzdaten verglichen. Hierzu wurde ein Kenngrößenkatalog entwickelt, der verschiedene hydrologisch relevante Parameter (wie z.B. Trocken-

tage, mittlere Niederschläge in den hydrologischen Halbjahren oder Tage mit Starkregen) aus den Datensätzen ableitet.

## Ergebnisse

Die objektiven Wetterlagen des DWD zeigen klimatologische Unterschiede in den mittleren Niederschlagshöhen, im Auftreten von Tagen ohne oder geringen Niederschlägen sowie in deren räumlichen Mustern im KLIWAS-Gebiet. Die Fähigkeit der objektiven Wetterlagen, hydrometeorologische Situationen zu differenzieren, ist sehr unterschiedlich in den Wetterlagenklassen. Teilweise werden Wetterlagen mit geringer Klassen interner Variabilität gebildet, andere Wetterlagen zeigen ein indifferentes Verhalten bei den verschiedenen Niederschlagskenngrößen, so dass eine eindeutige Zuordnung zu trockenen oder nassen Witterungsverhalten schwierig ist (vgl. Abb. 1).

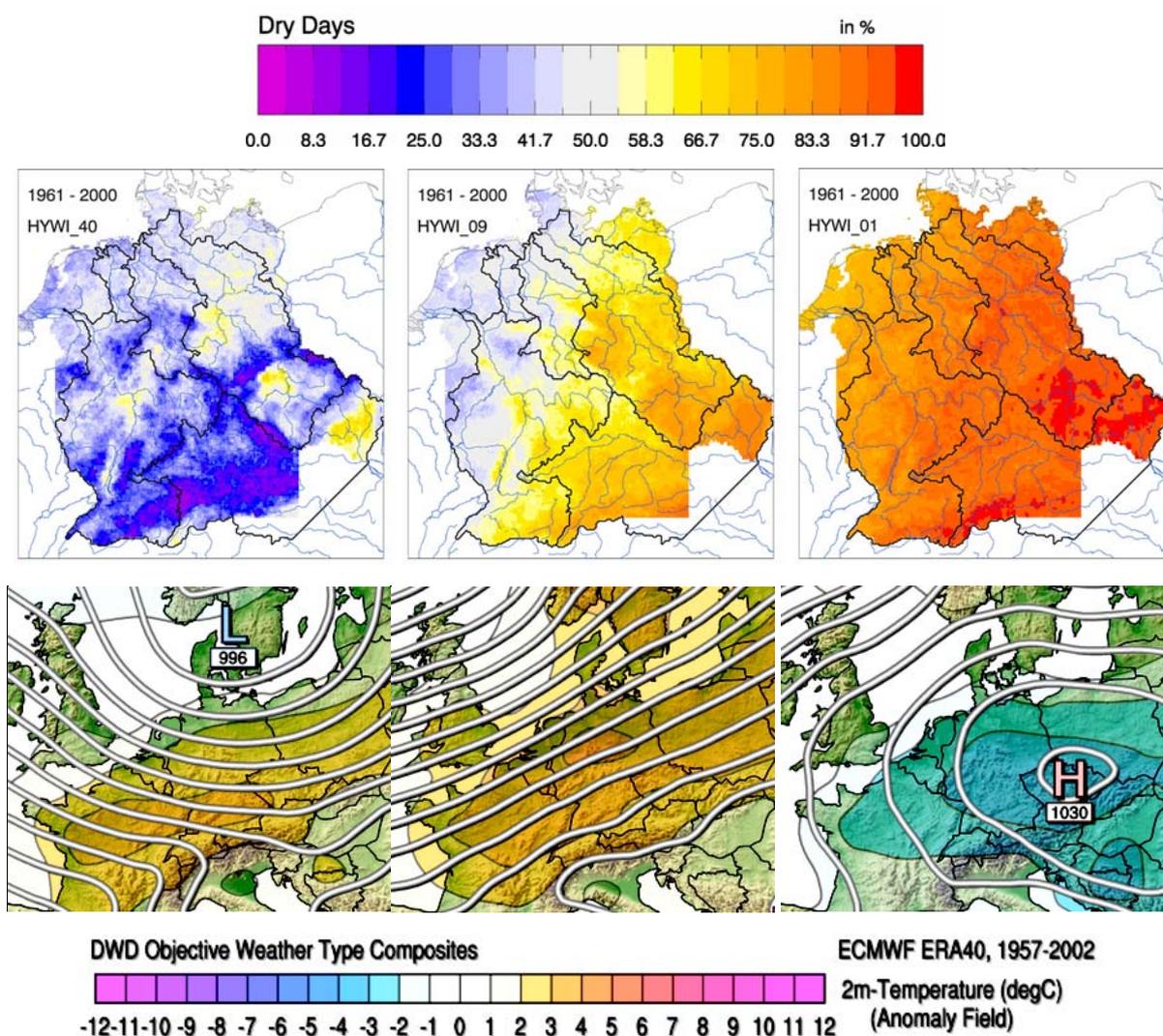


Abb. 1: Mittlere prozentuale Anzahl der Trockentage mit Niederschlag < 1.0 mm (1961-2000, oben), mittlere Bodendruckfelder und mittlere Temperaturanomalien (1957-2002, unten) zyklonaler Nordwestwetterlagen (links), antizyklonaler Südwestwetterlagen (mitte) und antizyklonaler Wetterlagen mit undefinierter Anströmungsrichtung (rechts) im hydrologischen Winterhalbjahr; Datengrundlage sind DWD/BfG-HYRAS und die ERA-40 Reanalyse.

Das statistische Auftreten der objektiven Wetterlagen ist in den verschiedenen Reanalyse-Produkten mit sehr hoher Übereinstimmung untereinander abgebildet. Die NCEP/NCAR und ERA-Interim Produkte liegen näher zusammen als ERA-40. Die atmosphärischen Parameter (wie z.B. der integrierte Wasserdampfgehalt der Troposphäre oder auch die Zyklonalität der Atmosphäre gekennzeichnet durch Hoch- und Tiefdruckgebiete) werden unterschiedlich gut repräsentiert.

Die Reproduktionsfähigkeit der Häufigkeitsstatistik von den Wetterlagenklassen ist in den globalen Klimakontrollläufen (1951-2000) primär abhängig vom Modell und betrachteten Parameter sowie sekundär abhängig von der untersuchten Jahreszeit. Die Statistik kann mit sehr guter (HADCM3C), guter (ECHAM5-DMI, ECHAM5-MPI, EGMAM), sehr mäßiger (BCCR-BCM2.0, CNRM-CM3) Übereinstimmung reproduziert werden (vgl. auch Abb. 2). Klimatologische Besonderheiten der Kontrollläufe ist eine häufige Überschätzung der Westwetterlagen (besonders im Winter), aber auch nasser, zyklonal beeinflusster Witterungssituationen. Im Gegenzug simulieren die Modelle trockene, antizyklonale Wetterlagen mehrheitlich seltener als es in den Reanalysen sichtbar wird.

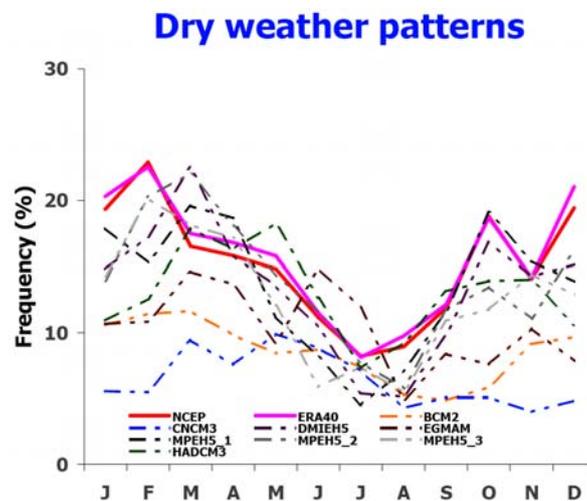


Abb. 2: Monatliche, prozentuale Häufigkeit von eine Gruppe aus Wetterlagenklassen in Reanalysen und Klimakontrollläufen (1961-2000), deren Anzahl an Trockentagen im Gegensatz zu anderen Wetterlagen der Klassifikation in den HYRAS Referenzdaten deutlich höhere Häufigkeiten vorweisen.

Im Allgemeinen sind die Fähigkeiten der regionalen Klimamodelle, die hydroklimatischen Referenzzustände widerzuspiegeln, für verschiedene Kenngrößen unterschiedlich gut. Monatliche Mittelwerte (z.B. 1971-2000) können wesentlich besser abgebildet werden, als die Anzahl der Trockentage oder Tage mit überschrittenen Schwellenwerten von seltenen Ereignissen ( $> 10$  oder  $> 20$  mm Niederschlag). Die simulierten, wetterlagenabhängigen Niederschläge sind in den verschiedenen GCM-RCM-Kombinationen unterschiedlich repräsentiert (Abb. 3). Einige werden räumlich und qualitativ gut simuliert andere nicht (z.B. zu hohe orographische Niederschläge). Bei stärker abweichenden Simulationen können auch kompensatorische Effekte auftreten, indem trockene Wetterlagen zu nass und nasse Wetterlagen eher trockener simuliert werden. Für die hydrologische Abflussmodellierung muss festgehalten werden, dass es in den Simulationen sichtbare, regionale Fehler gibt (z.B. fehlende, durch den Alpenstau erzeugte Luvniederschläge oder zu hohe Küstenniederschläge), die größere Abweichungen in den darauf aufbauenden Impaktmodellen erklären können.

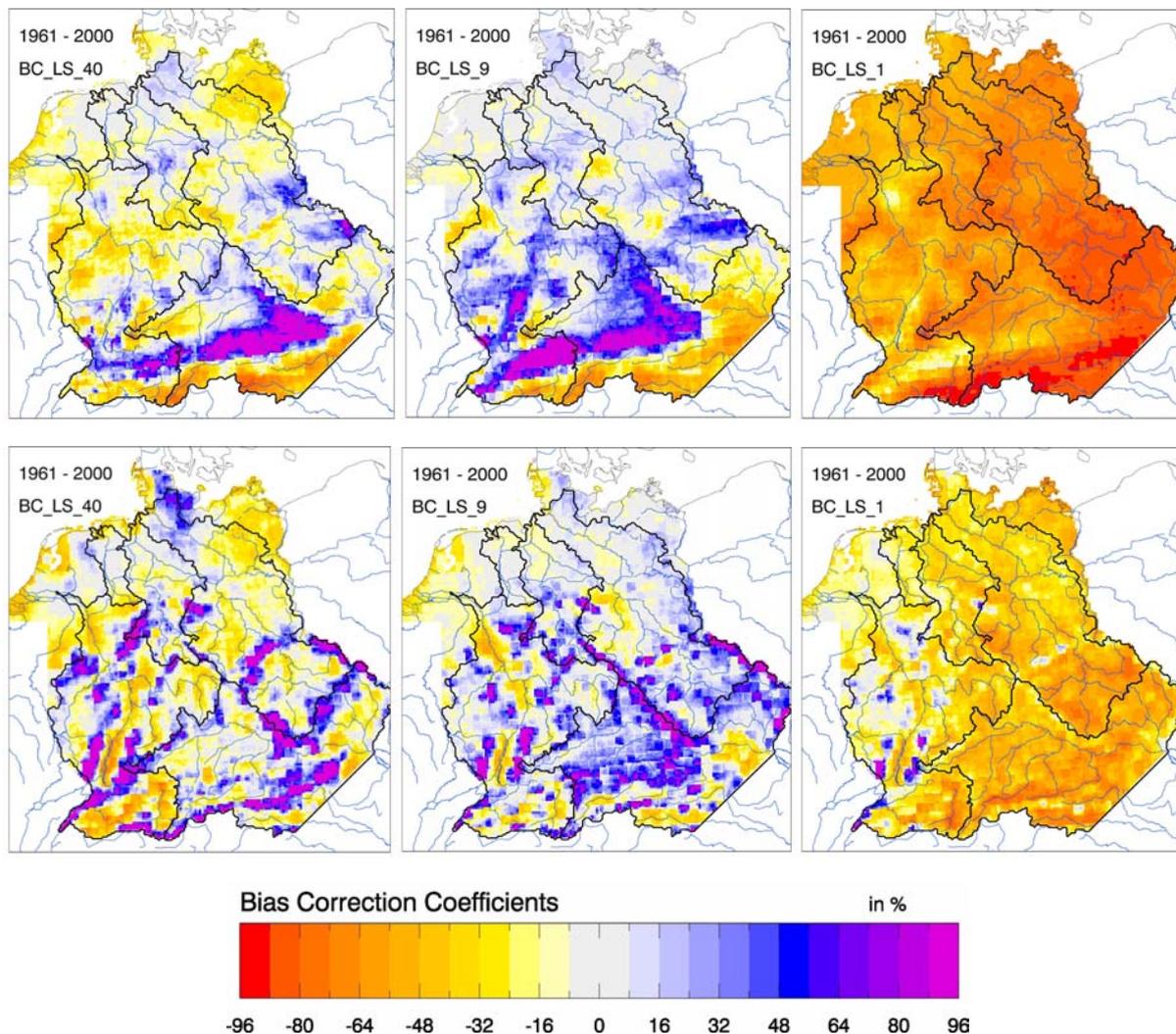


Abb. 3: wie Abb.1 - Prozentuale Abweichungen der mittleren Niederschläge (1961-2000) zyklonaler Nordwestwetterlage (links), antizyklonaler Südwestwetterlagen (mitte) und antizyklonaler Wetterlagen mit undefinierter Anströmungsrichtung (rechts) für unterschiedliche GCM-RCM-Kombinationen BCM2-RCA3 (oben), ECHAM5-REMO5.7 (unten)

## Schlussfolgerung

Sowohl die Betrachtung atmosphärischer Wetterlagenhäufigkeiten als auch deren Niederschlagsstatistiken liefern eine Grundlage GCMs, RCMs und deren Kombinationen untereinander zu bewerten. Damit kann für das hydrometeorologische Klima in den Kontrollläufen die Performance einzelner Modelle aufgestellt werden. Der Einfluss einer fehlerhaften Simulation von Wetterlagen auf das Niederschlagsverhalten kann regional sichtbar gemacht werden.

Die Ergebnisse zeigen auch häufig einen Zusammenhang in der Ausprägung des Niederschlagsbias in Abhängigkeit von der jeweiligen Wetterlagenklasse. Aus diesem Grund wurden bereits verschiedene Biaskorrekturverfahren mit Wetterlagen kombiniert, um eine höhere Genauigkeit der korrigierten Simulationsdaten zu erreichen. Die vom Niederschlagsbias korrigierten Felder könnten mit hydrologischen Abflussmodellen auf die nun verbesserten Eigenschaften verifiziert werden.

## **Literatur**

- Bissolli und Dittman (2001): The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Meteorologische Zeitschrift* 10, 253-260
- Van der Linden und Mitchell (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES-Project. Met Office Hadley Centre, Exeter (UK), 160 pp.

# **Einfluss der Bias-Korrektur auf die Abflusssimulation in mesoskaligen Einzugsgebieten**

Markus C. Casper<sup>1</sup>, Dirk Aigner<sup>1</sup>, Oliver Gronz<sup>1</sup>, Oliver Gutjahr<sup>2</sup>, Günther Heinemann<sup>2</sup> und Rita Ley<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Physische Geographie, Universität Trier, Deutschland

<sup>2</sup> Umweltmeteorologie, Universität Trier, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Um valide Aussagen über die Wirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in mesoskaligen Einzugsgebieten im Mittelgebirge treffen zu können, sind Simulationsläufe mit Regionalmodellen (RCM), möglichst in stündlicher Auflösung, notwendig. Nur diese können den Einfluss der Topographie auf Niederschlag und Temperatur ausreichend berücksichtigen. Allerdings weisen Regionalmodelle oft einen systematischen Fehler auf, weshalb sie vor ihrer Verwendung als Modellantrieb korrigiert werden müssen. Im diesem Beitrag analysieren wir schrittweise die hydrologische Wirkung unterschiedlicher Bias-Korrekturverfahren für Niederschlags- und Temperaturfelder hochaufgelöster COSMO-CLM-Datensätze am Beispiel zweier mesoskaliger Einzugsgebiete im Flussgebiet der Nahe.

## **Einleitung**

Die Abschätzung hydrologischer Veränderungen in Folge des Klimawandels ist eine der wichtigsten Fragen, die Hydrologen heute bearbeiten. Durch den Klimawandel wird die Annahme der Stationarität hydrologischer Prozesse verletzt. Daher darf die Planung wasserwirtschaftlicher Anlagen oder die Bemessung des Hochwasserschutzes nicht mehr ausschließlich auf Basis gemessener Zeitreihen erfolgen (Milly et al., 2008). Mit dem Einsatz hydrologischer Modelle als sog. Impaktmodelle kann die Wirkung des sich wandelnden Klimas quantifiziert werden. Zahlreiche Studien zeigen jedoch auch einen starken Einfluss der räumlichen Auflösung des meteorologischen Inputs auf die Simulationsergebnisse (z. B. Arnell, 2011). Simulationsläufe mit stündlich aufgelösten Regionalmodellen (RCM) können den Einfluss der Topographie auf Niederschlag und Temperatur in mesoskaligen Einzugsgebieten im Mittelgebirge ausreichend berücksichtigen. Die Datenfelder der Klimamodelle weisen einen nicht unerheblichen Bias auf (Sennikovs & Bethers 2009) und müssen vor ihrer Verwendung als Antrieb für hydrologische Modelle korrigiert werden. Fowler et al. (2007) empfehlen u.a. hydrologische Modelle auch für die Analyse der Klimasimulationen selbst einzusetzen anstatt nur Stationsdaten zu verwenden. Als Gütekriterium sind dann jedoch Indikatoren notwendig, die auch die dynamischen Eigenschaften des hydrologischen Systems berücksichtigen. Beispiele für hydrologisch begründete Indikatoren sind Signature Indices, die aus der Abflussdauerlinie oder aus der Verteilung der Ereignisabflussbeiwerte abgeleitet werden (Casper et al., 2012). Im diesem Beitrag analysieren wir mit Hilfe von Signature Indices schrittweise die hydrologische Wirkung unterschiedlicher Bias-Korrekturverfahren für Niederschlags- und Temperaturfelder hochaufgelöster COSMO-CLM-Datensätze am Beispiel der mesoskaligen Einzugsgebiete Kronweiler und Kellenbach im Flussgebiet der Nahe.

## Methode

### Untersuchungsgebiet, Hydrologisches Modell und Eingangsdaten

Die Einzugsgebiete der Pegel Kronweiler und Kellenbach liegen beide im Flussgebiet der Nahe (Rheinland-Pfalz/Deutschland). Tabelle 1 fasst die wichtigsten Gebietskennwerte zusammen.

Tab. 1: Kennwerte der Einzugsgebiete Kronweiler und Kellenbach

Gebietskennwert	Kronweiler (65 km <sup>2</sup> )	Kellenbach (362 km <sup>2</sup> )
Mittl. Jahresniedersch. (mm/a)	930	675
Pot. Verdunstung (mm/a)	535	540
Mittlere Abfluss- Winter beiwerte Sommer	0.41 0.09	0.28 0.07
Nutzung	43% Acker, 3% Siedlung 54% Wald	58% Acker, 3% Siedlung 39% Wald

Als Simulationsmodell verwenden wir das offizielle N-A-Modell für das Nahe-Einzugsgebiet (LUWG, Mainz). Es handelt sich dabei um das Modellsystem LARSIM (Bremicker, 2000). In dieser Studie betreiben wir dieses Modell mit Klimadaten aus verschiedenen Quellen (Tabelle 2). Dabei hat jede der verwendeten Zeitreihen eine Länge von 10 Jahren und eine zeitliche Auflösung von 1 Stunde.

Tab. 2: Eingangsdaten

- 
- (1) Gemessene meteorologische Daten interpoliert aus 56 Stationen des DWD, 1994-2003
  - (2) COSMO-CLM Kontrolllauf, Bezugszeitraum 1991-2000 (Szenario C20)
  - (3) COSMO-CLM Projektion, Zeitraum 2091-2100 (Szenario A1B)
- 

Die verwendeten COSMO-CLM (CCLM) Daten stammen aus einem Lauf der im Rahmen der Forschungsinitiative Rheinland-Pfalz an der Universität Trier erarbeitetet wurde. Hierbei kam COSMO-CLM in der Version 4.8.11 zum Einsatz (Auflösung von 5 km). Auf die Datensätze (2) und (3) wurden 3 verschiedene Korrekturverfahren für den Niederschlag und eines für die Temperatur angewendet. Jeder Datensatz wurde bilinear auf das 1 km Raster des Modells interpoliert. Abflussmessungen liegen für die Pegel Kronweiler und Kellenbach für den Zeitraum 1990 bis 2003 vor.

### Signature Indices

Signature Indices haben einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Gütemaßen (z. B. RMSE, R<sup>2</sup>, Nash-Sutcliffe-Efficiency): Sie gestatten eine genauere Aussage darüber, worin die Unterschiede zweier Zeitreihen bestehen. Dies ist dann von Interesse, wenn Auswirkungen des Klimawandels abgeschätzt oder wenn der Einfluss einer Bias-Korrektur der Antriebsdaten auf das simulierte Abflussverhalten eines Einzugsgebiets untersucht werden soll. Die Unterschiede zweier Zeitreihen können mit Signature Indices in hydrologisch aussagekräftigen Begriffen wie Wasserbilanz oder Reaktivität ausgedrückt werden. In dieser Studie kommen 9 Signature Indices zum Einsatz, um die Veränderung des hydrologischen Verhaltens von Einzugsgebieten bei unterschiedlichem meteorologischem Modellantrieb zu untersuchen (Tabelle 3). Fünf dieser Indices werden aus Abflussdauerlinien abgeleitet, vier stehen im Zusammenhang mit der Verteilung der Ereignisabflussbeiwerte (Casper et al., 2012; Ley et al., 2011).

Tab. 3: Übersicht der neun Signature Indices

Bezeichnung	Information
BiasRR	Veränderung des Mittelwerts (Wasserbilanz)
BiasFDCmidslope	Veränderung der Reaktivität
BiasFHV	Veränderung der Hochwasserabflüsse
BiasFLV	Veränderung der Niedrigwasserabflüsse
BiasFMM	Veränderung des Medians (mittlere Abflüsse)
BiasERC	Veränderung der mittleren Feuchtespeicherung im Einzugsgebiet
BiasERCSummer	Veränderung der Abflussbeiwerte des hydrologischen Sommerhalbjahres
BiasERCWinter	Veränderung der Abflussbeiwerte des hydrologischen Winterhalbjahres
BiasERCcv	Veränderung der Variabilität der Abflussbeiwerte

### Bias-Korrektur

Die für die hydrologische Modellierung entscheidenden Variablen (Temperatur und Niederschlag) aus regionalen Klimasimulationen weisen zum Teil einen beträchtlichen Bias auf (Sennikovs & Bethers 2009). Aus diesem Grund ist das Entfernen des Bias aus den CCLM-Ausgaben (= Bias-Korrektur) für ihre Verwendung in hydrologischen Impaktstudien unumgänglich. In dieser Arbeit wird eine Bias-Korrektur durchgeführt, die in ihren Grundzügen der Methode von Piani et al. (2010) entspricht und im Folgenden als Quantile-Matching (Q-Matching) bezeichnet wird. Die Grundidee des Q-Matching besteht darin, die kumulative Verteilungsfunktion der großskaligen Variable aus dem Klimamodell (hier COSMO-CLM 5km) der kumulativen Verteilungsfunktion der lokalskaligen Variable (Wetterstation) anzupassen. Um die Verteilungsfunktion einer Zeitreihe zu bestimmen, muss zunächst eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion an diese angepasst werden. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann entweder über eine theoretische bzw. parametrische Verteilungsfunktion bestimmt werden, welche bestmöglich an die Daten angepasst wird, oder über eine empirische, nicht-parametrische Verteilung berechnet werden („emp.QM“). Als parametrische Verteilung für den Niederschlag eignet sich eine Gamma-Verteilung („gamma“), während sich an Temperaturdaten eine Gauß'sche Normalverteilung gut anpassen lässt. Es ist nicht garantiert, dass statistische Modelle für den Kern einer Verteilung auch eine adäquate Darstellung der Extreme liefern. Für Temperaturextreme reicht die Anpassung einer separaten Normalverteilung. (Piani et al. 2010). Für die Anpassung der Niederschlagsextreme wurde zusätzlich eine generalisierte Pareto-Verteilung (GPV) angenommen („GQM“). Tabelle 4 enthält eine Übersicht der auf die einzelnen Datensätze angewendeten Korrekturverfahren.

Tab.4: Eingesetzte Bias-Korrekturverfahren für Niederschlag und Temperatur.

Datensatz	Niederschlag	Temperatur
(2) COSMO_CLM Kontrolllauf (C20)	(2.1) empirisches Q-Matching (emp.QM)	Parametrisches Q-Matching, mit Extremwertanpassung (Normalverteilungen)
	(2.2) parametrisches Q-Matching (gamma)	
	(2.3) parametrische Q-Matching mit separater Extremwertanpassung (GQM)	
(3) COSMO_CLM Projektion: 2091-2100 (A1B)	(3.1) parametrisches Q-Matching (gamma)	Parametrisches Q-Matching, mit Extremwertanpassung (Normalverteilungen)
	(3.2) parametrische Q-Matching mit separater Extremwertanpassung (GQM)	

## Ergebnisse

Der CCLM-Kontrolllauf wurde mit drei Verfahren zur Bias-Korrektur bearbeitet. Dabei ist für Kronweiler jeweils eine relative starke Überschätzung der Niederschlagsmessdaten erkennbar (Tab. 5), während für Kellenbach dieser Fehler deutlich geringer ausfällt. Dies lässt sich damit erklären, dass in der Nähe des Einzugsgebietes Kronweiler keine Klimastation zur Korrektur liegt bzw. die Kammlage im Hunsrück hohe Gradienten nach sich zieht. Diese Abweichung führt hier auch zu einer deutlichen Überschätzung der Abflüsse (BiasRR, BiasFHV), insbesondere im Sommer sind die Abflussbeiwerte erhöht (BiasERC Summer) (Abb. 1).

Tab. 5: Jahresniederschlag in mm

Herkunft	Zeitraum	Kronweiler	Kellenbach
gemessen	1994-2003	937.6	690.9
CCLM	Kontrolllauf, emp.Qm	1023	712
CCLM	Kontrolllauf, gamma	1048	733
CCLM	Kontrolllauf, GQM	1020	717
CCLM	Projektion: 2091-2100, gamma	1086	774
CCLM	Projektion: 2091-2100, GQM	1041	747

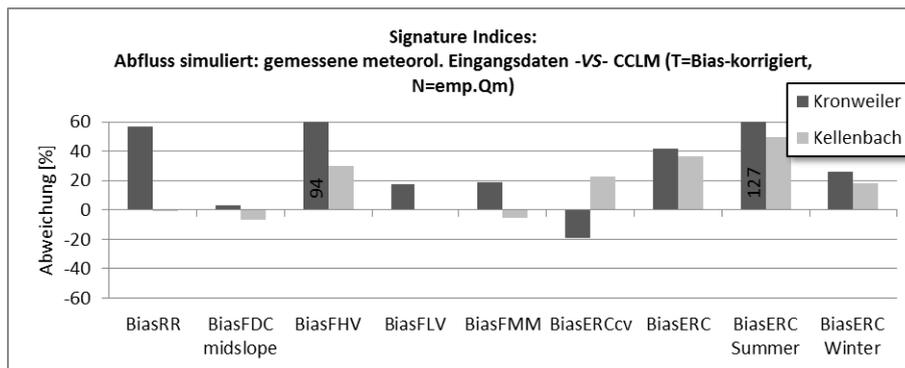


Abb. 1: Signature Indices: Vergleich von simulierten Abflusszeitreihen mit (1) gemessenen meteorologischen Eingangsdaten (1994-2003) und (2) CCLM-Kontrolllauf (emp.Qm)

Die Temperaturkorrektur hat einen sichtbaren Einfluss auf das Abflussverhalten: Die Erhöhung der Temperatur führt zu einer höheren Verdunstung, womit insgesamt der Abfluss etwas reduziert wird (Abb.2).

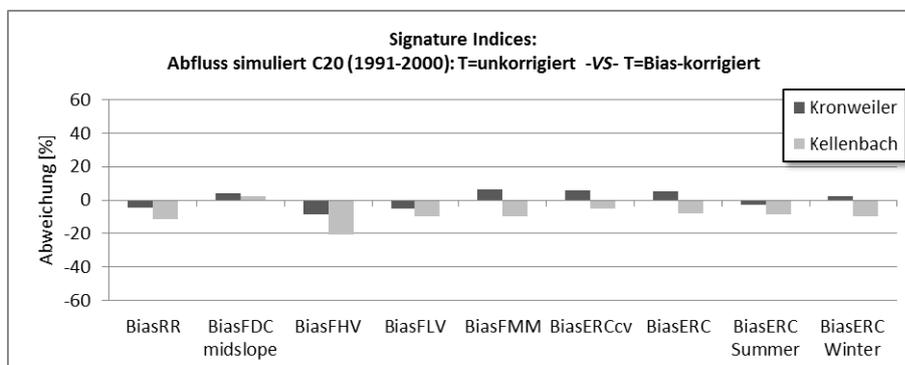


Abb. 2: Signature Indices: Vergleich von simulierten Abflusszeitreihen mit CCLM-Daten (C20) als Modellantrieb: (1) unkorrigierte Temperaturdaten und (2) Bias-korrigierte Temperaturdaten.

Die Verwendung einer empirischen Verteilungsfunktion gestattet die bestmögliche Anpassung der Modelldaten an die Beobachtungsdaten. Allerdings ist es wegen der fehlenden Berücksichtigung zukünftiger Extremwerte nicht sinnvoll, sie auf die Daten der Zukunftsprojektion anzuwenden. Daher wurden hier zwei parametrische Verfahren zur Korrektur verwendet. Die alleinige Verwendung einer Gammafunktion zur Anpassung der Niederschlagswerte („gamma“) führt jedoch zu einer sichtbaren Überschätzung der Abflüsse gegenüber dem empirischen Q-Matching, insbesondere im Sommer wird dies sehr deutlich (Abb. 3). Bei separater Anpassung der Extremwerte („GQM“) ist die Abweichung gegenüber dem empirischen Q-Matching stark verringert (Abb. 4).

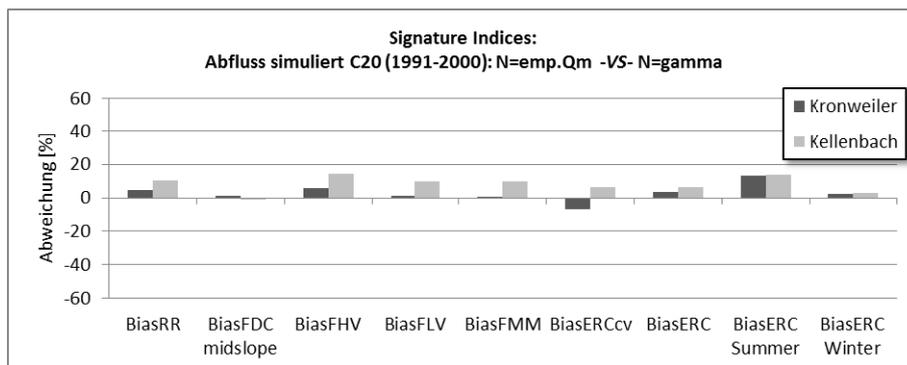


Abb. 3: Signature Indices: Vergleich von simulierten Abflusszeitreihen mit CCLM-Daten als Modell-antrieb: Niederschlag korrigiert mit (1) empirischem Q-matching und (2) parametrischem Q-matching

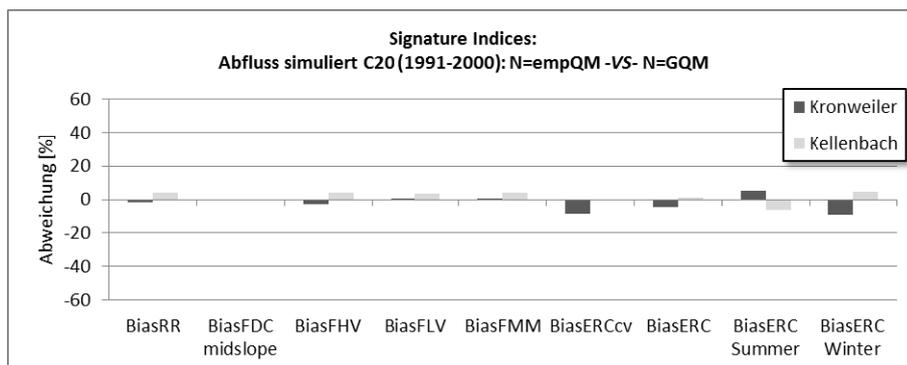


Abb. 4: Wie in Abb.3 nur mit (2) parametrischem Q-matching mit zusätzlicher Extremwertanpassung

Die CCLM-Projektion für den Zeitraum 2091-2100 weist eine leichte Zunahme im mittleren Jahresniederschlag und eine Temperaturzunahme von 3,8-3,9 Grad Celsius aus (Tab. 6). Daher bleibt trotz Niederschlagszunahme, die Wasserbilanz weitgehend konstant (BiasRR, Abb. 5). Auffällig ist vor allem starke Rückgang der Ereignisabflussbeiwerte im Sommer (BiasERC Summer), was auf deutlich trockenere Verhältnisse während der Sommermonate schließen lässt. Der Rückgang der Abflussbeiwerte im Winter für Kellenbach steht vermutlich im Zusammenhang mit einem deutlichen reduzierten Schneeanteil im Winter, was zu einer gleichmäßigeren Abflussbildung führt weitgehend ohne Schneeschmelzbedingung.

Tab. 6: Jahresmitteltemperatur in °C

Herkunft	Zeitraum	Kronweiler	Kellenbach
gemessen	1994-2003	8,6	8,8
CCLM	Kontrolllauf	8,3	8,6
CCLM	Projektion: 2091-2100	12,1	12,5

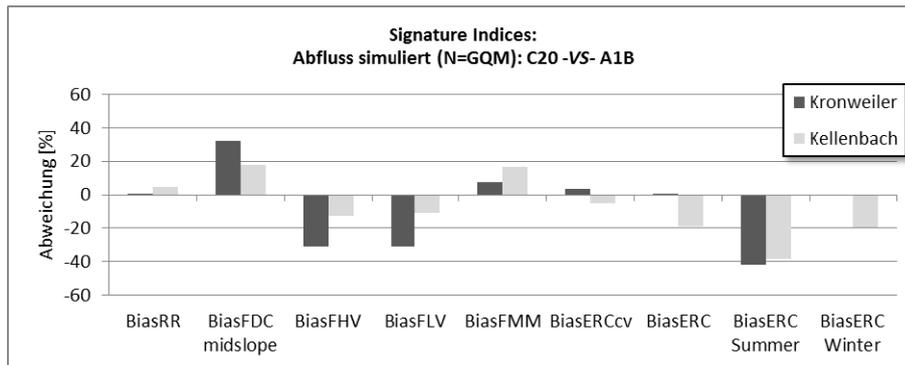


Abb. 5: Signature Indices: Vergleich simulierter Abflusszeitreihen mit CCLM-Daten als Modellantrieb: (1) C20-Szenario (1991-2000) und (2) A1B-Szenario (2091-2100), Korrektur: GQM

## Schlussfolgerung

Die Korrektur des Bias in Niederschlags- und Temperaturfeldern darf nicht ausschließlich anhand von Stationsdaten validiert werden. Unsere Studie zeigt, dass die räumliche Struktur der Bias-Korrektur offensichtlich noch fehlerhaft ist: Während der Fehler für Kellenbach niedrig ausfällt, ist die Überschätzung des Niederschlags in Kronweiler sehr groß. In der Zukunft ist daher besonders die räumliche Interpolationsmethode zu verbessern, bevor man Regionale Klimamodelle als Antrieb für hydrologische Modelle auf der Mesoskala verwenden kann. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Verwendung eines parametrischen Q-Matching mit separater Extremwertanpassung für den Kontrolllauf ähnlich gute Ergebnisse liefert wie die Anpassung einer empirischen Verteilung. Für Zukunftsprojektionen kann diese Methode daher empfohlen werden.

## Literatur

- Arnell, N. W. (2011): Uncertainty in the relationship between climate forcing and hydrological response in UK catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 897-912, doi:10.5194/hess-15-897-2011.
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, *Freiburger Hydrologische Schriften*, Band 11.
- Casper, M.C., Grigoryan, G., Gronz, O., Gutjahr, O., Heinemann, G., Ley, R. und A. Rock (2012): Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices, *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 409-421.
- Fowler, H. J., S. Blenkinsop, und C. Tebaldi (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Int. J. Climatol.* 27, 1547-1578. doi:10.1002/joc.1556.
- Ley, R., Casper, M.C., Hellebrand, H. und R. Merz (2011): Catchment Classification by Runoff Behaviour with Self-Organizing Maps (SOM), *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 2947-2962.
- Milly, P.C.D, Betancourt, J, Falkenmark, M., Hirsch, R.M, Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P. und R.J. Stouffer (2008): Stationarity Is Dead: Whither Water Management, *Science* 319: 573-574.
- Piani, C., Haerter, J., und E. Coppola (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 99, 187-192.
- Sennikovs, J. und U. Bethers, U. (2009): Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modeling. *18th World IMACS/MODSIM Congress*.

# Ein Frühwarnsystem für Wasserknappheit in Kärnten

Jürgen Komma<sup>1</sup> und Christian Kopeinig<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, Österreich

<sup>2</sup> Abteilung Hydrographie, Amt der Kärntner Landesregierung, Österreich

## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Frühwarnsystems für potentielle Wasserknappheit in verschiedenen Gemeinden und Flusseinzugsgebieten im österreichischen Bundesland Kärnten. Die Frühwarnung soll als Basis für die Einleitung von Gegenmaßnahmen und somit für die gezielte Entschärfung von möglichen Engpässen im Bereich der Trinkwasserversorgung dienen. Für die Überwachung der hydrometeorologischen Verhältnisse in den verschiedenen Kärntner Untersuchungsgebieten kann auf ein sehr dichtes Netzwerk von Niederschlags-, Abfluss- und Temperaturmessstellen zurückgegriffen werden. Neben den Durchflüssen an den Pegelmessstellen der Kärntner Fließgewässer, stehen auch umfangreiche Aufzeichnungen von Quellschüttungen im gesamten Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

Ein fundamentaler Bestandteil des geplanten Frühwarnsystems ist ein konzeptionelles hydrologisches Niederschlag-Abfluss-Modell. Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt anhand von beobachteten Durchflussganglinien, sowie durch die Einbeziehung von zusätzlichen räumlichen und zeitlichen Informationen (z.B.: Satellitenaufnahmen der Schneebedeckung, Quellschüttungen,...). Basierend auf den Simulationsergebnissen aus der hydrologischen Modellierung wird ein Szenarienkatolog zur Abschätzung des künftigen Wasserdargebots für verschiedene Versorgungsregionen in Kärnten erstellt. Das Katalogsystem setzt sich aus Kombination von Modellsimulationen mit unterschiedlichen Anfangszuständen und verschiedenen meteorologischen Eingangsszenarien für drei Flogemonate zusammen. So wird jeweils der sehr trockene, trockene und normale Gebietszustand zu Beginn der Vorhersageperiode mit dem sehr trockenen, trockenen oder normalen Niederschlags- und Temperaturszenario kombiniert. Es ergibt sich somit ein einfach handhabbares Werkzeug zur Abschätzung von künftigen Engpässen bei der Wasserversorgung in den verschiedenen Kärntner Wasserversorgungseinheiten. Um den Einfluss der globalen Erwärmung bzw. mögliche Rückgänge des jährlichen Niederschlags auf die künftige Situation der Wasserversorgung in Kärnten zu analysieren wurden unterschiedliche Modellrechnungen mit angepassten Niederschlags- und Temperatureingangsdaten berechnet.

## Einleitung

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes "AlpWaterScarce" wurde für unterschiedliche Untersuchungsgebiete in Italien, Slowenien, Deutschland, Frankreich und Österreich das Gefährdungspotential für Situation mit Wasserknappheit, sowie mögliche Strategien zur Vermeidung bzw. zum Umgang mit solchen Situationen entwickelt. Ein anderer Aspekt dieser Arbeit beschäftigt sich mit künftigen Entwicklung der Wasserversorgerssituation im Alpenbereich.

## Projektgebiet und Daten

Das Projektgebiet umfasst die gesamte Fläche des Bundeslandes Kärnten im südlichen Österreich. Zur Erstellung, Eichung und Validierung des hydrologischen Modells, als Basisbestandteil des Frühwarnsystems, konnte auf ein dichtes hydrologisches Messnetz zurückgegriffen werden. Abbildung zeigt die geologische Karte des Projektgebietes und die Lage der verwendeten Pegelmessstellen (Dreiecke) und Niederschlagsstationen (Punkte) mit kontinuierlicher Aufzeichnung.

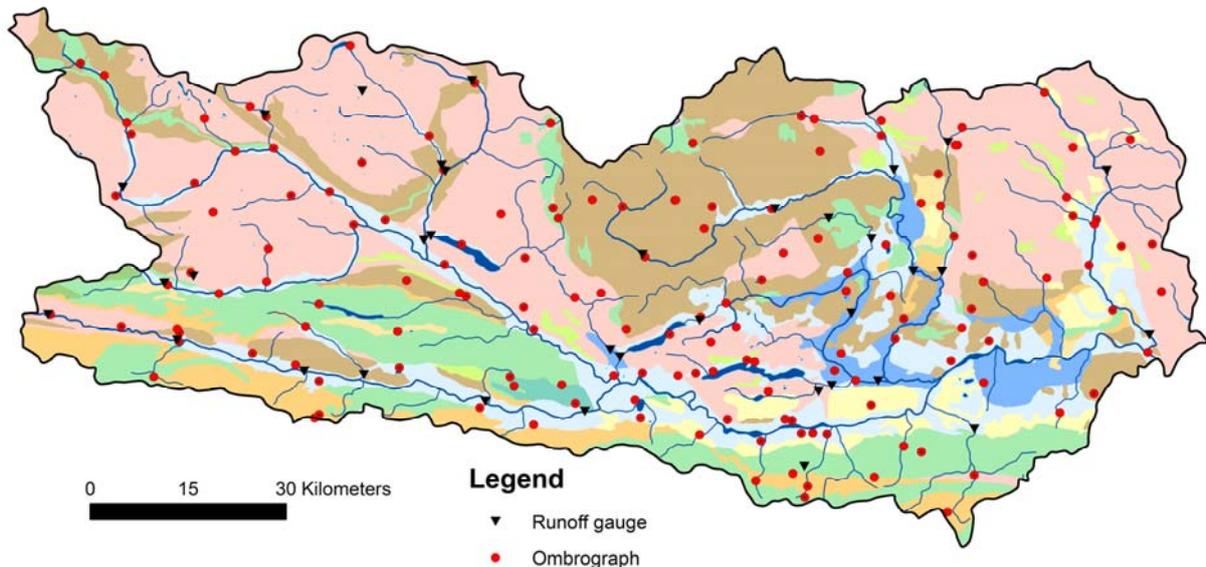


Abb. 1: Hydrogeologische Übersicht des Projektgebietes. Niederschlagsstationen sind mit roten Kreisen, Abflussstationen mit schwarzen Dreiecken markiert.

Wichtige Informationen über die zeitliche und räumliche Dynamik des Wasserdargebots im Projektgebiet, werden durch umfassende Aufzeichnungen von Quellschüttungen geliefert. Abbildung 2 zeigt eine Übersichtskarte des Modellgebiets mit der räumlichen Lage der Messstellen zur Erfassung der Quellschüttungen. Dabei wird grundsätzlich nach dem Informationsgehalt der gemessenen Zeitreihen unterschieden. Quellschüttungszeitreihen mit einer hohen zeitlichen Auflösung (täglich bis wöchentliche Messungen) und für eine Periode von mehr als zwei Jahren, werden als sogenannte Referenzquellen bezeichnet (dicke schwarze Kreise in Abbildung 2). Für diese Referenzquellen wird im Rahmen des Frühwarnsystems die hydrologische Modellierung durchgeführt. Quellen bei denen die Aufzeichnungen der Quellschüttungen eine geringe zeitliche Auflösung bzw. nur für eine kurze Periode vorhanden sind, werden in Abbildung 2 als dünne Kreise dargestellt. Für diese Quellen wird die Abschätzung der Gefahr von Wasserknappeit von ähnlichen Referenzquellen abgeleitet.

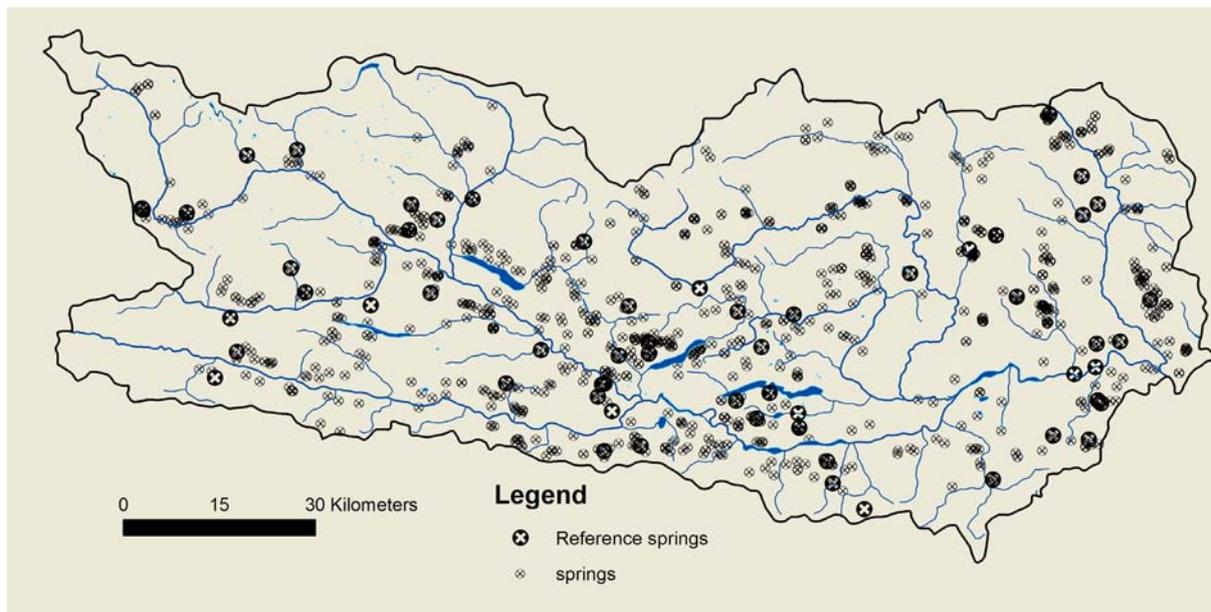


Abb. 2: Übersicht der Quellschmessstellen in Kärnten (kleine, schwarze Kreise). Quellen mit guter Datenverfügbarkeit und Datenqualität sind mit dicken schwarzen Kreisen dargestellt (Referenzmessstellen).

### Modellstruktur und Parameter

Bei dem verwendeten Modell handelt es sich um ein konzeptionelles, kontinuierlich rechnendes Wasserhaushaltsmodell, das die an der Abflussbildung beteiligten Prozesse durch einfache mathematische Zusammenhänge beschreibt. Das Modell besteht – vereinfacht dargestellt – aus drei Hauptteilen:

- Subroutinen für Schneeakkumulation und -schmelze,
- Subroutinen für den Bodenfeuchtehaushalt und
- Subroutinen für die Berechnung von Antwort- und Routingfunktionen

Als Rasterweite wurde 1x1 km gewählt. Die Schneeschmelz-Routine des HBV-Modells ist ein Ansatz nach dem einfachen und weit verbreiteten Gradtagverfahren, der Aggregatzustand des Niederschlags wird durch eine Grenztemperatur bestimmt. Die Abflussbildung für jedes Pixel wird durch einen Bodenfeuchteansatz beschrieben. Die Bodenfeuchte  $S_{bf}$  ist definiert als Wassermenge in der obersten Bodenzone (Einheit Millimeter) und bilanziert den Niederschlag, die Schneeschmelze, die Bodenfeuchteänderung und die aktuelle Verdunstung. Die potentielle Verdunstung wurde mittels des modifizierten Blaney-Criddle Verfahrens in Abhängigkeit der Lufttemperatur berechnet. Der zum Abfluss beitragende Teil von Regen und Schneeschmelze ist eine nichtlineare Funktion der Bodenfeuchte. Die maximale Speicherkapazität in der obersten Bodenzone wird hier als Feldkapazität bezeichnet. Im Gegensatz zur bodenkundlichen Definition der Feldkapazität beschreibt dieser Parameter das Sättigungsverhalten des Bodens und enthält die hydrologisch wirksame Bodenmächtigkeit. Dementsprechend ist die Einheit des hier gewählten Feldkapazitätsparameters Millimeter. Bei vollständiger Sättigung der obersten Bodenzone trägt der gesamte Regen und die gesamte Schneeschmelze zum Abfluss bei. Bei nicht vollständiger Sättigung tragen Regen und Schneeschmelze auch zur Erhöhung der Bodenfeuchte bei. Eine Verringerung der Bodenfeuchte erfolgt nur durch Verdunstung.

Neben der Simulation der Abflussbildungsprozesse werden auch die Abflusskonzentrationsprozesse am Hang bzw. die Wellenaufbauprozesse im Gerinne durch einfache Speicheransätze bzw. lineare Speicherkaskaden simuliert.

Die Modellparameter wurden entsprechend ihrer ähnlichen hydrologischer Eigenschaften (HRU - hydrologic response units) für ein 1x1 km Raster im gesamten Modellgebiet definiert. Die Kalibrierung erfolgte manuell anhand von Durchflussmessungen und zahlreichen ergänzenden Datenquellen (z.B. Schneehöhen, MODIS-Daten, usw..) sowie unter Einbeziehung von lokalem Expertenwissen.

Um die zeitliche Dynamik der einzelnen Referenzquellstationen zu modellieren wurde das hydrologische Modell im unmittelbaren Bereich der Quelle um eine lineare Speicherkaskade zur Abbildung der langsameren Abflussreaktionen im Untergrund erweitert. In Ermangelung genauer Angaben über die Einzugsgebiete der einzelnen Quellmessstellen wurde standardmäßig ein Einflussbereich von 5x5 Rasterelementen gewählt. Diese Vorgangsweise erscheint gerechtfertigt zu sein, da die Modellierung auf die Beschreibung der zeitlichen Dynamik der Quellschüttungen abzielt.

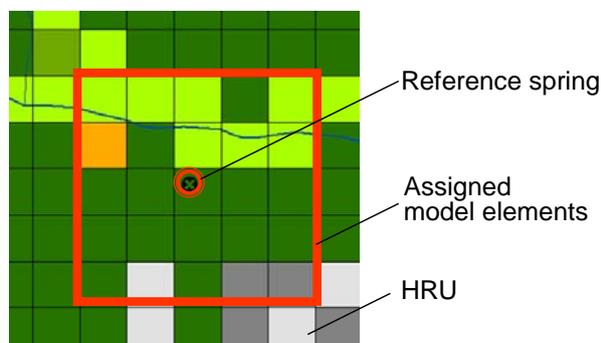


Abb. 3: Definierte Einflussfläche für die Modellsimulation einer Referenzquelle. Der Kreis stellt die Lage der Referenzquelle dar. Das Quadrat repräsentiert die hydrologische Einflussfläche. Der mittlere Abfluss der Elemente innerhalb des Quadrates bildet den Zufluss zur linearen Speicherkaskade.

Die Bestimmung der Parameter der linearen Speicherkaskade erfolgte durch die umfangreiche Testrechnungen mit unterschiedlichsten Parametersätzen. Es wurden für jede Referenzquelle jene Modellparameter gewählt deren Ergebnisse die höchsten Pearson-Korrelationen mit den gemessenen Zeitreihen der jeweiligen Referenzquellen aufwiesen.

## Szenarienatalog und Anwendung für Quellen

Das hydrologische Modell wird nun zur Simulation von unterschiedlichen Trockenheitsszenarien für die kommenden drei Folgemonate verwendet. Dazu werden drei charakteristische Ausgangszustände und drei charakteristische meteorologische Szenarien definiert. Die Definition dieser Szenarien erfolgte auf Basis von beobachteten Niederschlägen bzw. Lufttemperaturen sowie simulierten Bodenfeuchtwerten bzw. Speicherständen für eine Periode von 40 Jahren (1970 bis 2010). Es wurden jeweils drei verschiedene Anfangszustände und drei meteorologische Szenarien mit einander kombiniert. Die Auswahl des normalen, trockenen und sehr trockenen Ausgangszustandes erfolgte monatsweise über die Quantile der Summenhäufigkeitsverteilung. Die Definition der meteorologischen Eingangsgrößen für die Modellierung erfolgte in analoger Weise zu den Anfangsbedingungen. Das Grundkonzept zur Erstellung des Szenarienataloges ist in Abbildung 4 dargestellt.

## Basic idea of the scenario catalogue for dry conditions

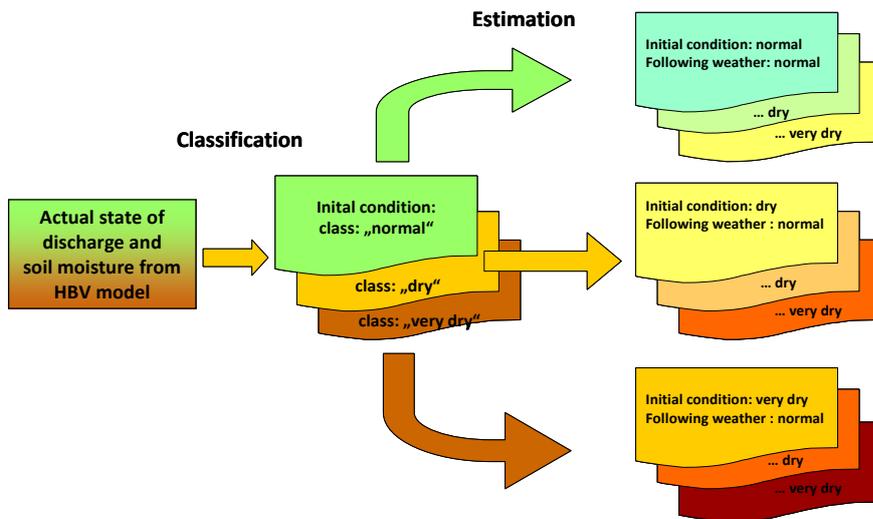


Abb. 4: Grundschemata des Szenariokatalogsystems für das Frühwarnsystem für Wasserknappheit in Kärnten.

Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für die Referenzquellen werden durch die mittleren Durchflüsse normiert und danach durch Multiplikation mit den mittleren Quellschüttungen der betreffenden Referenzquellen umgerechnet. Damit ergibt sich in Abhängigkeit der Anfangsbedingungen und der künftigen meteorologischen Entwicklung eine quantitative Aussage über das prognostizierte Wasserdargebot an den verschiedenen Referenzquellen. Um das Frühwarnsystem auch für die restlichen Quellfassungen nutzbar zu machen, werden die Szenarioergebnisse durch lineare Regression von den Referenzquellen auf zugeordnete Quellfassungen übertragen. Die Zuordnung der Quellen erfolgte dabei durch die Bestimmung der Kreuzkorrelationen zwischen den gemessenen Quellschüttungen der Referenzquellen und benachbarter Quellfassungen.

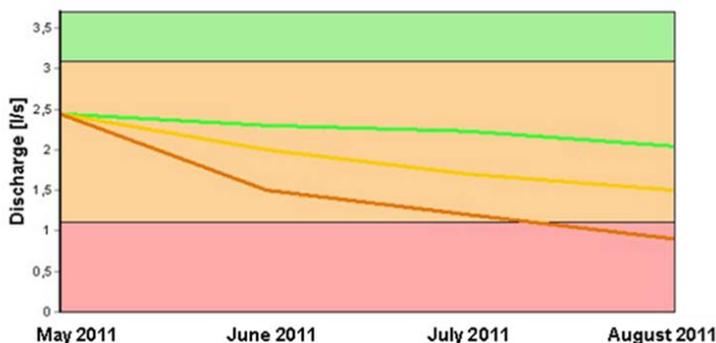


Abb. 5: Beispiel einer Quellschüttungsprognose im Mai 2011. Die Quellschüttung wird für eine Zeitspanne von drei Monaten abgeschätzt. Die drei Linien repräsentieren die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen normal (obere Linie), trocken (mittlere Linie) und sehr trocken (untere Linie).

Die prognostizierten Quellschüttungen dienen nun den Wasserversorgungseinheiten zur Abschätzung der Gefahr von Wassermangel und zur Planung bzw. Einleitung von Maßnahmen zur Vermeidung von Versorgungsengpässen.

Danksagung: Die Autoren danken der Kärntner Landesregierung und der EU-Innitiative (AlpWaterScarce) für die Unterstützung dieses Projektes.

## **Grenzen überwinden im Nahen Osten – Ergebnisse 10-jähriger hydrologischer Modellstudien**

Lucas Menzel, Tobias Törnros

Geographisches Institut, Universität Heidelberg, Deutschland

Der östliche Mittelmeerraum, insbesondere die Region zwischen den Quellgebieten des Jordans und dem Roten Meer, zählt zu den wasserärmsten Landstrichen der Erde. Die knappen Wasserressourcen werden in einem schwierigen politischen Umfeld zwischen unterschiedlichen Ländern und Nutzergruppen nahezu vollständig verbraucht. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts GLOWA-Jordan wurden an den Universitäten Kassel und Heidelberg in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Projektregion umfangreiche hydrologische Modellstudien durchgeführt. Der Beitrag stellt die wichtigsten Ergebnisse der vergangenen 10 Jahre vor. So ist es erstmals gelungen, eine großräumige, ca. 100.000 km<sup>2</sup> umfassende und grenzüberschreitende Übersicht der Wasserverfügbarkeit und des Wasserbedarfs für die landwirtschaftliche Bewässerung zu simulieren und in Karten darzustellen. Dafür waren Modellentwicklungen und entsprechende Validierungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen erforderlich, angefangen von Punktstudien an Experimentalflächen bis hin zu vergleichenden Auswertungen der flächenhaften Evapotranspiration mit Hilfe von Fernerkundungsdaten. Schließlich dienten die umfangreichen Vorarbeiten dazu, die hydrologischen Modelle mit einer Reihe von regionalen Szenarien zu Umweltveränderungen in der Region anzutreiben und deren Auswirkungen auf die Wasserressourcen zu simulieren. Hierzu gehören Szenarien zur historischen und künftigen Dürreentwicklung sowie Landnutzungs- und Klimaszenarien. Die simulierten, wasserbezogenen Auswirkungen der Szenarien wurden wiederum dazu verwendet, eine den künftig zu erwartenden, klimatischen Bedingungen möglichst angepasste, wassersparende Landnutzungsstrategie zu entwickeln. Die Ergebnisse zeigen aber, dass Landnutzungsänderungen in der Region zwar hydrologische Auswirkungen haben, deren Dimensionen jedoch in keinem Verhältnis zu den starken Änderungen stehen, welche sich durch Berücksichtigung der Klimaszenarien ergeben. Die Ergebnisse der Arbeiten wurden an das Wasserbedarfs- und Wassermanagementsystem WEAP übergeben und in einem grenzüberschreitenden Dialog von Fachleuten und Entscheidern aus der Region diskutiert. Der Beitrag wird auf diese Aspekte ebenfalls eingehen.

# Modellierung von Durchflussverlusten in Flüssen trockener Landschaften

Alexandre Cunha-Costa<sup>1,2</sup> und Axel Bronstert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie, Universität Potsdam, Deutschland

<sup>2</sup> Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza, Ceará, Brasilien

## Zusammenfassung

Die Bewirtschaftung von Wasserressourcen in den Trockenregionen der Erde ist von hoher Wichtigkeit, sieht sich aber auch einer Reihe von besonderen Problemen gegenübergestellt. Dieser Beitrag präsentiert ein einerseits komplexes und andererseits flexibles hydrologisches Modell, welches prozess-basierte Ansätze zur Simulation der hydrologischen Teilprozesse in den Flusslandschaften der Trockenregionen vereint. Durch Anwendungen im trockenen Nordosten Brasiliens und in Arizona/USA konnte die Anwendbarkeit des Modells belegt werden und Aussagen über Parameterunsicherheiten, Modellkomplexitäten und die generelle Prognostizierbarkeit dieser Bedingungen getroffen werden.

## Einleitung

Die Bewirtschaftung von Wasserressourcen in ariden und semiariden Landschaften ist von besonders großer Wichtigkeit, da in diesen Regionen die Ressource Wasser oftmals eine Begrenzung für die wirtschaftliche Entwicklung bedingt und durch Wasserknappheit die Lebensbedingungen der Bevölkerung stark geprägt und der ökologische Zustand determiniert werden. Neben dieser allgemein hohen Relevanz sehen sich in diesen Regionen wasserwirtschaftliche Planung und operationelles Management aber auch mit spezifischen Problemen konfrontiert, wie den Mangel an hydrologischen Daten und die recht geringe Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten zu dieser Thematik.

Von besonderer hydrologischer Relevanz in ariden und semi-ariden Regionen sind die durch Versickerung und Verdunstung hervorgerufenen Durchflussverluste in den dortigen Flüssen. Diese Verluste sind letztlich eine wichtige Ursache dafür, dass diese Flüsse oft nur zeitweise Wasser führen und dass die Durchflussraten flussabwärts abnehmen können. Dieser Beitrag beschreibt die Modellansätze zur Simulation der grundlegenden hydrologischen Prozesse von Trockenflusssystemen und zeigt exemplarisch Anwendungen und Ergebnisse für einen ausgesuchten periodischen Fluss im Nordosten Brasiliens.

## Modellvorstellung

Es wurde ein hydrologisches Simulationsmodell für Durchflussverluste in Trockenflüssen entwickelt. Dieses Modell hat eine flexible, d.h. eine auf verschiedene Prozesse, zugehörige typische räumliche Skalen und Landschaftskomponenten ausgerichtete Modellstruktur, siehe Abbildung 1. Das Modell soll dadurch für unterschiedliche Trockenlandschaften anwendbar sein und Tests zur Relevanz verschiedener hydrologischer Prozesse ermöglichen.

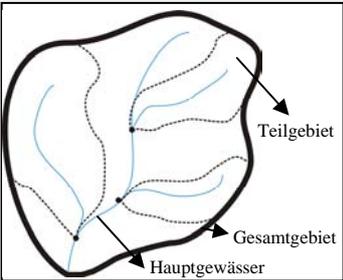
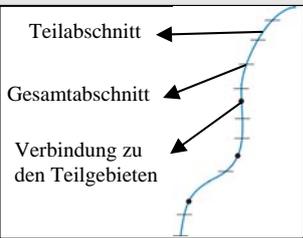
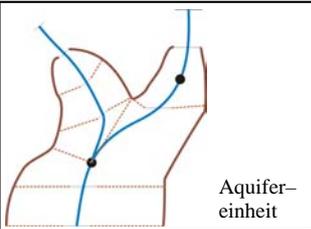
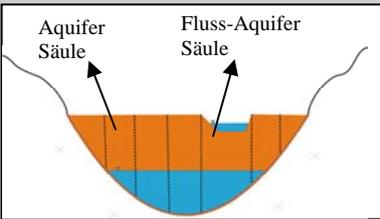
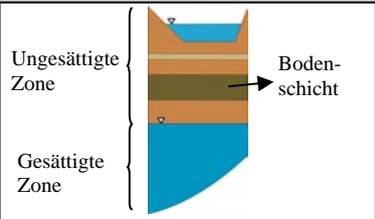
Landschaftskomponente	Zugehöriger Prozesse und räumlicher Bezug	Teilmodell
<p><b>1 Gesamtgebiet:</b></p> 	<p>Abfluss aus den Teilgebieten als Input in das Hauptgewässer</p>	<p>Abflussbildung in den Teilgebieten</p>
<p><b>2 Fluss-System:</b></p> 	 <p>Abfluss im Gewässer</p>	<p>Abfluss-Routing</p>
<p><b>3 Aquifer-System:</b></p> 	 <p>Grundwasserbewegung, parallel zum Fluss in ungespannten Aquiferen, innerhalb der Grenzen der Teilgebiete.</p>	<p>Grundwasserfließmodell</p>
<p><b>4 Aquifereinheit:</b></p> 	 <p>Laterale Fluss-Aquifer-Interaktion, einschließlich Grundwasserrückhalt</p>	<p>Modell zur lateralen Fluss-Aquifer Interaktion</p>
<p><b>5 Fluss-Aquifer Säule:</b></p> 	 <p>Ungesättigte Infiltration in das Flussbett bei variabler Wassertiefe durch geschichtetes Alluvium und nachfolgende vertikale Sickerung</p>	<p>Modelle für die ungesättigte Infiltration in das Flussbett und für die nachfolgende vertikale Verteilung</p>

Abb. 1: Modellstruktur zur Simulation von Durchflussverlusten in Trockenlandschaften, ausgerichtet auf typische Prozesse und Landschaftskomponenten.

Das Modell berücksichtigt nachfolgende Prozesse, deren Wichtigkeit für die Durchflussverluste in Trockenlandschaften durch verschiedene Studien (z.B. Bull & Kirkby, 2002, Dahan et al., 2007, Lange 2005) belegt sind:

- a) Abflussvorgang im Fließgewässer (gewählter Ansatz: semi-empirisches hydrologisches routing);
- b) Ungesättigte Infiltration in ein geschichtetes Alluvium bei variabler Überstauhöhe, d.h. dem Wasserstand des Flusses (gewählter Ansatz: modifizierte Green-&-Ampt-Gleichung);
- c) Vertikaler ungesättigter Wasserfluss unterhalb der Gewässersohle (gewählter Ansatz: ungesättigte Darcy-Gleichung);
- d) Laterale Fluss-Aquifer Interaktion, einschließlich temporärer Grundwasserspeicherung (gewählter Ansatz: gesättigte laterale GW-Interaktion)
- e) Grundwasserfluss, in etwa parallel zum Gewässerverlauf, unter ungespannten Bedingungen (gewählter Ansatz: gesättigter Grundwasserfluss entsprechend des Gradienten in Gewässer-richtung).

### **Exemplarische Anwendungen**

Das Modell wurde für einen ca. 30km langen Abschnitt des Jaguaribe Flusses (Middle Jaguaribe River “MJR”), im Bundesstaat Ceará im Nordost-Brasilien und für einen kleinen Flussabschnitt im „Walnut Gulch Experimental Watershed“ in Arizona/USA angewendet. Im Folgenden werden hauptsächlich Ergebnisse für das brasilianische Gebiet dargestellt. Weitere Details und Ergebnisse sind in Costa (2012) enthalten. Das Einzugsgebiet des Jaguaribe umfasst eine Gesamtfläche von 74 000 km<sup>2</sup>, und die dortigen hydrologischen Bedingungen sind geprägt durch die Abfolge von Regen- und Trockenzeiten, die im Wesentlichen durch die Dynamik der ITZ und in geringerem Maße auch durch Frontensysteme aus dem Südatlantik bedingt sind. Das Einzugsgebiet oberhalb des MJR hat eine Ausdehnung von ungefähr 21 000 km<sup>2</sup> und erhält einen mittleren Jahresniederschlag zwischen 400 mm (im SW) und 800 mm (im NO), wobei fast der gesamte Niederschlag in den Monaten von Dezember bis Mai fällt. Die zeitliche Variabilität des Regens ist hoch, sowohl inter-annuell, als auch zwischen den Jahreszeiten, oder auch der wöchentlichen Skale. Die potentielle Verdunstung („Class-A Pan“) beträgt über 2200 mm yr<sup>-1</sup>.

Der simulierte Abschnitt ist durch ungespannte Grundwasser führende Schichten entlang des Flusslaufes geprägt. (Abb. 2), mit einer mittleren Mächtigkeit des Alluviums von 20 m und Bodenschichten von Feinsand, Grobsand, Kies und Lehm. Während der Trockenzeit und zu Beginn der Regenzeit ist kein Voreignisabfluss beobachtbar, so dass Abflussereignisse hauptsächlich vertikale Infiltration in das Alluvium erzeugen (durch das Gewässerbett, kaum über die Vorländer). Andererseits, in der Mitte und am Ende der Regenzeit, gibt es kontinuierlichen Abfluss, so dass die Wechselwirkungen zwischen Fluss und lateralen Aquiferen von hoher Bedeutung sind.

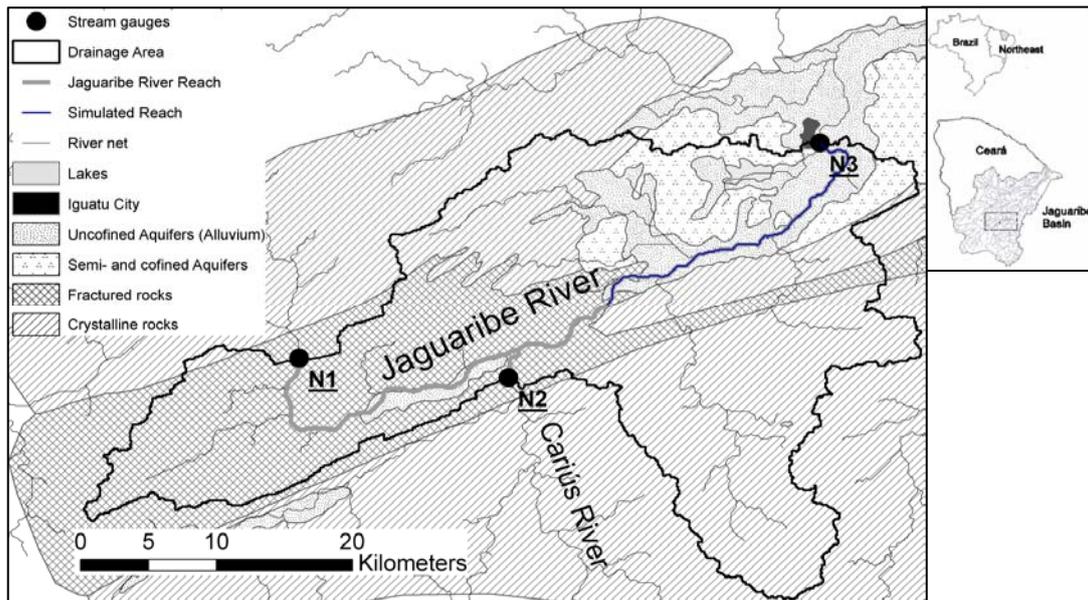


Abb. 2: Abschnitt des *Middle Jaguaribe River* “MJR”, in Ceará, NO-Brasilien. Die hinterlegte hydrogeologische Karte wurde von IBGE (2003) übernommen.

## Ausgesuchte Ergebnisse

*Abschätzung der Durchflussverluste zu verschiedenen Bedingungen bzw. Jahreszeiten unter Beachtung der möglichen, verschiedenen Modellkomplexitäten*

Es wurden Abflussereignisse aus drei Regenzeiten zwischen 2005 bis 2010 (2005, 2009 und 2010) analysiert und simuliert, für die Abflüsse aus dem Direktinzugsgebiet des MJR vernachlässigt werden konnten, so dass die Differenzen zwischen Zustrom und Abstrom in/aus dem Gewässerabschnitt als Durchflussverluste abgenommen werden konnten. Es zeigte sich, dass bei 27 von 40 analysierten Ereignissen der Abfluss innerhalb des Flussabschnittes entweder vollständig versiegte oder zumindest teilweise. Im Mittel betrug die Abflussreduktion dabei 30%.

Durch einen Simulationsvergleich der folgenden Modellvarianten: a) keine Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser („FW“), b) Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser ohne parallelen Grundwasserstrom zum Fluss („FW+LD“) und c) Interaktion zwischen Fluss und Grundwasser mit parallelen Grundwasserstrom zum Fluss („FW+LD+GW“) konnte gezeigt werden, dass für den Abschnitt des Jaguaribe die komplexeste Modellvariante die beste Erklärbarkeit der Messergebnisse liefert und somit die strukturelle Modellunsicherheit reduziert werden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Mittlerer absoluter Fehler (MAE) und mittlere quadr. Abweichung (RMSE) der 3 Modellvarianten „FW“, „FW+LD“ und „FW+LD+GW“ (Erklärung im Text).

Modell-Variante	Abfluss-Volumen		Abfluss-Spitze	
	MAE (%)	RMSE ( $10^6 \text{ m}^3$ )	MAE (%)	RMSE ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )
FW	41	96	20	74
FW+LD	10	31	12	36
FW+LD+GW	4	41	13	67

### *Untersuchung der Parametersensitivität und Parameterunsicherheit*

Durch die Anwendung auf unterschiedliche Einzugsgebiete wurde die Parametersensitivität des Modells unter verschiedenen Bedingungen eingeschätzt. Beim Flussabschnitt des Jaguaribe in Brasilien verursachte etwa eine Variierung von  $\pm 90\%$  der sensitiven Parameter der ungesättigten Zone eine Zu-/ Abnahme des simulierten Abflussvolumens und –spitze von  $\pm 20\%$ . Beim kleinen, episodischen Fluss im ariden Einzugsgebiet in Arizona („WGEW“) verursachte eine Parametervariation im gleichen Größenbereich hingegen eine Zu-/Abnahme des simulierten Abflussvolumens von  $[-100\%; +500\%]$  und der simulierten Abflussspitzen von  $[-100\%; +200\%]$ . Die Ursache für diese sehr unterschiedliche Sensitivität liegt darin, dass beim WGEW das Flusswasser im Falle eines Abflussereignisses nur mit der ungesättigten Zone in Kontakt steht, da sich in diesem Gebiet, welches im Vergleich zur Jaguaribe-Region noch deutlich trockener ist, kein Grundwasserleiter bildet. Das bedeutet, dass der Grad der Aridität eines Flussgebietes auch als Indikator für die Prognostizierbarkeit dieses Gebietes dienen kann, d.h. je arider eine Region ist, desto geringer ist dessen Prognostizierbarkeit hinsichtlich der Abflussbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Durchflussverluste in den episodischen Gewässern.

### **Schlussfolgerung**

Das präsentierte hydrologisch komplexe und strukturell flexible Modell zur Simulation von Durchflussverlusten kann die wichtigsten Prozesse in Trockenlandschaften unter unterschiedlichen Randbedingungen und räumlichen Skalen nachvollziehen und damit das Gesamtsystem prognosefähig beschreiben, wenn auch nicht vorhersagen.

Die Untersuchung unterschiedlicher Modellkomplexitäten für den Middle Jaguaribe Flussabschnitt ergab, dass die relativ komplexeste Modellstruktur die relevanten Prozesse am ehesten wiedergeben kann. Damit kann umgekehrt die strukturelle Modellunsicherheit reduziert werden, was besonders für Gebiete mit wenig hydrologischen Daten von großer Wichtigkeit für die Prognosefähigkeit ist. Für eine prozess-orientierte Prognose von Durchflussmenge und -verlusten im Abschnitt des Jaguaribe hat sich gezeigt, dass die Beachtung von sowohl lateralen Grundwasserinteraktionen (zwischen Fluss und Aquifer) als auch von Strömungen im Aquifer parallel zum Flussverlauf von hoher Relevanz sein können, wobei ersteres von größerer Wichtigkeit ist.

Die Analysen der Parametersensitivität lassen schlussfolgern, dass der Grad der Aridität eines Flussgebietes auch als Indikator für die Prognostizierbarkeit des betreffenden Gebietes dienen kann, d.h. je arider eine Region ist, desto geringer ist dessen Prognostizierbarkeit hinsichtlich der Abflussbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Durchflussverluste in den episodischen Gewässern. Dies ist darin begründet, dass für Systeme, in denen vor allem die ungesättigte Infiltration in das Flussbett die hydrologische Dynamik steuert (etwa Abb. 3a auf der folgenden Seite), die wichtigsten Parameter (ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit) hochvariabel und hochsensitiv sind. Zudem bestehen unter diesen Bedingungen keine Ausgleichmechanismen, wie es umgekehrt der Fall ist, wenn der Fluss in direkter Wechselwirkung mit einem alluvialen Grundwasser entlang des Flusses steht (Abbildung 3c und 3d).

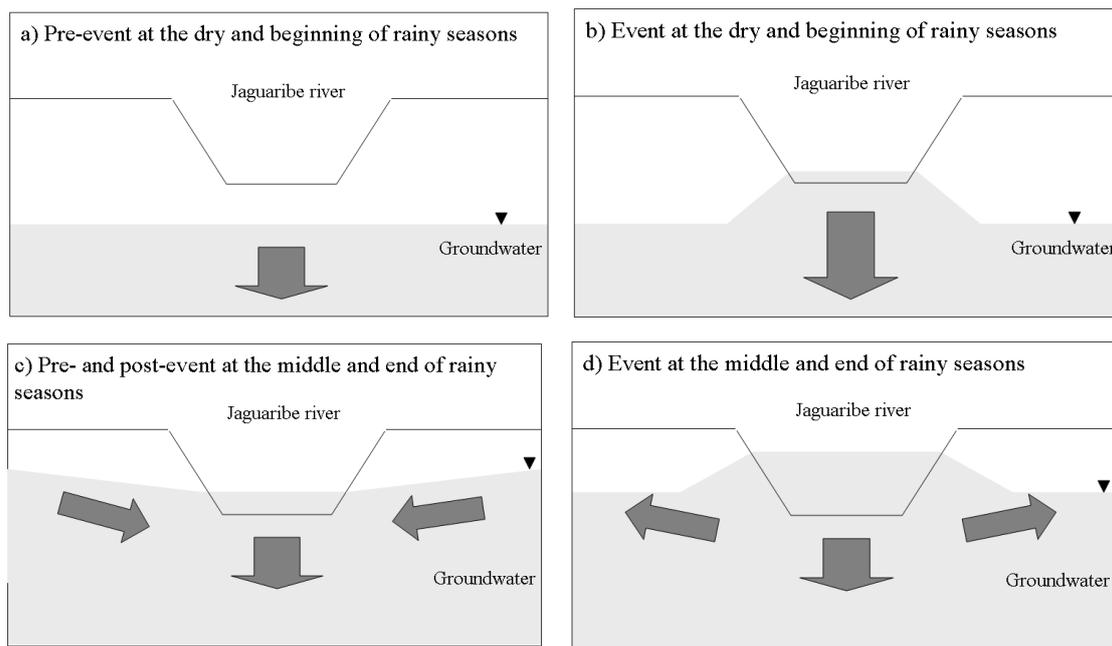


Abbildung 3: Konzept unterschiedlicher hydrologischer Prozesse, zu verschiedenen Jahreszeiten, im Zusammenhang mit Durchflussverlusten am Beispiel des MJR, NO-Brasilien (aus Costa et al., 2012)

## Literatur

- Bull, L.J., and Kirkby, M.J. (2002): Dryland river characteristics and concepts, in: *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*, ed. by: Bull, L.J., & Kirkby, M.J., Wiley Chichester, UK.
- Costa, A.C., Förster, S., De Araújo, J.C., and Bronstert, A. (2012): Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in northeastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data, *Hydrol. Process.*, DOI: 10.1002/hyp.9243.
- Costa, A.C. (2012): Analyzing and modelling of flow transmission processes in river-systems with a focus on semi-arid conditions. Dissertation, Universität Potsdam, 99pp.
- Dahan, O., Shani, Y., Enzel, Y., Yechieli, Y., and Yakirevich, A. (2007): Direct measurements of floodwater infiltration into shallow alluvial aquifers. *J. Hydrol.*, 344, 157–170.
- Goodrich, D.C., Williams, D.G, Unkrich, C.L., Hogan, J.F., Scott, R.L., Hultine, K.R., Pool, D., Coes, A.L., Miller, S. (2004): Comparison of methods to estimate ephemeral channel recharge, Walnut Gulch, San Pedro River, in: *Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States. Water Science and Application 9*, ed. by: Hogan, J.F., Phillips, F.M. & Scanlon, B., AGU, Washington, 294 pp.
- IBGE -Brazilian Institute of Geography and Statistics- (2003): Hydrogeological Map of Iguatu Micro-region (SB24YB). [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default\\_prod.shtm#HIDROGEO](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#HIDROGEO).
- Lange, J. (2005): Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel. *J. Hydrol.*, 306, 112–126.

# Statistisches Downscaling von CLM-Niederschlagsdaten mit einer Analogmethode unter Verwendung von Radardaten des DWD-Radars Essen

Alrun Tessendorf<sup>1</sup>, Thomas Einfalt<sup>1</sup> und Markus Quirmbach<sup>2</sup>

<sup>1</sup> hydro & meteo GmbH & Co. KG, Lübeck, Deutschland

<sup>2</sup> dr. papadakis GmbH, Hattingen, Deutschland

## Zusammenfassung

Um Ergebnisse aus globalen und regionalen Klimamodellen für hydrologische Modellierungen verwenden zu können, müssen sowohl räumliche als auch zeitliche Skalenunterschiede überbrückt werden. Im Rahmen des BMBF-Projekts dynamik wurde ein statistisches Downscalingverfahren entwickelt, das ausgehend von Niederschlagsdaten des Regionalmodells CLM (2 Läufe, Szenario A1B) fein aufgelöste Niederschlagsdaten erzeugt. Das Verfahren basiert auf der Analogmethode mit den Prädiktoren Niederschlag (Tagessummen auf CLM-Gitterpunkten) und objektive Wetterlagenklassen (DWD). Analoge Tage aus dem Zeitraum 2001-2009 werden mithilfe von korrigierten und angeeichten Radardaten des DWD-Radars Essen und DWD-Messungen der objektiven Wetterlagenklassen ermittelt. Die Radardaten werden verwendet, um hoch aufgelöste Niederschlagsdaten (1km<sup>2</sup>, Zeitschritt 5 Min.) mit natürlichen räumlichen und zeitlichen Korrelationen zu erzeugen. Für drei Einzugsgebiete in Nordrhein-Westfalen wurden für den Referenzzeitraum (1961-1990) sowie die nahe und ferne Zukunft (2021-2050, 2071-2100) Datensätze erstellt, die jeweils die 300 Niederschlagsereignisse mit den höchsten 4h-Summen enthalten. Die Ergebnisse im Referenzzeitraum werden bzgl. ihrer Starkniederschlagsstatistik untersucht und mit fehlerbereinigten Stationsdaten verglichen. Außerdem werden die Trends in der Dauerstufe 1h, Wiederkehrzeit 5 Jahre untersucht und die Unsicherheiten diskutiert.

## Einleitung

Um hydrologische Modelle für die Auswertung von Klimaprojektionen, die von globalen oder regionalen Klimamodellen stammen, nutzen zu können, müssen räumliche und zeitliche Skalenunterschiede überbrückt werden. Dafür werden dynamische oder statistische Downscalingverfahren verwendet. Mit statistischen Verfahren können Daten mit sehr hoher Auflösung erzeugt werden. Diese nutzen statistische Beziehungen zwischen verschiedenen Skalen, die von Beobachtungen abgeleitet werden.

Für kleinräumige hydrologische Gebietsmodelle und Kanalnetzmodelle werden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Niederschlagsdaten benötigt. Das liegt an der Kleinräumigkeit der hydrologischen Prozesse und ihrer teilweise sehr kurzen Reaktionszeit. Als Eingangsdaten eignen sich radarbasierte Messungen des Niederschlags (Einfalt et. al., 2004).

Vor diesem Hintergrund wurde ein statistisches Downscalingverfahren entwickelt, das angeeichte Radardaten verwendet. Dieses wird im Folgenden vorgestellt. Ein zentraler Punkt war, dass die Ergebnisse des Verfahrens wichtigen Kriterien aus der Hydrologie genügen, insbesondere sollen konsistente Extremwertstatistiken erzeugt werden und Massenbilanzen realistisch dargestellt werden.

## Datenbasis und Untersuchungsgebiet

Für das Downscaling-Verfahren wurden korrigierte und angeeichte Daten des DWD-Radar Essen (1km x 1°, 5 Min., DX-Produkt) vom 01.11.2001–01.11.2009 verwendet. Die Daten wurden von der hydro & meteo GmbH & Co. KG für die Emschergenossenschaft für das Projekt „DX-Offline“ erstellt und von dieser zur Verfügung gestellt. Die Aneichung wurde auf Basis von 580 geprüften Regenschreibern - davon 117 zur Validierung - durchgeführt. Weiterhin wurden Messungen des DWD der objektiven Wetterlagenklassen (DWD) von 2001-2009 mit täglichen Werten aus 40 objektiven Wetterlagenklassen (oWLK) verwendet.

Die Daten aus dem Regionalmodell CLM wurden vom Climate Service Center (CSC) bereitgestellt: Lauf1 und Lauf2 für 1961-2000 („C20“) und 2001-2100 (Szenario A1B). Verwendet wurden die Tagessummen des Niederschlags für das Untersuchungsgebiet sowie die objektiven Wetterlagenklassen, beruhend auf Auswertungen von Krahé et al. (2011).

Das Untersuchungsgebiet für das Downscaling besteht aus 10 CLM-Gitterpunkten und wurde auf Grund von ähnlichen Niederschlagscharakteristiken und ähnlichen orographischen Begebenheiten ausgewählt. Zu drei Einzugsgebieten bei Dortmund, Duisburg und Bönen (70-76 km<sup>2</sup> Fläche) wurden für den Referenzzeitraum (1961-90), nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2071-2100) Datensätze erstellt. Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 1 dargestellt.

Kleinräumige orographische Besonderheiten wurden im Downscaling-Verfahren nicht berücksichtigt, so dass sich die Ergebnisse nicht als spezielle lokale Ergebnisse für die betrachteten Einzugsgebiete interpretieren lassen.

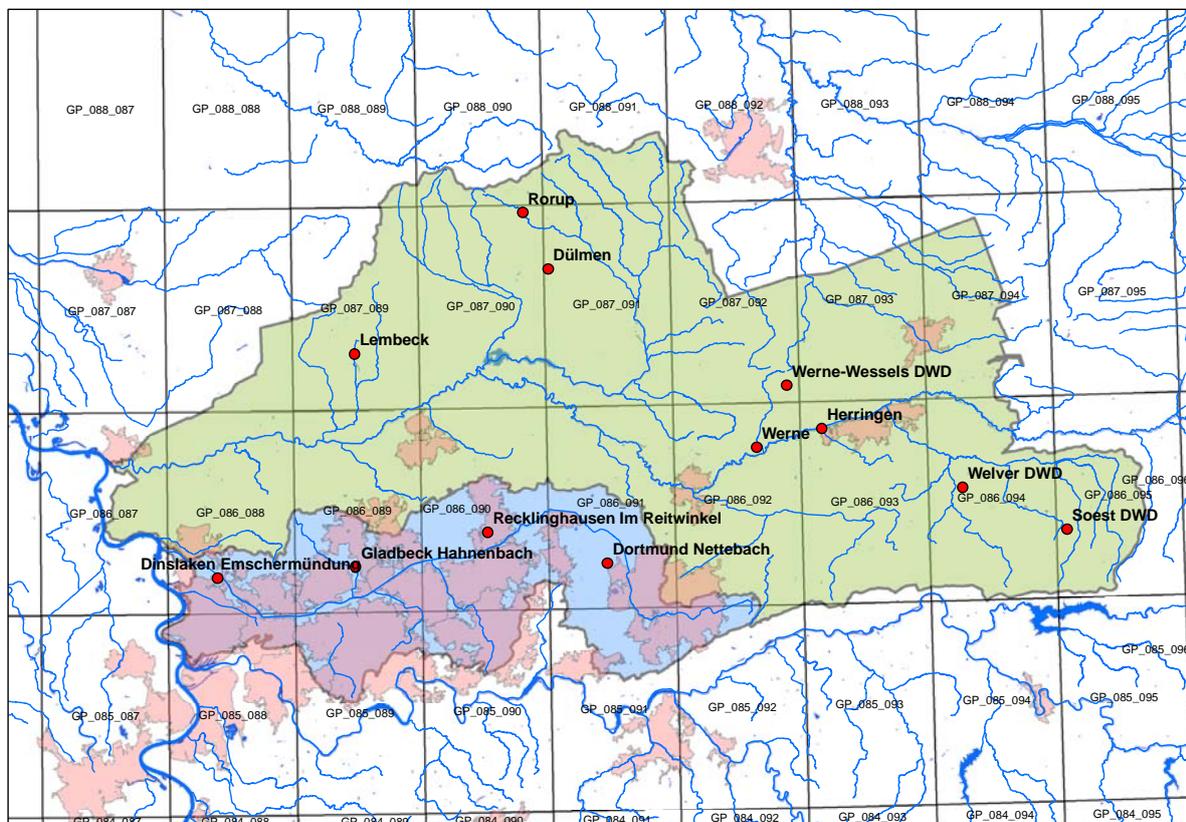


Abb. 1: Untersuchungsgebiet in der Emscher-Lippe Region mit dem CLM-Raster.

## Methoden

Das angewandte Downscaling-Verfahren ist ein statistisches Verfahren: statistische Beziehungen zwischen verschiedenen Skalen werden aus Beobachtungen abgeleitet, um aus den grob aufgelösten Modelldaten Informationen auf kleineren Skalen zu erhalten. Für die vorliegende Anwendung wurde die Analogmethode (Zorita und Storch, 1999) mit einem Wetterlagenansatz kombiniert. Abbildung 2 gibt einen schematischen Überblick über das Verfahren.

Mithilfe von Radardaten und den auf Messungen beruhenden oWLK wurden analoge Tage aus dem Zeitraum 2001-2009 ermittelt. Um die 24h-Summen auf den Gitterpunkten aus dem CLM-Modell mit Radarmessungen auf dem Gebiet vergleichen zu können, wurden die CLM-Tagessummen Bias-korrigiert. Die Bias-Korrektur erfolgte nach Piani et al. (2010), unter Verwendung der verfügbaren Messdaten aus Radar von 2001-2009 (Gebietsmittel über CLM-Gitterpunkte) und CLM-Daten aus beiden Läufen über den drei Mal so langen Zeitraum von 1994-2018.

Da die Modellwerte an einzelnen Gitterpunkten nicht so aussagekräftig sind wie Mittel über mehrere Gitterpunkte, wurden die Tagessummen über 10 Gitterpunkte im Untersuchungsgebiet gemittelt. Die Mittelung erfolgte über die kumulierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, wobei der räumliche Downscaling-Faktor erhalten bleibt.

Die Zuordnung der analogen Tage erfolgte über einen stufenweisen Auswahlprozess: Zu einem CLM-Tag werden ähnliche Tage im Messzeitraum gesucht, Kriterien dafür sind: die gleiche oWLK und eine ähnliche Niederschlagsmenge (24h-Summe innerhalb eines schmalen Wahrscheinlichkeitsintervalls um den vorgegebenen Wert). Aus den historischen Ereignissen, auf die die Kriterien zutreffen, wird zufällig ein Ereignis gezogen. Wenn keine passenden Ereignisse gefunden werden, wird das Intervall schrittweise vergrößert und die benachbarten objektiven Wetterlagenklassen mit einbezogen.

Um die Datenbasis zu vergrößern, wurde eine Verschiebung der Radardaten innerhalb der 10 Gitterpunkte des Untersuchungsgebiets ermöglicht.

Der Auswahlprozess wurde jeweils für 30 Jahre durchgeführt. Die Zuordnungen wurden geprüft auf:

- Häufigkeit der Verwendung eines Radarereignisses (max. 3 Mal pro 30 Jahre-Zeitraum)
- Auftreten des „selection effect“ (vgl. YOUNG, 1994). Dieser entsteht durch enge Vorgaben im Auswahlprozess und führt zu einer zu seltenen Auswahl bestimmter Ereignisse, insbesondere ist die Auswahl von Extremereignissen betroffen.
- Abweichung der 24h-Summe eines Ereignisses größer als 4mm

Bei 2-4 Ereignissen pro Auswahlzeitraum traten Abweichungen über 4mm auf. In diesen Fällen wurde das zugeordnete Radarereignis mit einem konstanten Faktor verändert, um die Tagessumme aus dem Modellereignis zu erreichen.

Aus jedem der 30-Jahre-Zeiträume wurden die höchsten 300 Ereignisse ausgewählt, basierend auf den höchsten 4h-Summen im jeweiligen Einzugsgebiet. Ausgehend von den Radardaten wurden zu diesen Ereignissen mit der Software SCOUT (hydro & meteo, 2009) Zeitreihen im Einzugsgebiet erzeugt (für jedes 1km<sup>2</sup>-Feld, Zeitschritt 5 Min.) und nach AquaZIS (aqua\_plan, 2011) importiert.

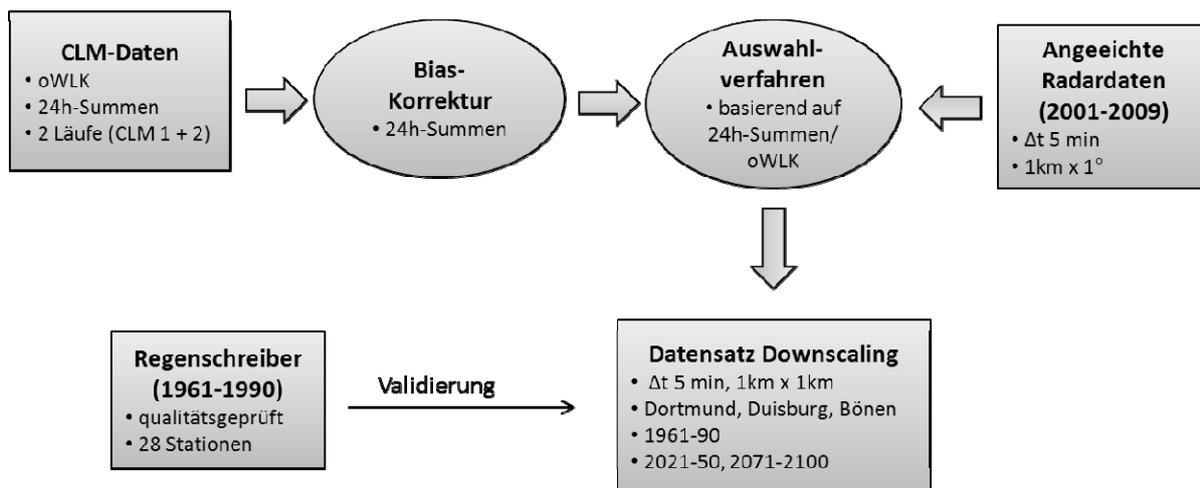


Abb. 2: Schematische Darstellung des Downscaling-Verfahrens

## Ergebnisse

Mit den hochaufgelösten Niederschlagsdaten wurden extremwertstatistische Auswertungen der Starkniederschläge im Referenzzeitraum, der nahen und der fernen Zukunft durchgeführt. Zu jedem dritten  $1\text{km}^2$  - Feld in einem Einzugsgebiet wurde mit Aquazis die Starkniederschlagsstatistik nach Wiederkehrzeit und Dauer (DVWK, 1985) erstellt und anschließend über das Gebiet gemittelt. Die Ergebnisse im Referenzzeitraum für die Dauerstufe 1h, Wiederkehrzeit 5a sind in Abbildung 3 dargestellt. Dazu ist das Ergebnis von 28 korrigierten Stationen im Untersuchungsgebiet über den gleichen Zeitraum eingezeichnet. Die Ergebnisse des Downscaling-Verfahrens sind etwas niedriger als die Werte aus den Stationsdaten. Die Abweichung ist dabei nicht groß im Vergleich zum Spannungsbereich der Beobachtungen in dem Gebiet.

Für die nahe und ferne Zukunft (Abbildung 4) ergeben sich größtenteils positive Trends, deren Höhe je nach Lauf und Zeitraum variiert. Die Ergebnisse auf Grundlage von CLM 1 zeigen sowohl für die

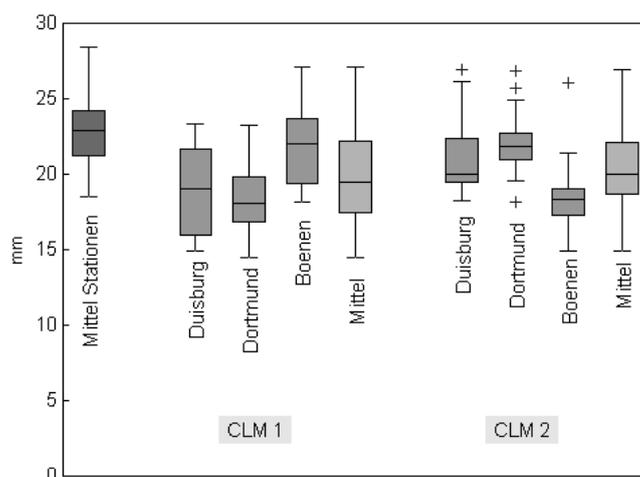


Abb. 3: Ergebnisse der Starkniederschlagsauswertung für Dauerstufe 1h, Wiederkehrzeit 5a im Zeitraum 1961-1990. Dargestellt sind die Ergebnisse des Downscalingverfahrens innerhalb der 3 Einzugsgebiete für CLM 1 und CLM 2 sowie das Ergebnis von 28 Stationen im Untersuchungsgebiet.

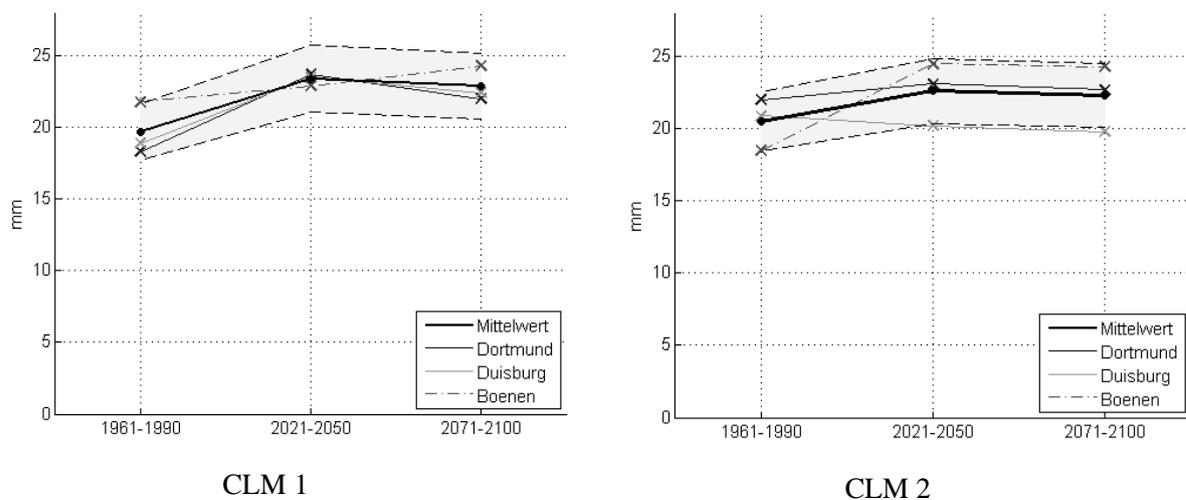


Abb. 4: Ergebnisse des Downscaling: Starkniederschlagsauswertung mit Wiederkehrzeit 5a, Dauerstufe 1h für Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft. Eingezeichnet sind die Ergebnisse der drei Gebiete Dortmund (schwarz), Duisburg (hellgrau) und Bönen (gestrichelt) sowie das Gebietsmittel (dicke Linie). Der hellgraue Bereich gibt den Unsicherheitsbereich nach KOSTRA ( $\pm 10\%$ ) an.

nahe als auch die ferne Zukunft im Vergleich zum Referenzzeitraum signifikant positive Trends (Signifikanzniveau 90%). Die Trends auf Basis von CLM 2 sind ebenfalls im Mittel positiv, aber weniger signifikant. Die mittleren Zunahmen für Stundensummen mit einer Wiederkehrhäufigkeit von 5 Jahren betragen für die nahe Zukunft 18,8% (CLM 1) bzw. 16,4% (CLM 2) und für die ferne Zukunft 16,4% (CLM 1) bzw. 8,8% (CLM 2).

### Schlussfolgerung

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass sich mit dem beschriebenen Downscaling-Verfahren räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten erzeugen lassen, die als Eingangsdaten für kleinräumige hydrologische Modelle und Kanalnetzmodelle geeignet sind. Dafür werden angeeichte Radardaten in guter Qualität benötigt. Die Unsicherheiten aus dem regionalen Klimamodell bleiben während des Downscaling Prozesses erhalten, beim Übergang auf die feineren Skalen wird ein zusätzlicher Unsicherheitsbereich aufgespannt. Ein Teil dieser Unsicherheit kommt durch natürliche Variabilität zustande. Ein wichtiger Unsicherheitsfaktor innerhalb des Downscaling-Verfahrens ist die Bias-Korrektur der Tagessummen, die sich sowohl auf die Absolutwerte als auch die Trends auswirkt. Mit einer größeren Datenbasis an räumlich aufgelösten Messdaten ließe sich eine verlässlichere Bias-Korrektur durchführen. Um Tendaussagen zum Niederschlag mit einer größeren Repräsentativität zu erhalten und die Unsicherheiten besser abschätzen zu können, wäre eine Ensembleauswertung nötig. Eine solche ist im vorliegenden Fall sehr aufwendig, da eine größere Anzahl an Modellläufen aus verschiedenen Klimamodellen mit mehreren Realisierungen des Downscaling kombiniert werden muss.

## Literatur

- aqua\_plan (2011): AquaZIS – Zeitreiheninformationssystem für die Wasserwirtschaft, Dokumentation, aqua\_plan Ing.-Ges. für Problemlösungen in Hydrologie und Umweltschutz mbH, Aachen
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1985): Niederschlag- Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer, DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft 124/1985
- DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000), Grundlagenbericht. Offenbach am Main.
- hydro & meteo (2009): The SCOUT Documentation version 3.30. Lübeck, 69 Seiten
- Krahé, P., E. Nilson, U. Gelhardt und J. Lang (2011): Auswertungen ausgewählter globaler Klimamodelle hinsichtlich atmosphärischer Zirkulationsbedingungen im Nordatlantisch-Mitteuropäischen Sektor. BfG-Bericht 1682.
- Piani, C., J.O. Haerter und E. Coppala (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 99, 187-192.
- Young, K. (1994): A multivariate chain model for simulating climatic parameters from daily data, *J. Appl. Meteorol.*, 33(6), 661-671.
- Zorita, E. und H. von Storch,(1999): The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods, *J. Clim.*, 12, 2474-2489.

# **Hydrologisch relevante Rasterdatensätze (HYRAS) für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe**

Monika Rauthe, Heiko Steiner, Ulf Riediger, Alex Mazurkiewicz und Annegret Gratzki

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt (Laufzeit: 2009 bis 2013) – werden innerhalb des Vorhabens 1, „Validierung und Bewertung der Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Wirkungsbereich Schifffahrt und Wasserstraßen“ hydrologisch relevante Rasterdaten erstellt.

In diesem Beitrag werden kurz die Methoden zur Erstellung der DWD/BfG HYRAS-Datensätze für Niederschlag und Temperatur erläutert. Es zeigt sich, dass die Datensätze, die für den Zeitraum 1951-2006 mit einer räumlichen Auflösung von 1 bzw. 5 km<sup>2</sup> von hoher Qualität sind. Bei der Temperatur ist eine gute Übereinstimmung mit den Stationsdaten zu finden. Für den Niederschlag zeigen sich in der Kreuzvalidierung räumlich und jahreszeitlich differenzierte Fehler, die in einer akzeptablen Größenordnung liegen. Erste statistisch-klimatologische Auswertungen ergeben eine Zunahme von Niederschlägen im Winter und eine Zunahme von Trockenperioden im Sommer.

In Zukunft werden weitere Auswertungen der vorliegenden Datensätze, sowie eine Konsolidierung der Datensätze für relative Feuchte und Globalstrahlung erfolgen. Des Weiteren wird die Machbarkeit der Erstellung eines Rasterdatensatzes für Wind geprüft. Im Rahmen des Projektes KLIWAS werden die DWD/BfG HYRAS-Datensätze zur Validierung und Biaskorrektur von Klimamodellen und in der Impaktmodellierung benutzt, sowie weiter in Hinblick auf hydrologische Fragestellungen ausgewertet.

## **Einleitung**

Das Forschungsvorhaben KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – wurde 2009 gestartet, um für Wasserstraßen und Schifffahrt die Folgen des Klimawandels abzuschätzen und entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln. Das Vorhaben wird von den vier Fachbehörden des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), durchgeführt. Belastbare Aussagen über das Ausmaß der zu erwartenden Klimaveränderungen und die erforderlichen Vulnerabilitätsanalysen sind jedoch nur vor dem Hintergrund klar definierter Referenzzustände möglich. Zu ihrer Beschreibung sind weit zurückreichende Aufzeichnungen von Beobachtungen des Wetters bzw. von Messreihen der relevanten Klimaelemente notwendig. Für die Ableitung weiterer im Wasserbereich wichtiger Daten wie Verdunstung und Bodenfeuchte müssen neben dem Niederschlag zusätzliche Parameter wie Temperatur, Wind, Globalstrahlung und Feuchte betrachtet werden. Das Ziel ist die Erzeugung von hydroklimatologischen Rasterdaten auf täglicher Basis mit einer hohen räumlichen

Auflösung von 1 bzw. 5 km<sup>2</sup>, die für die Validierung und Bewertung regionaler Klimamodellierung und zur Impaktmodellierung geeignet sind. Das Untersuchungsgebiet umfasst das Bundesgebiet und die angrenzenden Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe, der Untersuchungszeitraum liegt zwischen 1951 und 2006. Diese Daten des Projekts KLIWAS stellen einen einzigartigen Datensatz dar, da bisherige Rasterdaten nicht in dieser räumliche und/oder zeitlichen Auflösung vorliegen (z.B. Frei und Schär, 1998; Schwarb, 2000; Haylock et al. 2008).

Im Folgenden soll kurz der Status der Entwicklung dieser Rasterdatensätze aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt wird dabei auf Niederschlag und Temperatur liegen. Auch wird die Güte der vorliegenden Felder aufgezeigt. Zusätzlich werden erste statistisch-klimatologische Auswertungen von Kenngrößen auf Flusseinzugsgebieten präsentiert. Dabei werden mittlere Größen wie Gebietsniederschläge, aber auch Andauern von Trockenperioden oder Häufigkeiten von Überschreitungsschwellen betrachtet. Dies beinhaltet zum einen die Darstellung der allgemeinen Charakteristika zum anderen aber auch die Trendentwicklung.

### **Methode zur Erstellung der Rasterdatensätze**

Für die großen Einzugsgebiete Deutschlands besteht ein dichtes Netz aus ca. 6000 Niederschlagsstationen, 1000 für die Temperatur, 800 für die relative Feuchte, 130 für die Globalstrahlung sowie 300 für die Sonnenscheindauer und 700 für den Wind. Diese Daten werden mit Hilfe von verschiedenen Verfahren auf ein regelmäßiges Raster mit 1 bzw. 5 km<sup>2</sup> gebracht. In den folgenden beiden Abschnitten werden die Methoden zur Berechnung der Rasterdatensätze (DWD/BFG-HYRAS-Datensätze) für Niederschlag und Temperatur kurz erläutert.

Die Berechnung der DWD/BFG-HYRAS Niederschlagsdaten beruht auf dem schon lange Zeit im DWD angewandten Verfahren REGNIE - Regionalisierung der NIEderschlagshöhen. Dieses Verfahren besteht aus zwei Hauptschritten:

- Berechnung der Hintergrundfelder: Regionalisierung mittlerer Monatswerte (1961-1990) von qualitätsgeprüften Niederschlagsreihen aus einer multiplen linearen Regression (Länge, Breite, Höhe, Expositionsrichtung und -betrag) und den mittels Inverser-Distanz-Wichtung (IDW) interpolierten Residuen.
- Berechnung der Tagesfelder: räumliche Interpolation durch Inverse-Distanz-Wichtung (IDW) der mit dem Hintergrundfeld normierten Tageswerte (Anomaliemethode)

Es hat sich bei früheren Studien herausgestellt, dass die Anomalienmethode besserer Ergebnisse der räumlichen Verteilung des Niederschlags ergibt als die direkte Interpolation der Niederschlagswerte (z.B. Haylock et al. 2008). Dies gilt vor allem über stark reliefiertem Gelände. Des Weiteren ist anzumerken, dass das Verfahren die Stationsdaten im Rasterfeld erhält.

Die Regionalisierung der Temperatur beruht auf einem Universal Kriging Verfahren, dabei werden die folgenden zwei Schritte durchlaufen:

- Schätzung des lokalen Trends per multipler linearer Regression (Länge, Breite, Höhe)
- Lokale räumliche Interpolation des Residuums unter Berücksichtigung der räumlichen Struktur der Daten und der Stationsabstände untereinander über eine Korrelationsfunktion

Die Universal Kriging Methode wurde auch schon für die Größen relative Feuchte und Globalstrahlung angewendet.

### Validierung der Rasterdatensätze

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt war die Validierung der Datensätze mit Hilfe anderer internationaler Referenzdatensätze (z.B. Frei und Schär, 1998; Schwarb, 2000; Haylock et al. 2008). Aber auch andere Prüfverfahren (wie z.B. Kreuzvalidierung, Jack-Knifing) werden eingesetzt um Fehlerbreiten abzuschätzen. Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Prüfverfahren erläutert.

Die Kreuzvalidierung basiert darauf, ein Element oder auch mehrere Elemente gleichzeitig aus der Stichprobe zu entfernen und den Unterschied zwischen Modellwert vor Entfernung und nach Entfernung zu vergleichen oder aber auch den Modellwert mit dem entfernten Element aus der Stichprobe zu vergleichen. In unserem Fall wurden fünf Mal 20% der Stationsdaten entfernt und die Felder jeweils neu berechnet. In Abbildung 1 ist der mittlere absolute Fehler im Jahresverlauf dargestellt. Es wurde der Zeitraum 1993-1995 ausgewertet. Es zeigt sich deutlich ein Jahresgang mit etwa doppelt so großen Fehlern im Sommer im Vergleich zum Winter. Dies hat wohl zwei Ursachen: Zum einen ist der Niederschlag im Sommer generell größer, was direkt größere Fehler bedingt. Zum anderen sind die Niederschlagsmuster im Winter großflächiger, was den Rasterdatensatz gegen die Herausnahme von einzelnen Stationen unempfindlicher macht.

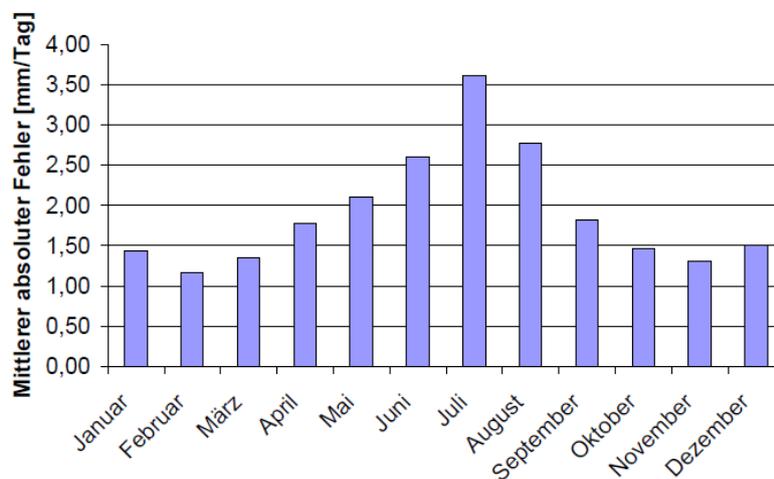


Abb. 1: Exemplarisches Ergebnis der Kreuzvalidierung der DWD/BfG-HYRAS-Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1993-1995. Dargestellt ist der mittlere absolute Fehler in mm/Tag in Abhängigkeit vom Monat.

Weitere Analysen der Kreuzvalidierungsergebnisse haben gezeigt, dass die berechneten Fehlermaße regional stark schwanken. Dies muss bei der weiteren Benutzung der Datensätze berücksichtigt werden. Es ist anzunehmen, dass die Ursachen hierfür zum einen in den regional unterschiedlichen niederschlagsauslösenden Mechanismen liegt und zum anderen in der generellen Niederschlagsverteilung. Des Weiteren spielt wahrscheinlich auch die unterschiedliche Dichte des Messnetzes in den verschiedenen Regionen eine Rolle.

Erste Analysen der DWD/BfG-HYRAS-Temperaturdaten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Stationsdaten (nicht gezeigt). Der größte Teil der Unterschiede kann auf den Unterschied zwischen Geländehöhe im Rasterdatensatz (mittlere Höhe des Rasters) und tatsächlicher Stationshöhe zurückgeführt werden.

### Auswertung hydrologischer Kenngrößen

Um eine Anwendung der Rasterdatensätze aufzuzeigen, werden einige hydrologische Kenngrößen im Folgenden näher diskutiert. Dazu wurden die Niederschlagsdaten näher untersucht (Mazurkiewicz, 2010). Dabei hat sich herausgestellt, dass die rezenten Veränderungen der Niederschlagsmengen über den Zeitraum von 1951 bis 2006 für die Jahreszeiten einen unterschiedlichen Trend zeigen. Während im Winterhalbjahr die mittleren Niederschlagsmengen deutlich zunahmen, kam es im Sommerhalbjahr zu einer leichten Abnahme (nicht gezeigt). Am stärksten sind die winterlichen Trends in Nordwestdeutschland mit bis zu 32 %. Übrige Landesteile sind durch moderate Zunahmen von 8 bis 20 % gekennzeichnet. Im Sommer ist das Bild nicht so eindeutig. Häufig sind negative Trends mit schwacher Signifikanz zu erkennen. In Ostdeutschland ist es im Mittel zu Abnahmen der Niederschlagsmengen von 12 % gekommen. Die Anzahl der Trockentage (nicht gezeigt) nahm speziell in den Sommermonaten um bis zu 5 bis 20 % zu. Eine leichte Abnahme der Trockentage ist im Winter festzustellen (mit bis zu 10 % in Süddeutschland).

#### Anzahl der Tage mit > 20 mm Niederschlag

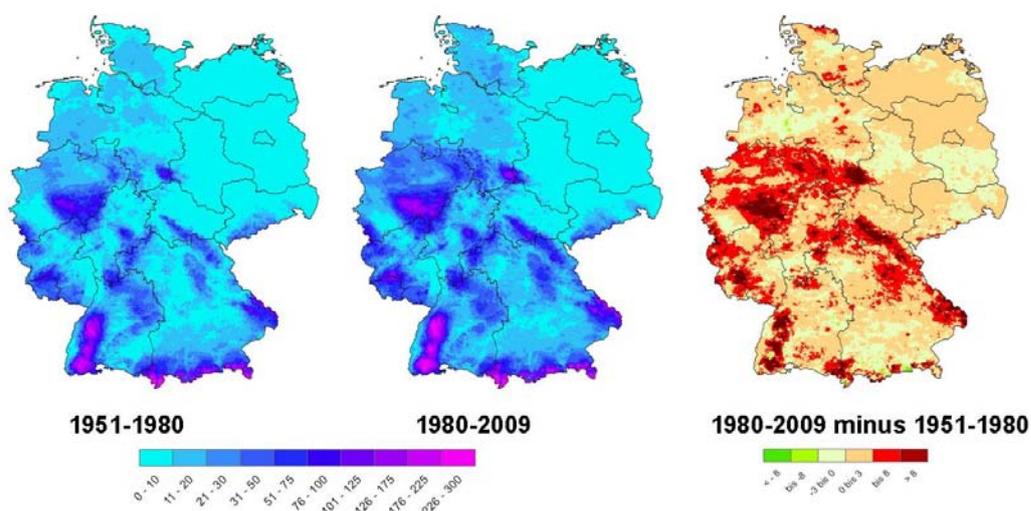


Abb. 3: Anzahl der Tage im Winter mit mehr als 20 mm Niederschlag für zwei Zeiträume (1951-1980, links und 1980-2009 Mitte), sowie die Differenz der beiden (rechts). Datengrundlage bilden die REGNIE-Daten des DWD (DWD, 2011).

In Deutschland sind Starkregenereignisse selten und schwer zu erfassen, da sie räumlich und zeitlich sehr variabel auftreten können. Beim Vorkommen von Starkregenereignissen von über 20 mm/Tag bestehen große Unterschiede zwischen Sommer und Winter aufgrund verschieden wirkender, atmosphärischer Prozesse der Niederschlagsbildung (z.B. kleinräumige Konvektionsniederschläge oder flächenhafte, frontale Niederschläge). Im Winter spielt die orographische Geländehöhe eine enorme Rolle für die Bildung hoher Tagesniederschläge. Die sehr hohe dekadische Variabilität macht es schwer ein Trendverhalten zu bestimmen, jedoch kam es im Mittelgebirgsraum und im Alpenvorland

in der zweiten Hälfte des Zeitraumes (1980-2009) etwas häufiger zu solchen Ereignissen (vgl. Abb. 3). Im Sommer sind Starkregenereignisse nicht so selten wie im Winter (nicht gezeigt), sind aber durch eine sehr hohe räumliche Variabilität geprägt. Die Trends sind nur schwach ausgeprägt und meist nicht signifikant.

## **Danksagung**

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des KLIWAS-Forschungsprogramm des BMVBS und finanziert über die Bundesanstalt für Gewässerkunde entstanden. Für die Erstellung der grenzübergreifenden Datensätze wurden von den folgenden Institutionen Daten bereitgestellt: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt; Royal Meteorological Institut, Brüssel; LUX Airport and Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Luxemburg; Météo-France, Toulouse; Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien; Hydrographischer Dienst, Wien; Czech Hydrometeorological Institute, Prag. Wir danken den Datengebern herzlich.

## **Literatur**

- DWD, Abteilung Hydrometeorologie (2011): REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung. Interner Bericht im DWD, Offenbach.
- Frei C. und C. Schär (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatology*, 18, 873-900.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones und M. New (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **113**, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Mazurkiewicz, A. (2010): Climatological and Hydrological Analysis of Precipitation Characteristics in Germany and Central European Catchment Basins. Master thesis, University of Reading.
- Schwarb, M. (2000): The Alpine precipitation climate: Evaluation of a high-resolution analysis scheme using comprehensive rain-gauge data. Dissertation ETH Nr. 13911, 119.

# Mobile Augmented Reality – Neue Möglichkeiten für die Hydrologie

Frank Fuchs-Kittowski<sup>1</sup>, Bernd Pfützner<sup>2</sup> und Stefan Simroth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Umweltinformatik, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, Deutschland

<sup>2</sup> Büro für Angewandte Hydrologie, Berlin, Deutschland

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird dargestellt, wie sich Smartphone-basierte mobile Erweiterte Realität mit hydrologischen Daten bzw. in hydrologischen Anwendungsszenarien einsetzen lässt. Ausgehend von Anwendungsfeldern im Hochwasserschutz wird eine AR-Informationen-Infrastruktur für die Integration und Bereitstellung von hydrologischen Daten für mobile AR-Anwendungen skizziert und diese Daten nutzenden mobilen AR-Anwendungen beschrieben.

## Mobile Smartphone-basierte Erweiterte Realität

Wie zuvor das Internet revolutionieren nun mobile Geräte wie Smartphones den Informationsaustausch und die Kommunikation grundlegend. Sie ermöglichen die Verschmelzung von realer Welt mit digitalen Informationen zu einer „Erweiterten Realität“ für Jedermann. Der Begriff Erweiterte Realität (Augmented Reality, oder kurz AR) bezeichnet die visuelle Ergänzung der optischen menschlichen Wahrnehmung der Realität mit digitalen, kontextabhängigen Informationen in Echtzeit (Azuma, 1997). Einem Benutzer einer AR-Anwendung werden in seinem Sichtfeld zusätzliche, virtuelle Informationen präsentiert, die in fester räumlicher Beziehung mit Objekten der realen Welt stehen. Ein verbreitetes Beispiel sind die Hilfslinien bei Sportübertragungen im Fernsehen, um z.B. beim Fußball die Entfernung zum Tor bei einem Freistoß oder die Position eines Spielers im Abseits anzuzeigen.

Bei der mobilen Augmented Reality (mAR) werden mobile Endgeräte zur Verschmelzung realer und digitaler Welt genutzt, um die gemeinsame Wahrnehmung von realen und digitalen Informationen möglich zu machen (Höllerer et al., 1999). Damit werden die digitalen Informationen in ihren räumlichen Kontext gesetzt sowie die Sicht auf die reale Welt durch digitale Informationen und Objekte angereichert und dabei eine neuartige Wahrnehmung und Erfahrung der Wirklichkeit ermöglicht. Bislang war mobile Erweiterte Realität (mAR) vor allem Grundlagenforschung, denn die Anwendungen stellen hohe Anforderungen an Hardware und Software, was den breiten Einsatz in der Praxis behindert hat. Die Geräte waren komplex, teuer sowie unhandlich (Abb. 1), und es war ein hoher Aufwand für die Entwicklung von Software für die Darstellung der Inhalte auf diesen Geräten erforderlich.



Abb. 1: mAR-System zur Visualisierung von Hochwasserereignissen (Coelho, 2004)

Aufgrund des rasanten Fortschritts in der Entwicklung mobiler Endgeräte verfügen aber seit kurzem Smartphones der neueren Generation über die notwendige Rechenleistung, eine schnelle Internetverbindung sowie die erforderlichen Sensoren (GPS, Kompass, Beschleunigung) und Komponenten (Display, Videokamera), um Erweiterte Realität realisieren zu können. Außerdem sind sie kostengünstig, leicht handhabbar und massenhaft verbreitet. Neben dieser neuen Hardware existiert seit kurzem auch spezielle Software - sog. AR-Browser - (z.B. Layar, Wikitude, Junaio, Argon), die die Darstellung von Informationen kontextbezogen in Echtzeit im Kamerabild des mobilen Geräts (Smartphone etc.) ermöglicht. Dabei kann es sich um ganz unterschiedliche Arten von Informationen handeln, wie Text, 2D- oder 3D-Objekte, Video- und Audiosequenzen. Zudem ist auch das Ergänzen oder Erfassen von Daten durch die Nutzer möglich. Die AR-Browser lassen sich in andere Anwendungen integrieren, sind in der Regel kostenlos sowie auf vielen Smartphones bereits vorinstalliert.

### **Anwendungsfelder im Hochwasserschutz**

Aufgrund dieser einfachen und weit verbreiteten technischen Basis sowie einer Vielzahl potenzieller Anwendungsszenarien für sehr viele Einsatzbereiche – z.B. in Tourismus, Bildung, Unterhaltung, Werbung – wird mAR ein großes wirtschaftliches Potenzial zugesprochen. Anwendungsmöglichkeiten für den Bereich des Hochwasserschutzes sind z.B. die Darstellung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserwarnung, Lehrpfade, die derzeit im Projekt MAGUN entwickelt und erprobt werden (MAGUN, 2012).

### **Hochwassergefahrenkarten**

Einen entscheidenden Beitrag zur Hochwasservorsorge leistet die Informationsvorsorge (Müller 2010), die u. a durch die Umsetzung der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (2007/60 EG, 2007) hergestellt werden soll. Sie sieht die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für Gebiete mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko und darauf aufbauenden Hochwasserrisikomanagementplänen vor. Sie informieren darüber und verdeutlichen, welche Gefahr von Hochwasser grundsätzlich ausgehen kann.

Durch den Einsatz von mAR kann der durch die Hochwassergefahrenkarten gezeigte, virtuelle Wasserspiegel direkt in der Realität sichtbar gemacht werden. Damit wird es möglich, Hochwasserszenarien realitätsnah zu erzeugen und damit die Wahrnehmung und Analyse von Gefahren zu erweitern.

Abbildung 2 zeigt eine mobile Anwendung (app), in der Hochwassergefahrenkarten vor Ort über das mobile Endgerät als Erweiterte Karte bzw. Augmented Map (Reitmayr et al., 2006) – Vogelperspektive - oder als mobile Erweiterte Realität bzw. Augmented Reality - im Kamerabild des Smartphones – dargestellt werden. Dabei kann der Nutzer aus unterschiedlichen Jährlichkeiten des Hochwasserereignisses (HQ10, HQ100, HQExtrem, ...) wählen.



Abb. 2: Hochwassergefahrenkarte in Kartenansicht (links) und in Kameraansicht als AR (rechts)

Solche mobilen Anwendungen dienen der Verbesserung des Informationsstandes und des Bewusstseins der Bevölkerung über die Hochwassergefahren, um individuelle Vorsorge zu fördern:

Ein Hochwasserrisikobewusstsein besteht beim Bürger oft nur während oder bis kurz nach dem Hochwasserereignis. Ohne ständig wiederkehrende Hochwasserereignisse und die Erinnerung an die bestehenden Gefahren, fällt das Risikobewusstsein relativ schnell wieder auf das Niveau vor dem Hochwasser ab (Müller, 2010). Zur Förderung und Bewahrung des Risikobewusstseins dienen zusätzlich zu periodisch durchgeführten Informationsveranstaltungen auch o.g. mAR-Anwendungen.

Informationen zur Hochwasservorsorge kommen direkt vor Ort, im Risikogebiet bei den betroffenen oder interessierten Bürgerinnen und Bürgern an. Ein Bürger soll z.B. darüber informiert werden, ob er sich zurzeit in einem von Hochwasser bedrohten Gebiet befindet bzw. wo potentielle Überschwemmungsgebiete liegen. Außerdem soll er wissen können, wie weit das Wasser im Hochwasserfall fließen kann und ob sein Haus und Grund ausreichend vor Hochwasser geschützt ist. Durch eine solche zielgerichtete Risikokommunikation kann eine Verbesserung der Eigenvorsorge erreicht werden.

### Hochwasserwarnung

Damit die aktuell von einem Hochwasser bedrohten Bürger rechtzeitig Maßnahmen zu ihrem Schutz ergreifen können, müssen sie schnell aktuelle Informationen über den aktuellen und erwarteten Wasserstand bzw. die aktuelle Hochwassergefahr erhalten (Hornemann et al., 2006).

Abbildung 3 zeigt eine app, die aktuelle Hochwassermelde-Pegel aus Brandenburg als Liste, Karte und Erweiterte Realität im mobilen Endgerät darstellt. Jeder Pegel wird durch ein Icon symbolisiert über das eine Detailansicht aktiviert werden kann. In der Detailansicht werden dann zu dem Pegel, seine Bezeichnung, Position, der aktuelle Pegelstand, die Warnstufe sowie weitere aktuelle Informationen angezeigt.



Abb. 3: Hochwassermeldepegel auf Karte (links) und in Kamera als AR (rechts)

Eine solche mobile Anwendung dient der besseren Informationsversorgung, frühzeitigen Warnung und besseren Erreichbarkeit der Bevölkerung. Zusätzlich kann die Bevölkerung durch Hochwasserwarnungen über die aktuelle Hochwassergefahr unterrichtet werden. Solche Warnungen können auch aktiv an die Nutzer übermittelt werden (Push-Notification). So kann die Bevölkerung rechtzeitig etwas zu ihrem Schutz tun (z.B. Türen oder Fenster mit Dammbalken oder Sandsäcken sichern).

### Bewusstseinsaktivierung (Historische Hochwassermarken)

Historische Hochwassermarken dienen dazu, die Wahrnehmung für die bestehende Hochwassergefahr an in der Vergangenheit überfluteten Orten zu stärken und wach zu halten. Sie zeigen Überflutungshöhen von historischen Hochwassern an und erinnern damit an diese vergangenen Überschwemmungen (Petrow et al., 2003).

Abbildung 4 zeigt eine app, mit der historische Hochwassermarken als Liste, Karte und Erweiterte Realität im mobilen Endgerät dargestellt werden. In der Detailansicht werden ein Foto, das Datum des Hochwassers u.a. Informationen dargestellt. Darüber hinaus können von der interessierten Bevölkerung Hochwassermarken selbst erfasst werden. Hierfür besteht die Möglichkeit, ein Foto von der Hochwassermarke zu erstellen und erforderliche Metadaten (z.B. Datum des Hochwassers) zu erfassen.

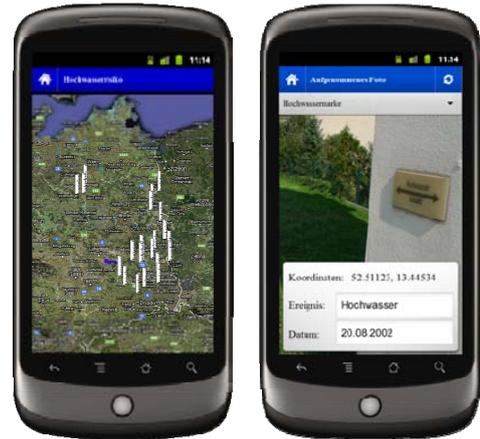


Abb. 4: Erfassung einer historischen Hochwassermarke (links) und Darstellung auf Karte (rechts)

Eine solche mobile Anwendung dient der Involvierung und Aktivierung der Bevölkerung sowie der Steigerung des Bewusstseins der Bevölkerung über die Gefahren und Schadenspotenziale von Hochwassern. Es soll nicht nur die Erinnerung an vergangene Hochwasser-Ereignisse bewahrt werden. Darüber hinaus soll die Bevölkerung auch zu einem kontinuierlichen Engagement für Vorsorge veranlasst werden, in dem sie sich der spezifischen Hochwassergefahren bewusst werden.

### Gewässerinformationen

Informationen über Gewässer lassen sich vor Ort abrufen und auf einer Karte oder als Erweiterte Realität darstellen. Sie können interessierten Bürgern als Informationsquelle (Name des Gewässers oder des Bauwerks, Einzugsgebietsgröße etc.) dienen. Sie können aber auch hydrologische Fachexperten vor Ort unterstützen; z.B. durch Informationen wie Stationierung, in geeigneter Form aggregierte, gemessene oder berechnete Wasserstände und Abflüsse (Gewässerkundliche Hauptzahlen, Bemessungsabflüsse etc.), Ausbauzustand, Pflege-Rhythmus.

Abbildung 5 zeigt eine app, die hydrologische Fachdaten für Fachanwender vor Ort (in-situ) visuell zur Verfügung stellt. Dabei handelt es sich um die Darstellung von modellierten Abflussdaten auf einer Karte sowie auch in der Kamera-Ansicht. Es werden Abflusswerte an mehreren Punkten im Live-Kamerabild angezeigt. Zusätzlich ist es auch möglich, die Karte des betrachteten Flusseinzugsgebiets mit in das Kamerabild einzublenden.

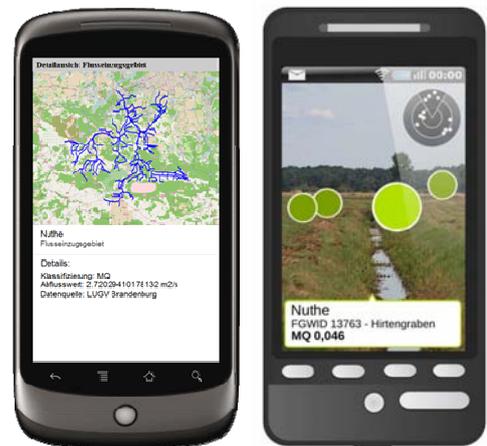


Abb. 5: Flusseinzugsgebiet als Karte (links) und Abfluss in Kamera als AR (rechts)

### Lehrpfad

Ein (Natur-) Lehrpfad dient verschiedenen Aufgaben. Dazu gehören u.a. die Umweltbildung, die Förderung der Regionalentwicklung, die Besucherlenkung und die Vermittlung einer spezifischen Thematik, z.B. der Sensibilisierung und Bewusstseinsbildung über Hochwassergefahren (Szekeres, 1999).

Mit einer mobilen AR-Anwendung können Informationen über die Position der Objekte auf einem Lehrpfad sowie zugehörige Lern-Inhalte im Kamerabild angezeigt werden. Dadurch können die einzelnen Objekte leichter gefunden werden (Orientierung im Gelände, Wegweiser auf dem Pfad) und

aktuelle (Zusatz-) Informationen kostengünstig bereitgestellt werden (multimedialer, selbstgesteuerter Lernprozess).

### **AR-Informations-Infrastruktur**

Zur Realisierung der o.g. mAR-Anwendungen wurde im Projekt MAGUN eine AR-Informations-Infrastruktur für die Erstellung, Integration, Verwaltung und Bereitstellung von Inhalten für mAR-Anwendungen auf Basis von Open Source-Software (GeoServer etc.) entwickelt.

Diese unterstützt zum einen die Integration von vorhandenen Daten aus verschiedenen Quellen in unterschiedlichen Formaten (multi-sourcing) und zum anderen die Erfassung neuer Inhalte vor Ort (in-situ), wobei unterschiedliche Methoden für die Erfassung der Inhalte realisiert werden, d.h. sowohl als offener kollaborativer Prozess durch die Endnutzer (crowd sourcing, UGC, VGI) als auch als geschlossener, von spezialisierten Personen durchgeführter Prozess. Darüber hinaus wird die Wiederverwendung der Inhalte in verschiedenen Kontexten durch die Aggregation, Interoperabilität und Rekombination sowie die Bereitstellung für verschiedene AR-Browser und ggf. weitere Dienste über standardisierte Schnittstellen (Multi-Channel) ermöglicht.

Diese Infrastruktur soll Unternehmen (als Content-Anbieter) dabei helfen, ihre vorhandenen Daten bzw. Inhalten auf mobilen Endgeräten und in AR-Anwendungen nutzbar zu machen sowie zu erweitern und aktuell zu halten – auch mit Nutzern ohne spezielle technische Kenntnisse.

### **Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Der Erfolg des World Wide Web (WWW) kann mit dem Begriff „Augmentieren“ (engl. augmentation) zusammengefasst werden. Im WWW ist ein Hypertext eine Methode, um relevante Informationen miteinander zu verbinden. Ein Hypertext augmentiert dabei die existierende Information mit anderen Informationen. Der Erfolg des Web 2.0 (und insbesondere von Wikipedia, der Blogosphäre etc.) basiert also nicht nur auf den nutzer-generierten Seiten, sondern auch auf der Möglichkeit, jeden Beitrag mit Links zu anderen Beiträgen anzureichern. Derzeit weitet die Erweiterte Realität dieses Konzept von der Online-Welt auf die natürliche Welt aus. Die zunehmende Leistungsfähigkeit von Smartphones bietet ein geeignetes Instrument, um digitale Informationen mit der natürlichen Welt zu assoziieren. Sie bieten darüber hinaus auch die Möglichkeit, Informationen der natürlichen Umgebung digital zu erfassen sowie über die digitalen Repräsentationen mit den natürlichen Objekten zu interagieren.

Mit der neuen Generation an weit verbreiteten, leistungsfähigen und kostengünstigen mobilen Endgeräten (Smartphones) sowie den plattformübergreifend vorhandenen AR-Browsern für die Darstellung von AR-Inhalten auf diesen mobilen Endgeräten steht nun eine technische Infrastruktur zur Verfügung, die eine kostengünstige Entwicklung mobiler AR-Anwendungen sowie eine massenhafte Nutzung dieser AR-Anwendungen durch Jedermann ermöglicht.

Der Einsatz von mAR in der Hydrologie bietet darüber hinaus neue Möglichkeiten der Überwindung von Barrieren und Grenzen:

mAR hilft bei der Orientierung in der Realität und schafft im Ortskontext eine unmittelbare neue mediale Erfahrung. mAR kann die Wahrnehmung des Ortes durch die Anreicherung mit Informationen aus Vergangenheit (Historische Hochwasser-Marken), Gegenwart (Hochwasser-Meldepegel) oder Zukunft (Planungen von Überflutungsflächen und Hochwasserschutzmaßnahmen, wie Verwallungen, Deiche etc., prognostizierte Hochwassergefahren durch Hochwasser-Gefahrenkarten) qualifizieren.

mAR bietet das Potenzial, hydrologisch relevante Informationen (Messwerte, Modelldaten etc.) nicht nur über Ihren Raumbezug abzufragen (ortsbezogene Dienste), sondern diese auch intelligent mit der „realen Welt“ zu verknüpfen. Die digitalen Informationen werden in ihren räumlichen Kontext gesetzt sowie die Sicht auf die reale Welt durch digitale Informationen und Objekte angereichert. Auf diese Weise ist zum einen eine bessere Interpretation und genauere Validierung der Daten sowie eine effizientere Entscheidungsunterstützung möglich. Zum anderen wird dabei eine neuartige Wahrnehmung und Erfahrung der Wirklichkeit ermöglicht sowie die Interaktion mit der Realität verbessert.

Zudem bietet mAR die Möglichkeit, hydrologische (insb. Hochwasser-) Informationen in die Breite zu bringen. Smartphones sind inzwischen massenhaft verbreitet und die Entwicklung von mAR-Anwendungen aufgrund der Verfügbarkeit kostenloser AR-Browser effizient möglich. Somit lassen sich hydrologische mAR-Anwendungen nicht nur für wenige Fachexperten entwickeln, sondern von einer riesigen Anzahl an Nutzern (z.B. „normale“ Bürger) nutzen, z.B. zur Information über Hochwassergefahren oder auch zur Erfassung von relevanten Informationen, z.B. bei oder nach Hochwassern (Geschwemmsellinien).

## **Danksagung**

Das Projekt MAGUN wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie des Instituts für angewandte Forschung (IfaF) Berlin gefördert. Die Autoren danken den Mittelgebern für die Unterstützung und allen MAGUN-Projektpartnern für die fruchtbare Zusammenarbeit.

## **Literatur**

- Azuma, R.T.A. (1997): A Survey of Augmented Reality. *Presence - Teleoperators and Virtual Environments* 6(4), 355-385.
- Coelho, Alexandre Hering (2007): Erweiterte Realität zur Visualisierung simulierter Hochwasserereignisse. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- 2007/60 EG (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. ABl. L 288 vom 06.11.2007.
- Höllerer, T., S. Feiner, T. Terauchi, G. Rashid und D. Hallaway (1999): Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System. *Computers and Graphics* 23(6), Elsevier Publishers, 779-785.
- Hornemann, C. und J. Rechenberg (2006): Was Sie über den vorsorgenden Hochwasserschutz wissen sollten. Dessau, Umweltbundesamt.
- MAGUN (2012): Mobile Anwendungen auf Basis von Geoinformationen in einer In-situ Informationsinfrastruktur im Umwelt- und Navigationsbereich, URL: <http://www.magun-projekt.de/>.
- Müller, U. (2010): Hochwasserrisikomanagement - Theorie und Praxis. Wiesbaden, Vieweg & Teubner.
- Petrow, T., A. Thieken, H. Kreibich und B. Merz (2003): Vorsorgende Maßnahmen zur Schadensminderung. In: Hochwasservorsorge in Deutschland - Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Schriftenreihe des DKKV 29, Bonn, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV).
- Reitmayr, G., E. Eade und T. Drummond (2005): Localisation and Interaction for Augmented Maps. In: Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'05), Washington DC (USA), IEEE Computer Society, 120-129, URL: <http://mi.eng.cam.ac.uk/~gr281/augmentedmaps.html>.
- Szekeres, P. (1999): Naturlehrpfade. 3. Aufl., Marburg, Institut für Ökologie, URL: [http://www.projektwerkstatt.de/download/texte\\_cd/reader/lehrpfade.pdf](http://www.projektwerkstatt.de/download/texte_cd/reader/lehrpfade.pdf).

# **Detaillierte Feldbeobachtung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Schneedeckeneigenschaften mit einem Netzwerk aus zahlreichen kostengünstigen Sensoren**

Stefan Pohl, Jakob Garvelmann und Markus Weiler

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Schneedecken und ihre räumliche und zeitliche Verteilung spielen eine sehr wichtige Rolle für eine Reihe von hydrologischen und klimatologischen Prozessen wie der Vorhersage von verfügbarem Wasser, der Lawinenvorhersage, der Berechnung des Energieaustausches zwischen Landoberfläche und Atmosphäre, und der Hochwasservorhersage besonders wenn Schneeschmelze und ergiebige Niederschläge in sogenannten „Rain on Snow Events (ROS)“ zusammenkommen. ROS produzieren häufig potenziell gefährliche Hochwässer in kleinen und mittelgroßen Einzugsgebieten. Eine zuverlässige Vorhersage bzw. Berechnung dieser Prozesse benötigt zwingend eine detaillierte Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Schneedecke sowie der meteorologischen Daten. Eine akkurate Übersicht über die Schneedeckenentwicklung ist jedoch häufig schwierig bedingt durch die geringe Zahl an etablierten Schneebeobachtungsstationen und fehlenden Erkenntnissen wie stark die Einflüsse von Topographie und Vegetation auf die Schneedeckenverteilung sind.

Das vorgestellte Projekt verwendet einen innovativen experimentellen Ansatz, der detaillierte, räumlich verteilte, Messergebnisse der wichtigsten Schneedeckeneigenschaften liefert. Dies wird erreicht durch die Kombination von bereits vorhandenen Wetterstationen mit einem engmaschigen Netzwerk aus zahlreichen (99 in drei Einzugsgebieten) neuentwickelten, kostengünstigen (<300€) Messstationen. Die Standorte der Messstationen wurden speziell ausgewählt, um möglichst viele Höhenlagen, Hangneigungen und Hangexpositionen abzudecken. Desweiteren wurden „Stationspaare“ installiert, bei denen eine Station auf einer offenen Fläche und eine weitere in unmittelbarer Nähe jedoch unterhalb verschiedener Waldvegetationen aufgebaut wurde. Die gewonnenen Datensätze bilden die Grundlage, um die natürliche, durch Topographie und Vegetation hervorgerufene, räumliche Variabilität der Schneedeckenaufbau- und Schneeschmelzprozesse zu untersuchen.

## **Einleitung**

Die räumliche Variabilität der Schneeakkumulation kann hauptsächlich drei Prozessen zugeschrieben werden: 1) orographische Einflüsse auf (Schnee-) Niederschlag 2) Interzeption und anschließende Sublimation von Schnee in der Vegetation und 3) Umverteilung von bereits gefallenem Schnee durch Wind. Orographische oder präferentielle Niederschlagsverteilungen sind abhängig von Faktoren wie dem lokalen Windfeld, der atmosphärischen Stabilität und der Verteilung der Luftfeuchte. Beträchtliche Niederschlagsmengen können zumindest zunächst in der Vegetationsdecke gespeichert werden. Ein Teil dieses interzeptierten Schnees wird direkt zurück in die Atmosphäre sublimiert (Floyd und Weiler, 2008). Studien in Nordamerika haben einen Sublimationsverlust von 20 - 40% für Nadelwälder festgestellt (Pomeroy *et al.* 1998, Montesi *et al.* 2004). Bei der Umverteilung von bereits gefallenem Schnee durch Wind wird Schnee von Orten mit hohen Windgeschwindigkeiten (z.B. Bergkuppen) in geschütztere oder vegetationsbedeckte Gebiete umverteilt (Liston und Elder 2006, Strasser 2008). Normalerweise sind die Nettostrahlungsbilanz und der turbulente Austausch von gefühlter und

latenter Energie die wichtigsten Faktoren der Schneeschmelzenergiebilanz. Studien haben gezeigt, dass diese Faktoren in hohem Maße räumlich verteilt sind und dass diese Verteilung hauptsächlich auf topographische und Vegetationseinflüsse zurück geht (Pohl et al. 2006a,b). Selbst geringe Unterschiede in Topographie können zu großen Unterschieden in Ausmaß und zeitlichem Verlauf der Schneeschmelze führen (Pohl und Marsh 2006, Jost et al. 2007). Vegetation verlangsamt das Schmelzen von darunter gelegenen Schneedecken durch eine Reduktion der einfallenden Solarstrahlung und eine verringerte Windgeschwindigkeit und damit einem verminderten turbulenten Energieaustausch. Auf der anderen Seite hat Vegetation eine geringere Albedo als Schnee und kann somit mehr Solarenergie absorbieren. Diese absorbierte Strahlung führt zu wärmeren Baumkronen und Baumstämmen und damit zu einem erheblich erhöhtem Anteil an langwelliger Strahlung, die dem Schnee unterhalb von Vegetationsdecken zugeführt wird. Die relative Wichtigkeit dieser Prozesse und damit die Frage ob eine Vegetationsdecke die Schneeschmelze beschleunigt oder verlangsamt hängt von Faktoren wie der Vegetationsdichte, der Verteilung und Größe von Zwischenräumen, der Hangexposition bzw. Neigung und den klimatologischen Bedingungen ab.

Aus diesem kurzen Überblick wird deutlich wie sehr die zeitliche und räumliche Entwicklung von Schneedecken von Topographie und Vegetation abhängig sind. Die meisten Studien zu diesem Thema greifen auf einzelne Feldkampagnen zurück und können daher nicht genutzt werden, um die relative Wichtigkeit der geschilderten Faktoren an verschiedenen Standorten und während einzelner Ereignisse zu untersuchen. Die hier vorgestellte Studie will diese Lücke schließen, indem eine Vielzahl von kostengünstigen, aber genauen, Messsensoren aufgestellt werden, die die Schneehöhen und die wichtigsten klimatologischen Daten über 3 Winter hinweg kontinuierlich (stündlich) aufzeichnen.

## Methoden

Die Studie wurde in drei Einzugsgebieten im Schwarzwald durchgeführt. Die Einzugsgebiete wurden ausgesucht, um möglichst viele verschiedene topographische Eigenschaften und Vegetationsbedeckungen zu erfassen. Die „Brugga“ hat ein ausgeprägtes Relief mit großen Höhenunterschieden und einem hohen Waldanteil aber auch größere vegetationsfreie Hochflächen. Die „Breg“ zeichnet sich durch traditionell hohe Schneemengen und mehrere gut definierte West-Ost ausgerichtete Täler (Urachtal, Linachtal) aus. Dadurch ergeben sich zahlreiche Standorte zum Vergleich der Energiebilanz auf Süd gegenüber Nord- ausgerichteten Hängen. Die „obere Kinzig“ ist besonders aufgrund ihrer ausgeprägten Vegetationsunterschiede interessant. Hier finden sich dichte und lichte Nadel- und Laubwälder, in denen sich der Einfluss verschiedener Vegetationen auf die Schneedecke gut untersuchen lässt. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Kennzahlen der verwendeten Einzugsgebiete.

Tab.1: Kennzahlen der drei für die Studie ausgewählten Einzugsgebiete

	Größe Km <sup>2</sup>	Höhenlage m	Unter-EZG	Waldanteil %	SnoMoS	Kameras
Brugga	40	433-1493	6	79	38	19
Breg	158	738-1147	4	70	35	15
Kinzig	76	354-842	3	63	26	11

Die Studie verwendet eine große Anzahl (99) von neuentwickelten, kostengünstigen Snow Monitoring Stations (SnoMoS). Folgende Messdaten werden stündlich erfasst: Schneehöhe, Lufttemperatur und –feuchte, Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, (Schnee-) Oberflächentemperatur, und einfallende Globalstrahlung. Die Schneehöhe wird durch einen Ultraschallsensor erfasst, die Oberflächentemperatur durch einen Infrarotsensor, der Niederschlag durch eine Niederschlagswippe und die Windgeschwindigkeit durch ein Schalenkreuzanemometer. Die SnoMoS wurden an hölzernen

L-Trägern befestigt (Abb. 1) und bestehen aus zwei separaten Einheiten; einer kleineren Sensoreinheit in der alle Messensoren untergebracht sind und einer Loggereinheit in der Datalogger, elektronischen Zählwerke für die Wind- und Niederschlagsmessung, sowie die für den Betrieb der Stationen benötigten Batterien untergebracht. Auf der Oberseite der L-Träger sind Windmesser (Abb. 1), Niederschlagswippe oder beides angebracht. Die SnoMoS können ohne Wartung oder Batteriewechsel ca. 6 Monate autark Messungen durchführen. Zusätzlich wurden im Rahmen der Studie 45 Intervallkameras aufgebaut, deren stündliche Aufnahmen weitere Informationen zum Zustand der Schneedecke, Schneehöhe, Schneeralbedo und der in den Baumkronen gespeicherten Schneemenge liefern.



Abb. 1.: SnoMo-Station mit Sensoreinheit (A) , Loggereinheit (B) und Windmessung

Um die Genauigkeit der von den Snomos erfassten Daten zu überprüfen, wurde eine Station für einen Monat in unmittelbarer Nachbarschaft zu einer etablierten, vom Institut für Hydrologie (IHF) betriebenen, „professionellen“ Wetterstation aufgebaut. Abbildung 2 zeigt den Vergleich der wichtigsten Klimadaten.

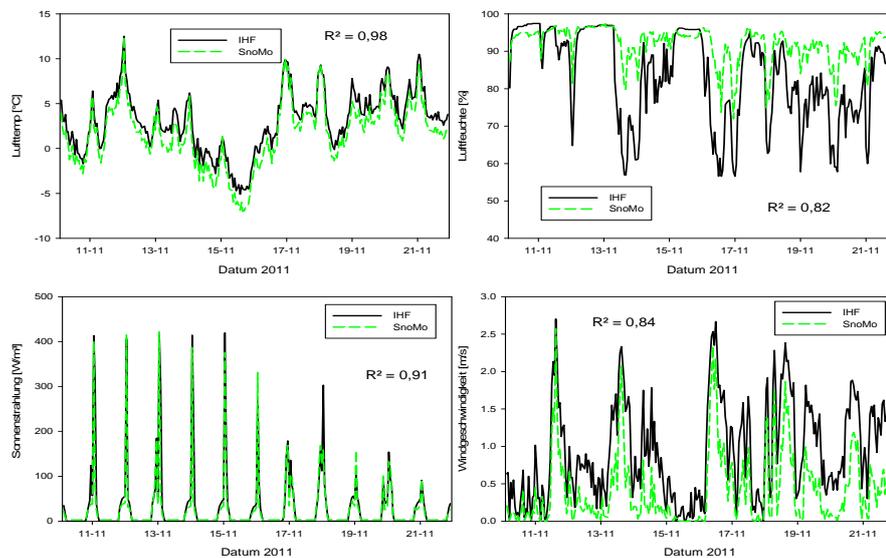


Abb. 2.: Vergleich der aufgezeichneten Klimadaten

Die beobachteten Werte für Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung sind sich sehr ähnlich und zeigen keine ausgeprägten systematischen Fehler. Die von der SnoMos gemessenen Luftfeuchtedaten scheinen die Luftfeuchte zumeist etwas zu überschätzen, die zeitliche Entwicklung der Luftfeuchte wird jedoch gut nachgezeichnet und der absolute Fehler der Messwerte ist zumeist gering. Der Grund dafür könnte die Nähe des Sensors zum, oft recht feuchten, Holzträger sein. Der Vergleich der Windgeschwindigkeitsdaten ergab, dass die SnoMoS zumeist etwas zu geringe Windgeschwindigkeiten vor allem bei insgesamt niedrigen Geschwindigkeiten aufzeichnet. Ein Grund hierfür könnte das träge Anlaufmoment des benutzten Kleinschalensrades sein. Insgesamt zeigen die Tests dass die SnoMoS trotz ihrer geringen Kosten akkurate Messwerte liefern. Ein Vergleich der Schneehöhenmessungen mit

den entsprechenden Kamerabildern zeigte, dass die aufgezeichneten Schneehöhen und die Zeitpunkte, zu denen die Schneedecke komplett abgetaut war, gut mit den Informationen aus den Bildern übereinstimmten.

## Ergebnisse

Kurz nach Beginn des Projektes im November 2010 kam es im Studiengebiet zu einem signifikanten ROS Ereignis, das an mehreren Pegeln zu einem 5-jährigen Hochwasser führte. Eine Analyse dieses Hochwassers bestätigte die wichtige Rolle, die eine vorhandene Schneedecke bei solchen Hochwässern spielt. Die Ganglinie der Brugga (Abb. 3) zeigt, dass ein großer Teil des Niederschlages am Anfang des Events in der Schneedecke gespeichert wurde. Der Hauptanstieg der Abflussganglinie beginnt erst, als die Lufttemperatur deutlich anstieg und die Schneedecke abzutauen begann. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt die Schneedecke isotherm bei 0 °C und vollständig mit Wasser gesättigt war. Das führte in der Folge zu einem schnellen Anstieg des für den Abfluss zur Verfügung stehenden Wasser.

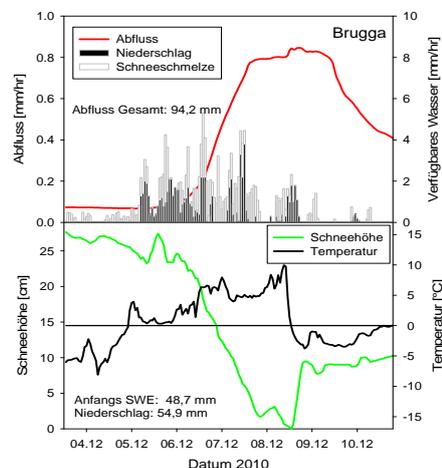


Abb. 3.: Niederschlag, Schneeschmelzmengen, Schneehöhe und Lufttemperatur für eine Snomo Station 778 m ü NN sowie die Abflussganglinie der Brugga für ein ROS Event 2010

Weitere Niederschläge am 08.12.10 führten zu keinem weiteren Anstieg des Abflusses, da sie in weiten Teilen des Einzugsgebietes als Schnee fielen wie die Daten zu Lufttemperatur und Schneehöhe eines ungefähr in mittlerer Höhenlage des Gebietes aufgestellten SnoMoS zeigen. Insgesamt zeigte die Analyse, dass ca. 50% des Hochwasserabflusses aus der Schneeschmelze resultierten. Eine Analyse der Schneewasserequivalente (SWE) der Schneedecken im Gebiet verdeutlicht die große Variabilität der SWE innerhalb eines relativ kleinen Einzugsgebietes. Beobachtete SWE am Anfang des ROS Events reichten von 12 mm in den tieferen Waldgebieten bis zu 90 mm auf den hoch gelegenen Freiflächen bei einem Gebietsdurchschnitt von 49 mm. Diese Unterschiede zeigen, wie wichtig das Kenntnis der Schneedeckenverteilung für eine akkurate Vorhersage solcher ROS Hochwasserereignisse ist.

Die Unterschiede in Schneehöhe, die trotz großer räumlicher Nähe aufgrund unterschiedlicher Topographie entstehen können, verdeutlicht Abb. 4. Die drei gezeigten Stationen befinden sich jeweils auf Nord- bis Nordost exponierten Wiesen, die maximale Luftliniendistanz beträgt weniger als 500 m. Station A befindet sich in einer Troglage am Ende eines Seitentales. Durch die Troglage ist diese Station fast durchgehend beschattet und die Windgeschwindigkeiten sind hier deutlich geringer. Desweiteren kann davon ausgegangen werden, dass dieser Standort einen signifikanten Schneeeintrag durch Windverfrachtung über den angrenzenden (südwestlich gelegenen) Schwarzwaldhauptkamm be-

kommt. Auch Station B befindet sich noch in einem Bereich in den Schnee eingeweht wird. Jedoch liegt dieser Hang wesentlich freier sodass Sonnenstrahlung und Wind zu höheren Schneeschmelzraten führen. Station C liegt weitgehend exponiert und außerhalb des Bereichs der Schneeverfrachtung. Abb. 4 zeigt die sich daraus ergebenden Unterschiede in Schneehöhe (max. 65 cm) und Länge der Schneebedeckung (35 Tage) für den Spätwinter 2011.

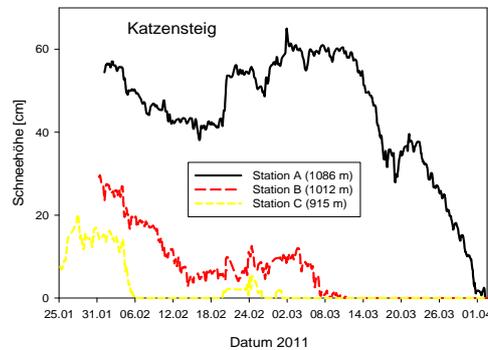


Abb. 4.: Schneehöhen für drei Stationen im „Katzensteigtal“ im Spätwinter 2011

Abb. 5a zeigt einen Vergleich der Entwicklung der Schneehöhe für eine Wiese und einen typischen dichten Nadelwald, wohingegen die gezeigte Waldstation in Abb. 5b die Verhältnisse unterhalb eines Laubwaldes widerspiegelt. Es wird deutlich dass der dichte Nadelwaldbewuchs zunächst die Akkumulation der Schneedecke verringert. Der Grund dafür ist die hohe Speicherkapazität für Schneeniederschläge und die subsequence Sublimation eines Teils des Schnees aus den Baumkronen direkt zurück in die Atmosphäre. Die Ganglinien zeigen auch dass die Schneeschmelzraten unter dichter Nadelwaldvegetation im Allgemeinen im Vergleich zu offenen Flächen stark verringert sind. Unter lichterer Laubbaumvegetation sind die Sublimationsverluste weniger stark ausgeprägt und die Schmelzraten sind zumindest weniger stark reduziert. Der Grund dafür ist die stärkere Durchlässigkeit der Laubbaumvegetation für Sonnenstrahlung und die geringere Verringerung der Windgeschwindigkeiten.

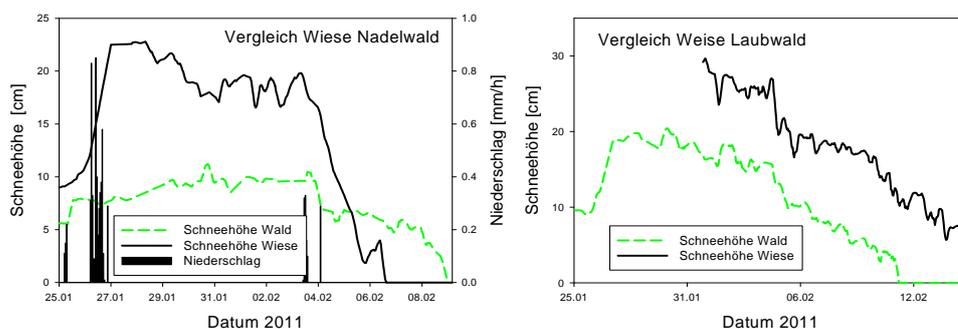


Abb. 5.: Vergleich der Schneehöhenentwicklung zwischen offenen Flächen und unter Waldvegetation für a: Nadelwald und b: Laubwald

Werte für Interzeptionsverluste und Schmelzraten wurden aus den Daten der SnoMoS und aus den Fotos der Intervallkameras für mehrere Schneefall- und Schneeschmelzperioden während der letzten beiden Winter und für zahlreiche „Stationspaare“ analysiert. Tabelle 2 zeigt die Mittelwerte für die analysierten Stationspaare und Akkumulations- bzw. Schmelzperioden. Die Werte für Interzeptionsverluste unter Nadelwald ähneln denen in Nordamerika unter vergleichbarer Vegetation gefundenen. Gleichzeitig zeigt sich dass die Verluste unter Laubwäldern signifikant geringer sind. Die Analyse der Schmelzraten zeigt eine deutliche Verringerung der Schmelzraten unter Waldvegetation wobei wiederum Nadelwälder mit einer Verringerung um 43% die Schneedecke stärker beeinflussen als Laubwälder (24%).

Tab. 2: Durchschnittliche Werte für Interzeptionsverluste und Schmelzraten unter Waldvegetation in Vergleich zu offenen Flächen

	Interzeption %	Schmelzrate %
Nadelwald	39 (31 Events)	57 (22 Events)
Laubwald	9 (23 Events)	76 (20 Events)

## Zusammenfassung

Die Feldversuche haben gezeigt, dass die im Rahmen des Projektes entwickelten Schneesensoren akkurate Werte für Schneehöhe und die wichtigsten Klimadaten liefern. Die geringen Kosten des Sensors ermöglichen es, ein Messnetz aus zahlreichen dieser Sensoren aufzubauen und so die Einflüsse von Topographie und Vegetation auf die Schneedecke kontinuierlich zu bestimmen. Dadurch kann die relative Wichtigkeit dieser Einflüsse separat für verschiedene topographische und Vegetationsbedingungen und für verschiedene Ereignisse mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen analysiert werden. Eine solche Einzelanalyse ist der nächste Schritt des Projektes. Die ersten Analysen haben jedoch schon die große Wichtigkeit der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Schneedecke im Studiengebiet für hydrologische, klimatologische und ökologische Aspekte gezeigt.

In einem weiteren Schritt werden die erhobenen zeitlich und räumlich variablen Daten genutzt werden, um Modelle von unterschiedlicher Komplexität anzutreiben und die Simulationsergebnisse zu validieren. Die dabei verwendeten Modelle reichen von einfacheren Abflussmodellen, die zur Hochwasservorhersage benutzt werden können, bis zu komplexen Forschungsmodellen.

## Literatur

- Floyd W. und Weiler, M., (2008). Measuring snow accumulation and ablation dynamics during rain-on-snow events: innovative measurement techniques. *Hydrological Processes*, 23, 4805-4812.
- Jost, G., Weiler, M., Gluns D. R., und Alila Y. (2007). The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale. *Journal of Hydrology*, 347, 101-115.
- Liston G.E. und Elder K. (2006). A Distributed Snow–Evolution Modeling System (SnowModel). *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 217–234.
- Montesi J, Kelly E., Schmidt R.A. und Davis R. E. (2004): Sublimation of Intercepted Snow within a Subalpine Forest Canopy at Two Elevations *Journal of Hydrometeorology*, 5, 763 -773
- Pohl, S. und Marsh P. (2006). Small-scale modelling of spatially variable snowmelt in an arctic catchment *Hydrological Processes*, 20, 1773-1792.
- Pohl, S., Marsh P., und Pietroniro A. (2006a). Spatial – temporal variability in solar radiation during spring snowmelt. *Nordic Hydrology*, 37 (1), 1-19
- Pohl, S., Marsh P., und Liston G.E. (2006b). Spatial – temporal variability in turbulent fluxes during spring snowmelt. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 38 (1), 136 -146.
- Pomeroy J.W., Shook K.R., Toth B., Essery R.L.H., Pietroniro A. und Hedstrom N. (1998): An evaluation of snow accumulation and ablation for land surface modelling. *Hydrological Processes*, 12, 2339-2367.
- Strasser U., Franz H. und Mauser W. (2008). Distributed modelling of snow processes in the Berchtesgaden National Park (Germany). In: *Strasser, U. and Vogel M. (eds.): Proceedings of the Alpine\*Snow\*Workshop*, Munich, October 5–6, 2006, Germany. Forschungsbericht 53, Nationalpark Berchtesgaden.

# Angewandte offene Standards im integrierten Wasser-Informations-Management

Roland Funke<sup>1</sup>, Michael Natschke<sup>1</sup>, Ulrich Looser<sup>2</sup> und Irina Dornblut<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KISTERS AG, Aachen, Deutschland

<sup>2</sup> Global Runoff Data Centre, BfG, Koblenz, Deutschland

## Zusammenfassung

Der zunehmende Datenaustausch zwischen allen Beteiligten in der Hydrologie wird derzeit durch eine große Anzahl teilweise unzureichend definierter Formate behindert. Mit dem Format WaterML2 wird derzeit vom Open Geospatial Consortium ein umfassendes Format erarbeitet, das einen weltweit akzeptierten und einsetzbaren Standard bilden soll. Nach umfangreicher Spezifikation unter Beteiligung der wesentlichen Akteure wurde im Rahmen der OGC Interoperability Experimente die Leistungsfähigkeit des WaterML2 nachgewiesen und erste Software-Lösungen zur Produktreife entwickelt, so dass sie inzwischen schon im operationellen Einsatz sind.

## Einleitung

Seit 25 Jahren entwickelt und implementiert die KISTERS AG Software-Lösungen entsprechend den Anforderungen einer anspruchsvollen Wasserwirtschaft. Der Fokus liegt dabei auf zentralem Messdatenmanagement und effizienter Verarbeitung von Zeitreihenarchiven. In Zusammenarbeit mit den Nutzern engagiert sich die KISTERS AG kontinuierlich in den regionalen, nationalen und internationalen Standardisierungsprozessen und –gremien. Im Rahmen der Hydro Domain Working Group des Open Geospatial Consortiums (OGC) kooperiert KISTERS und das Global Runoff Data Centre (GRDC) in Koblenz seit 3 Jahren eng mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, der WSV, dem australischen CSIRO sowie weiteren Mitgliedern der Arbeitsgruppe bei der Definition des WaterML2 als einem zukünftigen global anerkanntem Format zum Datenaustausch und dessen Implementierung innerhalb des OGC Sensor Observation Service SOS.

In Rahmen der OGC Surface Water Interoperability Experimente erfolgte aktuell die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des WaterML2. Im Experiment 1 (Internationaler Austausch von Wasserstandsinformationen im Rheingebiet) unterstützte KISTERS die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung WSV im Austausch von Daten mit dem französischen SANDRE. Das Experiment 3 (Öffentliche Bereitstellung von weltumspannenden Zuflussmengen in die Ozeane durch das GRDC) wurde durch KISTERS geleitet.

Globale Daten-Zentren wie das GRDC profitieren erheblich von offenen Standards sowohl bei der Akquisition als auch bei der späteren Verbreitung von Daten und Informationen. Heutzutage erfolgt die Zulieferung in einer Unzahl verschiedener Formate. Die Entwicklung und Pflege komplexer Importroutinen und Konverter ist die Folge. Inhalte sind oftmals unvollständig oder nicht eindeutig. Mit der Akzeptanz und Verbreitung der offenen Standards wird der Prozess des Datenaustausches rationalisiert, Automatisierung wird möglich und aufgrund der Offenheit unabhängig von der verwendeten Software.

## Die derzeitige Situation

Während es im Bereich der Meteorologie schon sehr früh üblich war, Daten länderübergreifend und sogar global auszutauschen, hat dies im Bereich der Hydrologie vergleichsweise spät begonnen. Von einer globalen Vereinbarung bzw. einer globalen Praxis kann noch heute nicht gesprochen werden. Zugleich haben aber viele Organisationen und auch Firmen die Notwendigkeit gesehen, zu einem "Standard" zu kommen. Im Zeitraum 2000-2010 waren es oftmals nationale oder kontinentale Initiativen, die in ihrem jeweiligen Wirkungsbereich Erfolge hatten, aber spätestens an ihrer nächsten Grenze wiederum auf andere Initiativen stießen. Erst im Rahmen der OGC scheint es gelungen, einen globalen Kreis von Leuten so zusammen zu bringen, dass ein kontinuierlicher - wenn auch Monate oder Jahre währender - Fortschritt zu verzeichnen ist. Mit dem aktuell zur Diskussion stehenden Vorschlag für "WaterML2" liegt ein generischer, durch die Hydrologie getriebener, Vorschlag für den Transport von Messdaten in Form von Zeitreihen vor. Bereits jetzt ist abzusehen, dass das Format von einer breiten Menge von Organisationen unterstützt werden wird, womit es schon jetzt als eine Art aufkommender "Quasi-Standard" bezeichnet werden kann, obwohl der formale Spezifikationsprozess in der OGC noch nicht abgeschlossen ist.

Die Technologie und Qualität der Offenen Standards wird kontinuierlich verbessert. Es stehen erste Softwareprodukte zur Verfügung, deren Anwendbarkeit in den Interoperability Experimenten nachgewiesen wurde. Erste operationelle Installationen zeigen schon heute das Potenzial der angewandten Offenen Standards für integrierte Wasserdaten-Managementsysteme ein.

## OGC und die Hydrologie-Arbeitsgruppe

Die Hydrologie-Arbeitsgruppe [*HydroDWG*] der OGC (Hydrology Domain Working Group - HydroDWG) existiert seit 2009 und hat sich mit dem Ziel gegründet, den Datenaustausch in der Hydrologie zu vereinfachen. Der Hauptfokus liegt dazu derzeit auf der Erarbeitung und Veröffentlichung des Datenformates "WaterML2".

Die HydroDWG hat zudem ein Mandat der Kommission für Hydrologie (CHy) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und arbeitet mit dem Ziel, die eingebrachten Spezifikationen auch einem größeren Publikum zugänglich zu machen und möglichst auch im Rahmen von ISO-Standardisierungen zu verwirklichen.

Neben der Spezifikation des Datenformates "WaterML2" gibt es folgende weitere Ziele:

- Erstellung eines Best-Practices-Paper für eine korrekte Funktion eines SOS in Kombination mit WaterML2
- Benennung von Anforderungen aus dem Bereich der Vorhersage (mittels eines Interoperability Experimentes "ForecastIE")
- Spezifikation eines Objektmodells für die Hydrologie (Hydro Feature Model)

Die HydroDWG trifft sich in regelmäßigen Abständen telefonisch oder persönlich bzw. eigentlich beides, da nahezu bei keinem Treffen alle Teilnehmer tatsächlich anwesend sein können. Lediglich bei dem jährlich stattfindenden "HydroDWG"-Treffen ist es bisher gelungen den ständig wachsenden Personenkreis von aktuell ca. 30 Personen an einen Tisch zu bringen. Die Mitglieder stammen aus allen Bereichen wie Behörden, Universitäten aber auch Firmen. Die Mitgliedschaft basiert im wesentlichen auf der Motivation zur aktiven Mitarbeit. Ein formales Mandat, etwa eines Landes, zu haben

bzw. gewählt zu werden ist nicht Voraussetzung zur Mitarbeit. Viele Beteiligten investieren erheblich in den gemeinsamen Erfolg, indem ganze Wochen und Monate Arbeit für die jeweiligen Arbeitsschwerpunkte getätigt werden, die aus den Budgets der jeweiligen Organisation selbst getragen werden.



Abb. 1: Hauptbeitragende zur HydroDWG der OGC und dem WaterML2 Standard

### Warum engagiert sich KISTERS in dieser Arbeitsgruppe?

Bereits seit 20 Jahren entwickelt und liefert KISTERS schlüsselfertige Software-Lösungen für das Datenmanagement in der Hydrologie und Wasserwirtschaft. Die Anforderungen des internationalen Markts in punkto Datenbeschaffung, -speicherung, -organisation, -validierung, -analyse, -integration und -verbreitung wurden in einer ausfallsicheren, skalierbaren und steuerbaren offenen Multi-Tier-Softwarearchitektur elegant gelöst. Die auf JAVA basierende Entwicklung ist speziell darauf ausgelegt, Zeitreihen-Massendaten zu organisieren, zu berechnen, und weiterzugeben.

Heute setzt sich die weltweite Gruppe der Nutzer von KISTERS-Produkten im Bereich Wasser aus über 3000 aktiven Personen zusammen, die Metadaten, Messergebnisse, Kennlinien, Wasserproben, Zeitreihen und die Produktdaten aus abgeleiteten Zeitreihen verarbeiten. Die hydrometrischen Netze, die heute mit Lösungen von KISTERS verwaltet werden, umfassen zwischen 10 und 100.000 Messstationen.

KISTERS hat bereits einen internen Prozess der Standardisierung durchlebt, der letztlich dazu geführt hat, dass alle Kunden ein einheitliches Softwareprodukt für ähnliche Fragestellungen einsetzen. Im Interesse der Kunden arbeitet KISTERS kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Standardisierungsprozessen in seinen Produkten. Seit 2005 unterstützt KISTERS die Entwicklung von Standards der CUASHI Initiative. Seit 2009 arbeitet KISTERS als Mitglied der OGC HydroDomain-Arbeitsgruppe mit der australischen CSIRO und Anderen an der Entwicklung und Erweiterung von WaterML2 und dessen Implementierung im Sensor Observation Service (SOS).

Des Weiteren leistet KISTERS auch Beiträge zum Oberflächenwasser-Interoperabilitätsexperiment 1 (Surface Water Interoperability Experiment) „Grenzüberschreitender Anwendungsfall, internationaler

Austausch der Wasserstände des Rheins zwischen SANDRE (Frankreich) und WSV (Deutschland)“. Beim OGC Interoperabilitätsexperiment 3 „Bereitstellung ausgewählter GRDC Stationsdaten zum globalen Abfluss“ hat KISTERS die Projektführung übernommen.

## Das Format WaterML2

Basierend auf den Erfahrungen aus den verschiedenen Regionen wurde seit ca. 2009 an einer Studie zur Harmonisierung [*HarmStan*] der verschiedenen existierenden Formate und Verfahrensweise gearbeitet.

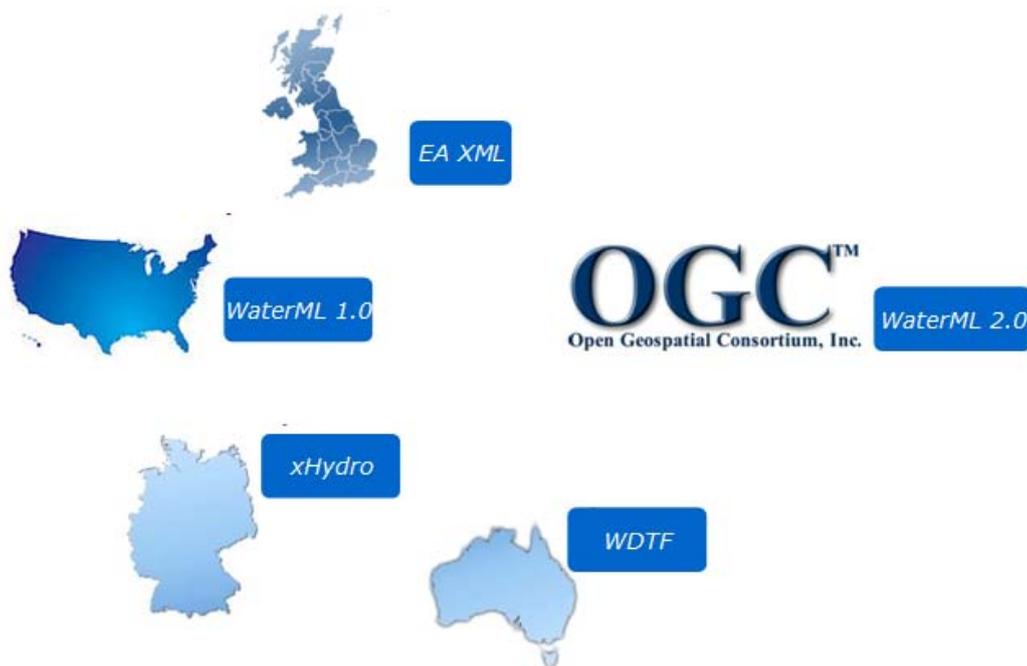


Abb. 2: Existierende nationale Datenformate als Grundlage zu WaterML2

Dieses war letztlich die Grundlage für die daraufhin gestartete Spezifikation von WaterML2 [*WaterML2*]. Basierend auf der bereits existierenden OGC-Spezifikation "Observations and Measurements O&M" [*OGC O&M*], der jeden Messwert quasi als einzelnen auftretenden Wert ansieht, ist mit WaterML2 nun ein Format geschaffen worden, das auch Messreihen (bzw. Zeitreihen) als Struktur definiert hat. Zudem sind aus den recht generischen Bezeichnungen aus O&M spezifische Terminologien geworden, die eher dem Themenbereich der Hydrologie zuzuordnen sind. Zugleich sind aber existierende Spezifikationen aus dem Bereich Sensor Web Enablement (SWE) und auch Geography Markup Language (GML) berücksichtigt worden.

Wichtig ist zudem, dass neben reinen Rohdaten und Zahlenwerten ein wirklich vollständiges Zeitreihenformat existiert. Dieses enthält auch Konkretisierungen über die tatsächliche Gültigkeit des Wertes in Bezug auf seinen Zeitstempel. Ist der Wert nur genau an diesem Zeitstempel gültig? oder ist es z.B. ein Mittelwert des vorherigen Zeitraumes? Diese Eigenschaften werden hier als Interpolationstyp bezeichnet und können graphisch auch folgendermaßen veranschaulicht werden:

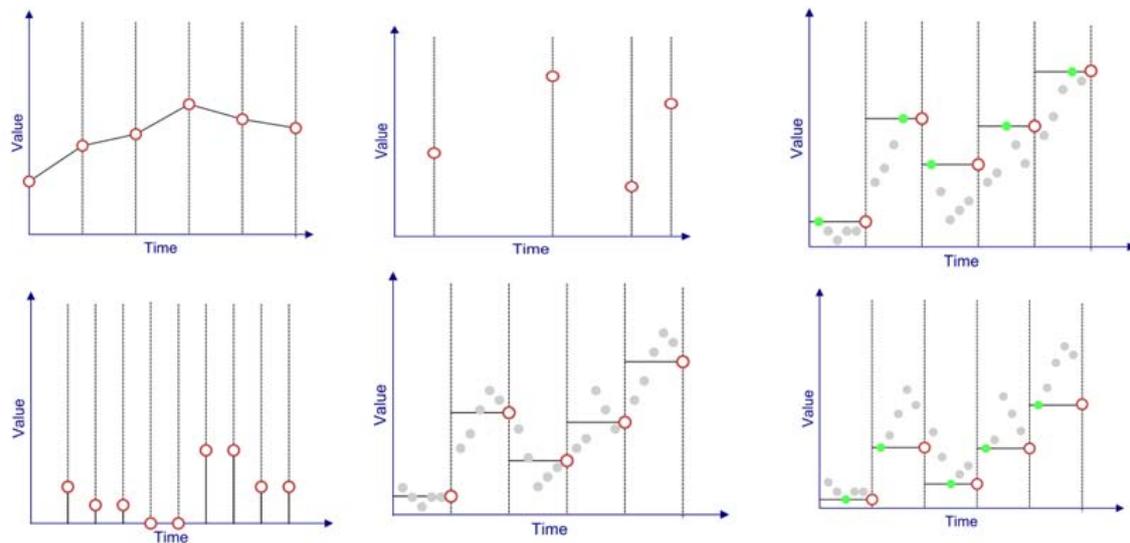


Abb. 3: Wesentliche WaterML2 Interpolationstypen (von oben links: kontinuierlich und linear interpolierbar, nicht interpolierbare Einzelwerte, Intervall-Maxima, Intervall-Summen, Intervall-Mittelwerte, Intervall-Minima)

Neben dem Interpolationstyp bilden die Informationen zur Entstehung der Werte (echte Messwerte, abgeleitete Werte, aggregierte Werte, verwandte Algorithmen etc) sowie Qualitätsinformationen und beschreibende Kommentare wesentliche Elemente des Formates. Diese Informationen gewinnen mit zunehmender Vernetzung der Datenlieferanten und –nutzer und dem daraus resultierenden Datenvolumen an Bedeutung. Ein direkter Kontakt zum Datenlieferanten wird immer seltener und über das Format ist die Bereitstellung sämtlicher Informationen sicherzustellen, die für eine fachgerechte Nutzung der Daten erforderlich ist.

### **Die OGC Surface Water Interoperability Experimente als Nachweis der Anwendbarkeit – Das Beispiel IE3 „Bereitstellung ausgewählter GRDC Stationsdaten zum globalen Abfluss“**

In dem Anwendungsfall zum globalen Abfluss mit Daten des GRDC wurde die automatische Bereitstellung von berechneten monatlichen und jährlichen Abflussmengen großer Flüsse, die in die Weltmeere entwässern, geprüft. Hierzu hat das GRDC Zeitreihendaten von ausgewählten Stationen zur Verfügung gestellt. Auf einer Webseite können Stationen interaktiv über einen Katalog ausgesucht und auf einer Karte angezeigt werden. Metadaten zu den angezeigten Stationen können aufgerufen werden und dann hat der Nutzer die Möglichkeit interaktiv Zeiträume auszusuchen für die das System aus den original mittleren Tagesabflusswerten die entsprechenden Monats- oder Jahresabflussmengen berechnet. Die Anzeige in unterschiedlichen Einheiten (z.B.  $m^3/sec$  oder Kubikfuß) ist auch möglich. Die Ergebnisse werden zusammen mit den Metadaten zur Messstation tabellarisch aufbereitet und präsentiert. Die Eignung der OGC-Spezifikationen zur durchgängigen und systemübergreifende Bereitstellung von Daten und Informationen wurde hiermit nachgewiesen. Der Zugriff kann mit dem eigenen kompatiblen Client erfolgen. Als allgemeines Frontend steh [kiwis.kisters.de](http://kiwis.kisters.de) zur Verfügung.



Abb. 4: Datenfluss mittels SOS/WaterML2 im IE3 über den Businesslayer KiTSM und das WebService-Interface KiWIS zum OGC kompatiblen Client

## Der heutige Stand der Standardisierung

Globalen Datenzentren, wie dem GRDC, kommen die Weiterentwicklungen im Bereich der Offenen Standards zur Erfassung und Verbreitung hydrologischer Daten und Informationen besonders zu Gute. Bisher wurden hydrologische Daten in den verschiedensten Formaten bereitgestellt, was zur Folge hatte, dass komplexe Import-Tools und Konvertoren zu deren Interpretation entwickelt werden mussten. Mit der Ankunft der Offenen Standards kann jetzt die Übermittlung und der Austausch von hydrologischen Daten zwischen Nutzern (z. B. GRDC) verschlankt oder sogar automatisiert werden. Die Verwaltung und Bearbeitung der Daten erfolgt mit Software-Systemen, z.B. WISKI von KISTERS, das bereits von einer umfangreichen Nutzergemeinde verwendet wird. Die Bereitstellung der Daten und Datenprodukte für die Nutzer erfolgt über Offene Standards, die in den Oberflächenwasser-Interoperabilitätsexperimenten getestet wurden. Das GRDC begrüßt diese Verbindung aus bereichsspezifischen Softwareprodukten und den neuen Offenen Standards, da dies schlussendlich zu einer effizienteren Betriebsweise des Datenzentrums beiträgt.

Die KISTERS Web Interoperability Solution (KIWIS) wurde speziell als Beitrag zu den beiden Interoperabilitätsexperimenten der OGC entwickelt. KIWIS bietet kombinierte Dienste, wie SOS, WOF, WMS und WFS optimiert für Messdaten aus einer homogenen Quelle. KIWIS ist somit vor allem ein Server für zeitliche Informationen (TimeSeriesServer).

## Literatur

- [HydroDWG] Hydrology Domain Working Group  
[http://external.opengis.org/twiki\\_public/bin/view/HydrologyDWG](http://external.opengis.org/twiki_public/bin/view/HydrologyDWG)
- [HarmStan] Harmonising Standards for Water Observation Data - Discussion paper  
[https://portal.openeospatial.org/files/?artifact\\_id=39090](https://portal.openeospatial.org/files/?artifact_id=39090)
- [OGC O&M] OGC Standard "Observations and Measurements"  
<http://www.openeospatial.org/standards/om>
- [WaterML2] Candidate OGC WaterML Version 2.0 standard documents  
<http://www.openeospatial.org/standards/requests/85>

# **Hydrometeorologische Leistungen des DWD zur Unterstützung der Wasserwirtschaft im Zeichen des Klimawandels – eine aktuelle Übersicht**

Bruno Rudolf, Annegret Gratzki, Gabriele Malitz, Andreas Becker und Florian Imbery

Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Der DWD betreibt bereits seit 1972 eine spezielle Organisationseinheit zur Beratung und Unterstützung der Hydrologie und Wasserwirtschaft in Deutschland. In Kooperation mit den Wasserbehörden des Bundes und der Länder wurde in der Abteilung Hydrometeorologie eine bedarfsgerechte, Nutzer- und zukunftsorientierte Produktpalette entwickelt. Dazu gehören die Starkregenstatistik KOSTRA, die hochauflösende Interpolation der an den DWD-Stationen gemessenen täglichen Niederschlagsdaten REGNIE im 1km-Raster deutschlandweit, die radargestützte quantitative Niederschlagsbeobachtung RADOLAN und das Nowcastingverfahren RADVOR-OP sowie das datengestützte Modell SNOW zur Quantifizierung der Schneeschmelze. Im hydroklimatischen Bereich liegt auf der regionalen Skala der Fokus auf der gebietsbezogenen Quantifizierung des Wasserhaushalts und seiner Komponenten, z.B. der Verdunstung und der klimatischen Wasserbilanz für Flussgebiete. Auf der globalen Skala betreibt die Abteilung das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) zur quantitativen in-situ Niederschlagsüberwachung. Ziele für die kommenden Jahre sind insbesondere die klimatologische Auswertung der Radarniederschlagsdaten sowie eine Verknüpfung der weitmaschigen globalen Rasterdaten des WZN und der hochauflösenden regionalen Datenfelder. Der DWD ist aktiver Partner im Kooperationsvorhaben KLIWA mit den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, und er nimmt federführend die atmosphärische Klimakomponente im Forschungsprogramm KLIWAS des Bundesministers für Verkehr wahr. In diesem Rahmen erfolgt auch eine Auswertung von Klimaprojektionen für die globale und regionale Skala. Schließlich unterstützt die Abteilung die Entwicklung und Validation eines mittelfristigen (dekadischen) Klimaprognosesystems (MiKlip) durch Entwicklung und Bereitstellung geeigneter hydrometeorologischer Referenzdatensätze. Sowohl im Rahmen dieser Vorhaben als auch im generellen Beratungsbereich der Abteilung spielt die Kommunikation der Problematik und Belastbarkeit der Produkte im Klimawandel eine wichtige Rolle.

## **Einleitung**

Bereits seit 1972 betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) seine Organisationseinheit „Hydrometeorologie“, die speziell auf den besonderen Beratungsbedarf der Hydrologie und der Wasserwirtschaft ausgerichtet ist. Ein Hauptbedarfsträger und Partner war und ist von Beginn an die 1949 gegründete Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Dabei wurden vor allem im Bereich der quantitativen Gewässerkunde gemeinsame Anstrengungen unternommen die Klimatologie und den Wasserhaushalt von Flusseinzugsgebieten zur erfassen, zu verstehen und letztendlich auch wasserwirtschaftlich beherrschbar zu machen. Da für viele wasserwirtschaftlichen Aufgaben inklusive dem Hochwasserschutz die Bundesländer zuständig sind, bilden diese eine weitere wichtige Partnergruppe der Abteilung Hydrometeorologie des DWD. Diese Abteilung stellt seit Jahrzehnten die kompetente Ressource für benötigte hydrometeorologische Informationen und Beratung in wasserwirtschaftlichen Fragen dar.

Die Aufgabe Vorsorgender Hochwasserschutz ist dementsprechend im DWD-Gesetz als Kernaufgabe verankert. Die Zusammenarbeit mit den Bundesländern zum Hochwasserschutz begann bereits im Jahr 1994 als der DWD die regelmäßige Lieferung von Vorhersagen für das Land Baden-Württemberg eingerichtet hatte. Die fachliche Beratung und Qualitätsüberwachung wurde der Hydrometeorologie übertragen. In der Nachfolge wurden entsprechende Dienste für alle Hochwasserschutzbehörden der Bundesländer eingerichtet.

Aufgrund der Kooperation mit der behördlichen Wasserwirtschaft wurden bzw. werden im DWD innovative und bedarfsgerechte Produkte entwickelt. Beispiele dafür sind die sog. Echtzeitleistungen mit den die Radaranwendungen RADOLAN (flächendeckende Niederschlagsbeobachtung) und RADVOR-OP (Nowcasting für Starkniederschläge) sowie hydrometeorologische Bilanzmodell SNOW zur Überwachung der Schneeschmelze und des abflussfähigen Wassers. Im Bereich der Hydroklimatologie werden hochauflösend gerasterte tägliche Niederschläge bereitgestellt (REGNIE, 1931 bis heute),. Ein weiteres Produkt sind die statistischen Angaben zur Wiederkehrzeit von Starkniederschlägen mit Andauern von fünf Minuten bis zu drei Tagen (KOSTRA). Auf globaler Skala betreibt der DWD das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN), dessen monatliche Rasterdaten (1901 – heute) frei im Webportal des DWD zugänglich sind. International ist dieses Zentrum unter der Bezeichnung „Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)“ ein Element des globalen Beobachtungssystems GCOS und in das Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) der WMO eingebunden.

Im nationalen Bereich von „Wasser und Klima“ arbeitet der DWD eng mit Einrichtungen der Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz im Verbundvorhaben KLIWA zusammen. Der DWD liefert hierzu flächendeckende Datenanalysen. Die fachliche Herausforderung liegt in der erforderlichen hohen räumlichen Auflösung der gegitterten Beobachtungsdaten sowie in der flussgebietsbezogenen Auswertung. Wichtige Voraussetzungen für eine solche Zusammenarbeit sind das gegenseitige fachliche Verständnis sowie das Weitervermitteln des speziellen Bedarfs der Hydrologie im DWD.

Von 2007 an beteiligte sich der DWD aktiv an der Planung und Einrichtung des Forschungsprogramms KLIWAS (Klimawandel und Wasserstraßen) des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS. Im Rahmen des Vorhabens 1 werden im DWD grenzübergreifende klimatologische Rasterdatensätze bereitgestellt sowie Klimaprojektionen ausgewertet.

Seit Anfang des Jahres beteiligt sich der DWD am BMBF Verbundforschungsvorhaben MiKlip (mittelfristige Klimaprognose) vornehmlich im Bereich der Regionalisierung und Validation des zu entwickelnden dekadischen Klimaprognosemodells.

### **Regionale Niederschlagsüberwachung - RADOLAN**

Der DWD betreibt ein RADAR-Netz zur flächendeckenden quantitativen Niederschlagsbeobachtung in Deutschland. Zur Überwachung auf der nationalen und regionalen Skala werden die im Radarverbundnetz des DWD in Echtzeit erhobenen Daten zur flächendeckenden Niederschlagserfassung mit nominal einem Quadratkilometer Auflösung mit stündlichen Niederschlagshöhen der Niederschlagsstationen des DWD und der beteiligten Bundesländer angeeicht. Das Verfahren hierzu heißt RADOLAN und wurde in enger Kooperation mit den Wasserwirtschaftlichen Verwaltungen der Bundesländer entwickelt.

Hauptziel ist und bleibt eine möglichst genaue, raum-zeitlich homogene und auch konvektive und Starkregen erfassende quantitative Niederschlagsfassung. Der operationelle Routinebetrieb von RADOLAN läuft seit Juni 2005: Die von KU4 entwickelten Niederschlagsprodukte werden bisher von den Hochwasservorhersagezentralen für die Hochwasservorsorge genutzt, sollen aber in Zukunft auch für klimatologische und extremwertstatistische Anwendungen nutzbar gemacht werden.

Die Entwicklung von nutzerfreundlichen Niederschlagsprodukten mit Verfügbarkeitszeiten vom Bereich Nowcasting bis zur Erstellung einer neuen Niederschlagsklimatologie unter Hinzunahme von Fernerkundung (Radar), stellt eine besondere Herausforderung an die Verfahrensentwicklung sowohl heute als auch die nächsten Jahre dar. Dabei gilt die Grundanforderung, immer den maximalen Nutzen aus den bei der Messung gewonnenen Daten zu ziehen. Der bis 2014 abgeschlossene Austausch der derzeitigen Dopplerradarsysteme durch Systeme die zusätzlich auch die polarimetrischen Momente erfassen, wird bis 2020 einen entsprechenden Innovationsschub bei den Quantifizierungsverfahren ermöglichen. Aufgrund der hinzukommenden Kapazität der Hydrometeorerkennung und einer verbesserten Clutterfilterung, welche sich konservativer gegenüber Starkniederschlagsereignissen verhält, birgt die Umstellung der Radarsysteme ein enormes Potential zur Formulierung und Bereitstellung Zeitskalen übergreifender quantitativ hochbelastbarer Niederschlagsprodukte.

### **RADOLAN-Klimatologie**

Zur besseren räumlichen Erfassung von Vorkommen und Veränderung des Auftretens kurzlebiger (konvektiver) Extremniederschläge in Deutschland wird in der Abteilung HM die Entwicklung einer RADAR-gestützten Niederschlagsklimatologie erfolgen. Mit den Arbeiten wurde bereits begonnen. Basis werden die bereits seit Januar 2001 vorliegenden DX Produkte bilden, die mit einer räumlichen Auflösung von 1 km bzw. 1° Azimut und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten mit 256 Intensitätsklassen in den Radar-Reflektivitäten gegenüber den REGNIE Referenzdatensätzen zumindest nominal eine erheblich bessere Auflösung aufweisen. Durch die verbesserte Auflösung ist eine deutlich verbesserte Beherrschung des Erfassungsproblems insbesondere der hydrologisch relevanten Starkregen- bzw. Extremniederschlagsereignisse zu erwarten. Die angestrebte dekadische Re-Analyse der ab 2001 vorliegenden Niederschlagsprodukte unter Nutzung des aktuellen qualitätsgeprüften RADOLAN Verfahrens zur Entwicklung einer flächendeckenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland (inkl. Abschätzung der Unsicherheiten) in einer Auflösung von 1 km / 1h liefert inter-alia eine Referenz für die Evaluierung der Qualität von Klimamodellsimulationen bzgl. extremer Niederschläge. Weitere Anwendungsbeispiele sind die Ermittlung des Schadenspotentials durch Extremniederschlag für die Bevölkerung, und die Planung der Infrastruktur Deutschlands im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie. Für Letzteres bietet die RADOLAN Klimatologie eine substantiell verbesserte Planungsgrundlage für eine ‚wassersensible‘ Raumgestaltung in der Landschafts- und Stadtplanung, als Instrument des vorbeugenden Hochwasserschutzes und als eine Grundlage der Erosionsüberwachung in der Landwirtschaft.

### **Das Schneeschmelzmodell „SNOW“**

Das anwendungsorientierte Verfahren SNOW4 berechnet Analyse- und Vorhersagewerte des Wasseräquivalents (in der Schneedecke enthaltene Wassermenge) und des Niederschlagsdargebots (Summe des aus der Schneedecke abfließenden Wassers, gebildet durch Regen und Schneeschmelze). Der

Analysezeitraum schließt die zurückliegenden 30 Stunden ein, der Vorhersagezeitraum umfasst 66 bzw. 72 Stunden. SNOW4 liefert alle sechs Stunden aktualisierte Werte, der interne Rechenschritt beträgt eine Stunde in einem Rechengitter mit ca. 1 km horizontalem Abstand. Die Ergebnisse werden als Eingangsgröße für hydrologische Abflussmodelle genutzt, die den Wasserstand von Flüssen prognostizieren und mit deren Hilfe eine rechtzeitige Warnung bei Hochwassergefahr ausgegeben werden kann.

## **Untersuchungen zum Klimawandel**

Die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse von Klimaprojektionsläufen für Planungen von Anpassungsmaßnahmen sollten sich auf Grund der Unsicherheiten in den Klimasimulationen nicht auf einzelne Modellläufe stützen. Daher werden möglichst viele Projektionen gesammelt und kollektiv ausgewertet. Diese Vorgehensweise wird als Ensembleansatz bezeichnet.

Um die Voraussetzungen für die Anwendung der Ensembletechnik für Europa zu schaffen, wurde u.a. im Jahr 2004 das EU-Projekt ENSEMBLES initiiert. Mit Hilfe dieses Projektes wurden die globalen und regionalen Klimamodelle mehrerer europäischer und außereuropäischer Forschungseinrichtungen miteinander kombiniert, um eine größtmögliche Unabhängigkeit zwischen den Modellen zu gewährleisten. Eine mögliche Darstellung der Ergebnisse von Klimaprojektionsensembles sind Perzentile. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte, die nur von einer bestimmten Anzahl aller ausgewerteten Simulationen überschritten werden. Somit kann eine Grenze, die so gut wie sicher überschritten wird, und eine obere Schranke für unwahrscheinlich drastische Änderungen definiert werden. Die Ergebnisse zwischen diesen Schranken können dann als relativ sicher angenommen werden.

Im Rahmen des BMVBS Forschungsprogramms KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) erstellt der DWD u. a. die Datenbasis für belastbare Auswertungen von Klimaprojektionsensembles. Für KLIWAS stehen aus dem EU-Projekt ENSEMBLES aktuell über 30 regionale Klimasimulationen zur Verfügung. Die Auswertungen beinhalteten ein Downscaling der Projektionen auf ein einheitliches 5km x 5km Gitter und eine Bias-Korrektur der modellinternen Fehler.

Neben den langfristigen Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert gewinnen kurzfristigere Prognosen für die Politik und Wirtschaftsplanung immer größere Bedeutung. Jenseits der Wettervorhersage für die nächsten Tage klafft bisher im Zeitbereich zwischen etwa zehn Tagen und wenigen Jahrzehnten eine große Lücke. Sie zu schließen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt der Meteorologen. Zwar gelingt es nicht, für diesen Vorhersagehorizont das genaue Wetter im Einzelnen zu berechnen. Immerhin aber sind Aussagen zur Häufigkeit verschiedener Wetterlagen möglich. Daraus lässt sich wiederum der grundsätzliche Witterungscharakter für eine bestimmte Region ableiten. Solche Abschätzungen sind sehr wichtig für Anpassungsstrategien, Risikomanagement und die Planung von Infrastrukturmaßnahmen. Die erreichbare Genauigkeit nimmt natürlich ab, je weiter man in die Zukunft blickt. Bei der Monats- und Jahreszeitevohersage gelingt es noch bis zu einem gewissen Grad, den tatsächlichen Witterungsverlauf zu erfassen. So lassen sich für einige meteorologische Messgrößen wie die Temperatur oder den Niederschlag die mutmaßlichen Abweichungen von den normalen Werten für eine Jahreszeit inzwischen im Voraus bestimmen. Bei der Monatsvorhersage geschieht das typischerweise für einzelne Kalenderwochen, im Falle saisonaler Prognosen zumeist auf Basis von Kalendermonaten. Klimasimulationen erlauben dagegen nur, die über längere Zeiträume hinweg vorherrschenden

den großräumigen atmosphärischen Strömungsverhältnisse zu berechnen. Doch auch daraus lassen sich zumindest qualitative Aussagen über die Witterungsverhältnisse für Regionen unterhalb der Größenordnung ganzer Kontinente ableiten. Es ist also prinzipiell möglich vorherzusagen, ob etwa in Deutschland in einzelnen Jahren besonders kalte Winter oder besonders heiße Sommer auftreten. Ebenso besteht die Hoffnung, Dürreperioden oder großräumige Flutereignisse im Sinne einer Wahrscheinlichkeitsaussage frühzeitig zu erkennen.

Im Rahmen eines BMBF Verbundforschungsvorhabens soll in den nächsten drei Jahren der Prototyp eines mittelfristigen Klimaprognosesystems (MiKlip) entwickelt und validiert werden. Hieran beteiligt sich die Abteilung durch das auch beim WZN angesiedelte Teilprojekt DAPACLIP mit der Entwicklung und Bereitstellung eines bi-dekadischen globalen Referenzniederschlagsdatensatzes welcher zur Validation des MiKlip Systems herangezogen wird. Wenn das resultierende MiKlip System im ‚hindcast‘ Modus nachweislich einen Prognosefähigkeit aufweist, wird es im DWD operationalisiert um das Portfolio der DWD Klimaservices für den für viele Kunden so wichtigen dekadischen Vorhersagezeitraum zu erweitern.

### **Globale Analysen des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie**

Mit seinem weltweit größten Archiv qualitätsgesicherter monatlicher in-situ Niederschlagsbeobachtungen besitzt das vom DWD seit 1989 betriebene Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN, engl. Abkürzung GPCC) eine einmalige und weltweit anerkannte Kompetenz im Bereich der globalen Analyse und Überwachung des Landoberflächenniederschlags. Im Hinblick auf unterschiedliche Kundenanforderungen stellt das WZN verschiedene Analyseprodukte frei im Internet bereit. So bietet zum Beispiel die sog. „Full Data Reanalyse“ seit 1901 einen Referenzdatensatz für ein weites Spektrum hydro-klimatologischer Anwendungen welche auf ein möglichst umfangreiches Stationskollektiv zurückgreifen möchten. Beispielhaft sei hier die retrospektive Betrachtung von Regionen wo der Niederschlag gegen Ausprägungen globaler Zirkulationsmuster wie der El-Niño Southern Oscillation (ENSO) und der Northern Atlantic Oscillation (NAO) besonders sensitiv ist. Hierzu kann die Korrelation der Niederschlagszeitreihen jedes WZN Reanalyserasters mit dem zeitlichen Verlauf der ENSO und NAO Indizes seit 1901 herangezogen werden. Eine weitere zentrale Anwendung der WZN Produkte liegt in der in-situ gestützten Trendanalyse des Niederschlags. Hier spielt die zeitliche Homogenität der zugrundeliegenden Stationsmessungen eine wesentlichere Rolle als der Umfang des Stationskollektivs, weshalb bei der Erstellung des VasCLIMO Produktes und seines Nachfolgers HOMPRO (Homogenized Precipitation Analysis) des WZN auf ein wesentlich kleineres Kollektiv mit weitgehend homogenen Stationszeitreihen zurückgegriffen wird.

Ursprünglich ist das WZN jedoch zur regulären Bereitstellung monatlicher Analyseprodukte in Quasi-Echtzeit begründet worden. Das entsprechende qualitätsgesicherte Monitoringprodukt findet Verwendung als Referenzdatensatz für den globalen Landoberflächenniederschlag bei der Erstellung globaler Satellitengestützter quantitativer Niederschlagsdatenprodukte. Um zum Zwecke der Dürrewarnung bereits drei Tage nach Vollendung eines Monats ein gerastertes Datenprodukt verfügbar machen zu können, wird eine vorläufige Version des MP als ‚First-Guess‘-Produkt an spezielle Nutzer direkt zugestellt.

Durch die Hinzunahme von Tagesdaten in seine Aquire- und Analyseaktivitäten wird das WZN in den nächsten Jahren das Portfolio seiner Datenprodukte auf Tagesanalysen erweitern. Dies erfolgt auf An-

forderung von verschiedenen Nutzergruppen aus dem Bereich satellitengestützter Fernerkundung (Bereitstellung von Referenzdatensätzen mit täglicher Auflösung), Klimamodellvalidation (MiKlip), globale und europäische Extremwertanalyse (High Impact Weather) und schnellerer weil höher frequentierte Dürrewarnung.

## **Climate Services**

Durch die Bereitstellung nutzerspezifischer hydro-klimatologischer Produkte unterstützt die Abteilung Hydrometeorologie das Klimadienst-Konzept nach welchem der Geschäftsbereich Klima und Umwelt des DWD seine Kapazitäten und Prozessabläufe organisiert hat.. Darüber hinaus stellt die exzellente Zusammenarbeit der Abteilung Hydrometeorologie des DWD mit den speziellen Kunden der Wasserwirtschaft, der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und den für den Hochwasserschutz verantwortlichen Bundesländern ein ‚best practice‘ Beispiel für die nationale Implementierung des sog. Global Framework for Climate Services (GFCS) dar. Diese ist durch die WMO Mitgliedsstaaten ins Leben gerufen worden, um Nutzer und Anbieter von Klimadiensten näher zusammenzubringen. Vier Anwendungsgebiete werden dabei als prioritär angesehen, u.a. der Bereich der Wasserwirtschaft. Dank seiner hydrometeorologischen Leistungen ist der DWD in einer ausgezeichneten Position bei der Implementierung des GFCS nicht nur formal sondern auch inhaltlich eine nationale koordinierende Rolle zu spielen.

## **Ergänzende und spezielle Informationen zu hydrometeorologischen Angeboten des DWD finden Sie in diesem Heft unter folgenden Beiträgen**

Imbery, Florian; Plagemann, Sabrina; Namyslo, Joachim, 2012: Aufbereitung und Verifizierung von regionalen Klimaprojektionsdaten für das Ressortforschungsprogramm KLIWAS'

Malitz, Gabriele, 2012: Änderung von Bemessungsniederschlag - relevant in Hydrologie und Meteorologie

Rauthe, Monika, 2012: Hydrologisch relevante Rasterdatensätze (HYRAS) für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe

Riediger, Ulf, 2012: Niederschlagsanalyse objektiver Wetterlagen in Klimasimulationen

## **Links**

Deutscher Wetterdienst: <http://www.dwd.de/>

WZN: <http://wzn.dwd.de>

KLIWAS: [http://www.kliwas.de/cln\\_030/sid\\_8909A31C9739F3FA85216D47397345BD/KLIWAS/DE/Home/homepage\\_\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.kliwas.de/cln_030/sid_8909A31C9739F3FA85216D47397345BD/KLIWAS/DE/Home/homepage__node.html?__nnn=true)

Kooperationsvorhaben KLIWA: <http://www.kliwa.de/Verbundforschungsvorhaben>

MiKlip – Modul E, Validierung: <http://www.fona-miklip.de/de/257.php>

Fachausschuss Hydrometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft:  
[http://www.dmg-ev.de/fachausschuesse/Hydrometeorologie/hydro\\_index.htm](http://www.dmg-ev.de/fachausschuesse/Hydrometeorologie/hydro_index.htm)

# **Grenzen der hydrologischen Modellierung? Eine retrospektive Analyse des Extremhochwassers im Lötschental, Schweiz, im Oktober 2011**

O. Rössler<sup>1</sup>, P. Froidevaux<sup>2</sup>, U. Börst<sup>3</sup>, R. Rickli<sup>4</sup>, O. Martius<sup>2</sup> und R. Weingartner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Oeschger Zentrum für Klimaforschung, Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut, Universität Bern, Schweiz

<sup>2</sup> Mobiliar Gruppe für Klimafolgenforschung, Geographisches Institut, Universität Bern, Schweiz

<sup>3</sup> Geographisches Institut, Universität Bonn, Deutschland

<sup>4</sup> BKW FMB Energie AG, Bern, Schweiz

## **Einleitung**

Am Morgen des 10. Oktobers 2011 traten in den Einzugsgebieten der Kander und der Lütshine im Berner Oberland sowie im Lötschental im Oberwallis der Schweiz die Flüsse unerwartet stark und rasch über die Ufer und die Wassermassen führten insbesondere in den kleinen Seitenbächen teils erhebliche Geschiebefrachten mit sich. Zudem traten im Kander-Einzugsgebiet Verklausungen auf, wodurch grosse Teile der Ortschaft Mitholz überschwemmt und eine Eisenbahnstrecke unterhöhlt wurden. Im Lötschental, welches sich auf der Leeseite der Alpenhauptkette des Berner Oberlandes erstreckt, schollen die Wildbäche auf dem nördlichen, südexponierten Hang drastisch an und erzeugten innerhalb von wenigen Stunden grosse Schwemmfächer. Dagegen zeigten die ähnlich grossen Seitenwildbäche auf den nordexponierten Hängen keine grosse Reaktion und führten auch keine ungewöhnlichen Geschiebemengen mit sich mit.

Schnell wurde in der Öffentlichkeit die Frage aufgeworfen, wie es zu diesem grossen Ereignis kommen konnte und warum es in den Stunden zuvor keine Hochwasserwarnung gegeben hatte. Tatsächlich gab es keine Hochwasserwarnung, da die Modelle der zuständigen Behörden nur eine maximal zweijährliche Hochwasserspitze vorhergesagt hatten.

In dieser Studie soll das Extremhochwasser sowie die zugrunde liegenden meteorologischen und hydrologischen Prozesse ergründet werden. Darüber hinaus soll die Frage beantwortet werden, warum dieses Ereignis nicht in den Vorhersagemodellen abgebildet werden konnte und wo die Schwachstelle in der Modellkette aus meteorologischem Vorhersagemodell sowie hydrologischem Modell zu suchen ist. Dazu wurde das Ereignis im Lötschental retrospektiv von Meteorologen, Klimatologen und Hydrologen untersucht und das Prozesssystem nachgebildet.

## **Untersuchungsgebiet**

Das Lötschental ist ein nördliches Seitental des Rhonetals im Oberwallis mit einer Vergletscherung von rund 18 %). Es erstreckt sich in südwestlich-nordöstlicher Richtung entlang des ersten Alpenhauptkammes und liegt bei Anströmung aus Nordwest im Lee der Berner Alpen (vgl. Abbildung 1). Die Lonza mit glazio-nivalem Abflussregime entwässert das rund 160 km<sup>2</sup> grosse Einzugsgebiet in die Rhone. Das Lötschental erstreckt sich von 600 m üM am Talausgang bis zu den höchsten Bergspitzen auf rund 4000 m üM. Das Klima auf 1500 m üM ist durch eine Jahresdurchschnittstemperatur von 4.9 °C sowie eine Jahresniederschlagssumme von 1120 mm

gekennzeichnet (Börst, 2005). Etwa 40 % dieses Jahresniederschlages fällt dabei als Schnee (Schmidt et al., 2009). Der Abfluss wird im Zentrum des Tales vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) gemessen (Abbildung 1, rechts). Zudem befindet sich ein Stausee im Lötschental (siehe Abbildung 1), dessen Zuflussdaten während des Ereignisses dankenswerterweise von der Betreibergesellschaft zur Verfügung gestellt wurden.

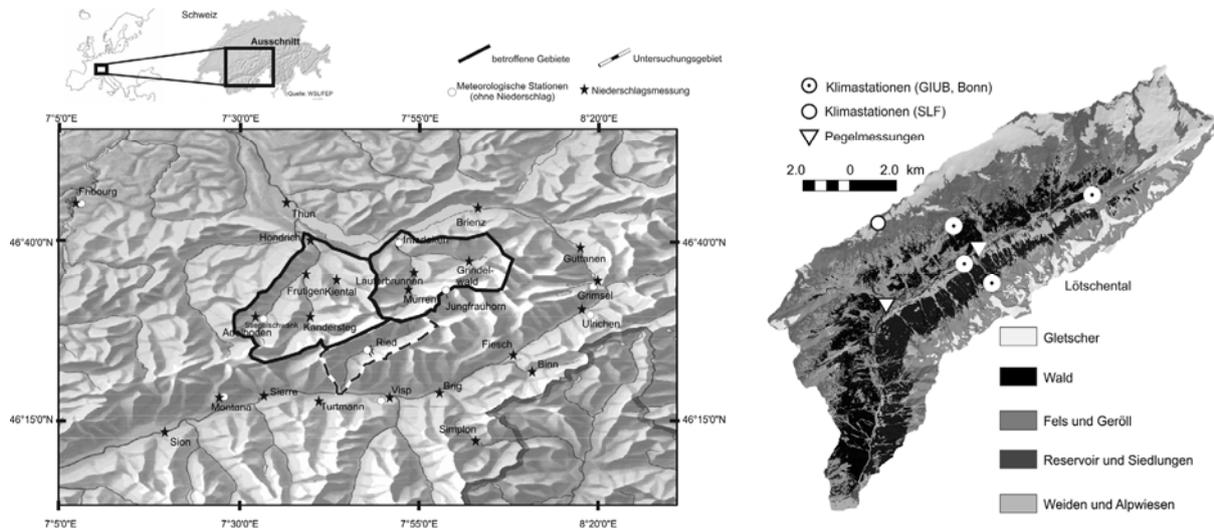


Abb. 1: Die Lage des Untersuchungsgebietes Lötschental in den Schweizer Alpen, sowie die angrenzenden, ebenfalls betroffenen Einzugsgebiete Kander und Lüscherne (links). Zudem das Lötschental, die Lage der Messstellen sowie die Landbedeckung

### Makro- und mesoskalige meteorologische Situation des Extremereignisses

Abbildung 2 fasst die Ergebnisse der ECMWF-Analyse zusammen. Um die meteorologische Situation zum Zeitpunkt des Hochwasserscheitels zu erklären, wurde die makroskalige Situation drei Tage vor dem Ereignis analysiert. Dabei zeigt der scharfe SW-NE Gradient- ausgedrückt durch die Enge Scharung der Isothermen - in der äquipotentiellen Temperatur auf 850 hPa am 7.10.2011 am frühen Morgen das Auftreffen einer Kaltfront. Im Rücken dieser Front fielen ausgiebige Niederschläge in Form von Schnee. Starke Winde aus Nordwesten transportierten trotz des relativ geringen absoluten Wassergehaltes der Atmosphäre grosse Mengen an Wasserdampf gegen die Alpen.

Am 9. Oktober brachte eine ausgeprägte Warmfront warme und sehr feuchte Luft in die Schweizer Alpen (Abbildung 2, c und i). Diese Front zeichnete sich vor allem durch eine rasche Temperaturzunahme aus, die sich durch einen Anstieg der Null-Grad-Grenze von 1500 m bis auf 3000 m am Montagmorgen (10.10.2011, 0:00 UTC) belegen lässt.

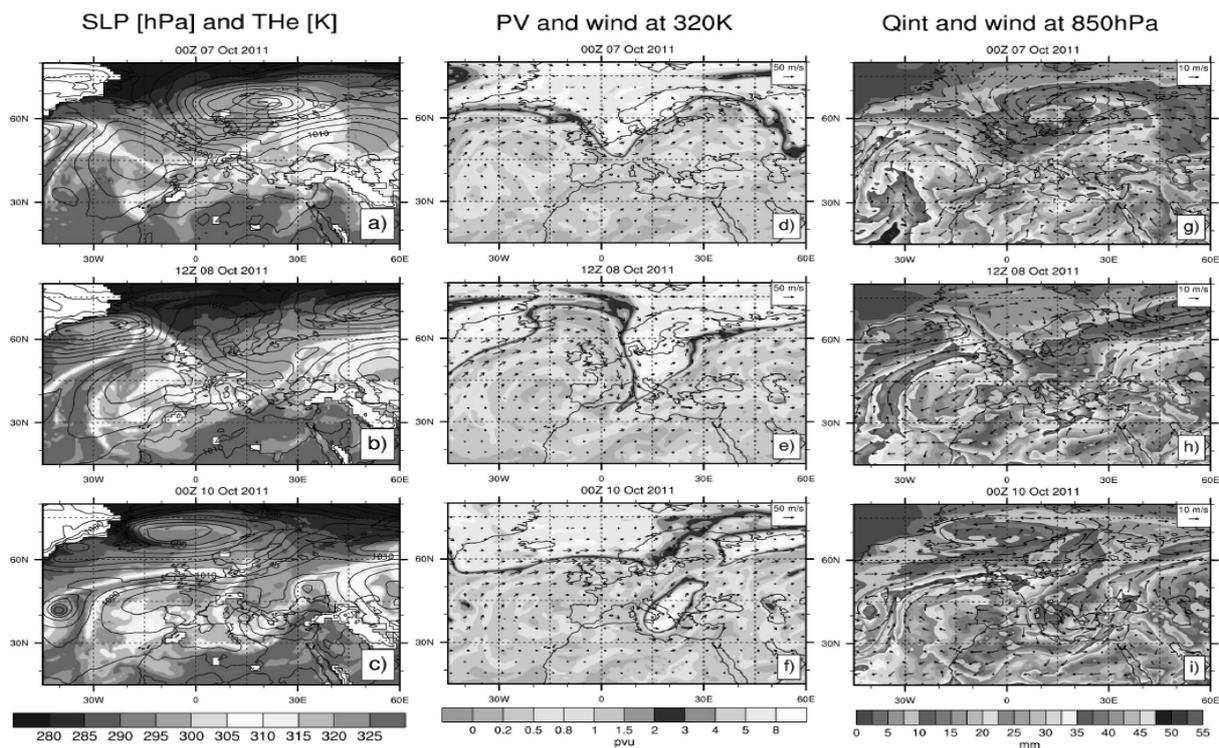


Abb. 2: ECMWF – Analysedaten vom 07.10.2011 0:00 UTC Uhr, 8.10.2011 12:00 UTC und vom 10.10.2011 0:00 UTC. Die linke Spalte zeigt die äquipotentielle Temperatur bei 850 hPa (The [K], a-c) zusammen mit dem auf Meereshöhe reduzierten Luftdruck (QFF, hPa, durchgezogene Linien). Die mittlere Spalte zeigt die potentielle Wirbelgrösse [in PV-Units] und das Windfeld (Pfeile [m/s] ) auf der 320 Kelvin-isentropen Fläche (d-f). Die rechte Spalte stellt den vertikalen, integrierten Wassergehalt (Qint [mm]) mit dem Wind auf 850 hPa (Pfeile) dar (g-i).

## Lokale Meteorologie

Die im Tal und auf der nördlichen Bergkette gelegenen meteorologischen Messstationen ermöglichen eine detaillierte Beschreibung der lokalen Effekte der meteorologischen Situation realisieren. So zeigt die Station Gandegg (Daten SLF), die in 2717 m üM sehr nahe der nördlichen Bergkette liegt, einen Aufbau der Schneedecke vom Abend des 7.10.2011 (schneefrei) bis zum 10.10.2011, 1:00 Uhr (110 cm Schneemächtigkeit). Dann setzt durch den Anstieg der Nullgradgrenze eine intensive Schmelze des Schnees ein. Die Mächtigkeit der Schneeschicht geht von anfänglich 110 cm am Morgen auf 40 cm am Montagmittag zurück. Die Summe der starken Niederschläge, die mit der Warmfront eintreffen und etwa zur gleichen Zeit fallen wie die Schneedecke schmilzt, beläuft sich in der gleichen Zeit auf 140 mm. Somit wurde innerhalb von 12 Stunden eine Wassermenge freigesetzt, die rund 210 mm Niederschlag entsprechen. Weitere Messungen an von meteorologische Stationen an den Hängen des Lötschentals (GIUB Bonn, U. Börst) dokumentieren die lokale Variation des Niederschlags. Am selben Hang, rund 500 Meter tiefer gelegen, betrug die Schneemächtigkeit um Mitternacht 65 cm. Am Mittag des 10.10.2011 lagen noch 20 cm Schnee. Zudem war die Regensumme war kleiner als an der Station Gandegg. Gleichzeitig konnte auf dem nordexponierten Hang auf 2200 m ü.M zwar ebenfalls ein ähnlich grosser Schneedeckenaufbau beobachtet werden,

allerdings sind die gefallenen Regenmengen am Morgen des 10.10.2011 deutlich geringer. Diese Verteilung erklärt die geringeren Abflüsse am nordexponierten Hang. Gleichzeitig geben die Winddaten Hinweise auf eine Erklärung der Ursache dieser lokalen Verbreitungsmuster. Es ist wahrscheinlich, dass die thermische Schichtung und die horizontale Windgeschwindigkeit zu einem Lee-Rotor führten, wie er bei *banner clouds* auftritt. Als Folge dieses Rotors überstich feuchte Luft mit einem Taupunkt von null Grad und mehr die Schneedecke. Jedes Gramm Wasserdampf, das kondensierte, setzte 7 Gramm Wasser frei, das den Porenraum der Schneedecke füllte. Diese sehr rasche Aufzehrung des Schnees und der gleichzeitig fallende Niederschlag führen direkt zum Oberflächenabfluss und sorgten für das drastische Anschwellen der Wildbäche.

## Hydrologische Auswirkungen

Der Abfluss der Lonza wurde mit dem physikalisch basierten, distributiven Model WaSiM-ETH (Version 8.0.10, Schulla und Jasper 2007) reanalysiert, anhand der offiziellen Messungen validiert und die Abflüsse der Seitenbäche simuliert. Für diese Studie verwendeten wir ein kalibriertes (2001-2002) und validiertes (2006-2007) Modell, das in einer vorangegangenen Studie angewandt wurde. Abbildung 3 zeigt die Simulation von Temperatur und Niederschlag, Schneedecke, Bodenfeuchte und Abfluss der Lonza vom 1.10.2011 bis zur Abflussspitze (Abbildung 3). Nach einigen Tagen unter stabilem Hochdruckeinfluss, bei dem nur die typischen, gletscherschmelzbedingten Tagesschwankungen des Abflusses zu erkennen sind (sowohl in den Beobachtungen als auch in den Simulationen), beginnt mit dem Eintreffen der Kaltfront der Schneedeckenaufbau. Mit dem Temperaturanstieg und einer gleichzeitigen Schneeschmelze in der Nacht vom 9.10. auf den 10.10.2011, steigt der Abfluss sehr sprunghaft bis auf 65 m<sup>3</sup>/s an.

In einer ersten Simulation, bei der wir das kalibrierte Model nicht veränderten, wurde der Abfluss in der Talmitte stark unterschätzt. Nach Anpassung eines Parameters (Abfluss der Schneeschmelze, der direkt zum Abfluss führt), konnte eine sehr viel bessere Beschreibung des Abflusses erreicht werden. Obwohl für dieses Ereignis diese Parameteranpassung sinnvoll erscheint, kann sie jedoch nicht für die Simulation der Normalsituation verwendet werden. Zudem wurde bei diesen Simulationen noch nicht die beobachtete räumliche Verteilung, sondern eine gleichmäßige, höhenabhängige Regression der Niederschläge verwendet.

Der Gesamtabfluss am Stausee – dieser beinhaltet alle Seitenwildbäche und die am stärksten betroffenen Gebiete – kann jedoch nur unter Verwendung des oben beschriebenen Verteilungsmusters des Regens annähernd beschrieben werden. Wir präsentieren verschiedene Ansätze um das räumliche Verteilungsmuster der beobachteten Niederschläge im hydrologischen Modell zu berücksichtigen. Die Auswirkungen auf die Abflussmenge im Gesamtabfluss und in den Seitenbächen der verschiedenen Talseiten werden gezeigt und die Realisierbarkeit einer hydrologischen Hochwasserwarnung bei einem solch lokalen Ereignis wird diskutiert. Es wird deutlich, dass das Modell die geschätzte Abflussmenge eines Seitenbaches (30 m<sup>3</sup>/s, pers. Auskunft Sailer), nicht abbilden kann. Abschliessend wird das Modell durch die Cosmo-2-Verhersagen angetrieben und mit den Ergebnissen der vorangegangenen Simulationen verglichen.

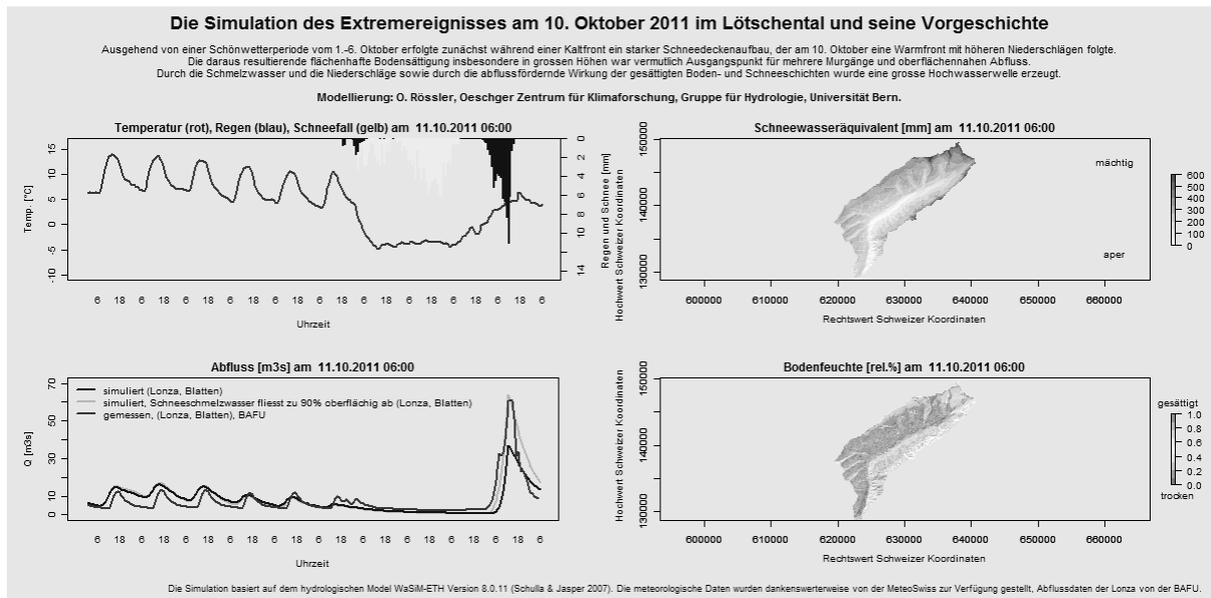


Abb. 3: Simulation des Extremereignisses vom 10. Oktober 2011 im Lötschental und seine Vorgeschichte. Simuliert wurden die Temperatur sowie der Flüssig- und Festniederschlag (oben links), das Schneewasseräquivalent (oben rechts), die Bodenfeuchte (unten rechts), sowie der gemessene Abfluss und der simulierte Abfluss von zwei verschiedenen Modellläufen.

## Schlussfolgerungen

In dieser Studie konnte durch einen interdisziplinären Ansatz mit Experten aus Meteorologie, Klimatologie, Hydrologie, Forschung und Praxis die gesamte Ereigniskette von der makro- und mesoskaligen meteorologischen Entstehungsgeschichte des Ereignisses über die lokalen meteorologischen Phänomene und Auswirkungen sowie die resultierenden hydrologischen Folgen dargelegt und erklärt werden. Darüber hinaus wird aufgezeigt dass dieses Regen-auf-Schnee-Ereignis in einem physikalisch-basierten hydrologischen Modell nur teilweise, d.h. für den Gesamtabfluss unter Zuhilfenahme der gemessenen meteorologischen Daten abgebildet werden kann - und dies auch nur nach einer ersten Parameteranpassung, die im sonstigen Jahresgang abwegige Resultate liefert. Zudem kann die Abflussmenge in den Seitenbächen nur unzureichend abgebildet werden. Darüber hinaus konnte die lokale meteorologische Situation nur retrospektiv anhand der Station Gandegg beschrieben werden. Die Möglichkeiten und Grenzen der meteorologischen und der hydrologischen Modelle wurden dargestellt und vor dem Hintergrund der Vorhersagbarkeit von solchen lokalen Extremereignissen diskutiert.

Dem BAFU, der SLF, der KW Lötschen AG, Steg, sowie dem GIUB der Uni Bonn sei großer Dank für die Bereitstellung der Daten gesagt.

## Literatur

- Börst, U., 2005. Nachhaltige Entwicklung im Hochgebirge. Eine Systemanalyse von Mensch-Umwelt-Szenarien im Lötschental (Zentral-Alpen). PhD-Thesis, Uni Bonn, Bonn.  
<http://hss.ulb.uni-bonn.de:90/2006/0710/0710-dt.htm>. last access date 13.01.2011.
- Schmidt, S., Weber, B., Winiger, M., 2009. Seasonal snow coverage depletion in alpine environments: micro- to mesoscale statistical modeling (Loetschental, Switzerland). *Hydrological Processes* 23, 1041–1051.

# **Verbesserung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems im Einzugsgebiet von Mosel und Saar**

Inga Gellweiler

Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar (IKSMS), Projekt FLOW MS, Trier, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des INTERREG IV-A-Projekts FLOW MS wird unter der Federführung der Internationalen Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar (IKSMS) von den Wasserwirtschaftsverwaltungen Frankreichs, Luxemburgs und Deutschlands (Rheinland-Pfalz und Saarland) an der Verbesserung und Erweiterung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems gearbeitet. Neben der Optimierung des gemeinsam genutzten Vorhersagemodells LARSIM findet ein enger Austausch zwischen den Prognostikern statt, um die Hoch- und Niedrigwasservorhersage zu verbessern. Mögliche Szenarien des Klimawandels werden hierbei integriert. Neben den Einsatzkräften der Gefahrenabwehr, die von den Verbesserungen der Vorhersage und der Frühwarnung profitieren, werden in den Hochwasserpartnerschaften auch den unmittelbar vom Hochwasser betroffenen Kommunen und ihrer Bevölkerung Module zur Verringerung der Hochwasserschäden bereitgestellt.

## **Einleitung**

Die Hochwasserereignisse im Winter 2010/2011 und die Niedrigwassersituation 2011 haben gezeigt, dass Hoch- und Niedrigwasser immer wieder aktuelle Themen sind. Die Notwendigkeit hier über Grenzen hinweg zu agieren, liegt auf der Hand. Die Sensibilisierung der Anrainer für die Herausforderungen und Risiken von Hoch- und Niedrigwasser sowie die Verbesserung der nachhaltigen Vorsorge gehören deshalb zu den vorrangigen Zielen der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit im Einzugsgebiet von Mosel und Saar. Bereits seit über 50 Jahren hat diese grenzüberschreitende Zusammenarbeit in den Internationalen Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar (IKSMS) einen institutionellen Rahmen gefunden, der sich bewährt hat.

Ein wesentlicher Schwerpunkt ist dabei die Verbesserung der grenzüberschreitenden Hochwasservorhersage. Im Moseleinzugsgebiet beruht diese internationale Zusammenarbeit und Vernetzung der Vorhersagezentralen auf einem Regierungsabkommen zum Hochwassermeldewesen vom 1. Oktober 1987 zwischen Deutschland, Frankreich und Luxemburg. Die grenzüberschreitende Zusammenarbeit wurde zwischenzeitlich deutlich intensiviert. Ziel der Ausführungsvereinbarung vom 20. März 2007 zwischen den Regierungsvertretern aus Deutschland, Frankreich und Luxemburg ist die Verbesserung des Hochwassermeldewesens an Mosel und Saar sowie die Förderung des Informationsaustauschs zwischen den mit der Hochwasservorhersage betrauten Dienststellen. Mit der Umsetzung der Vereinbarung ist ein Technischer Ausschuss beauftragt, in dem alle Hochwasservorhersagezentralen des Einzugsgebietes vertreten sind. Im Rahmen des INTERREG IIIB-Projekts „TIMIS Flood“ wurden die Hochwassergefahrenkarten für die rheinland-pfälzischen und luxemburgischen Gewässerabschnitte mit signifikantem Gefahrenpotential ausgeweitet. Als Nachfolgeprojekt und als wichtigen Beitrag zur

Umsetzung der HWRM-RL gibt es seit 2009 das INTERREG IV-A-Projekt „Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet - FLOW MS“ (Weidenhaupt et al. 2011).

## **Das Projekt FLOW MS**

Unter der Federführung der IKSMS haben im Jahr 2009 vier Partner aus Frankreich, Luxemburg und Deutschland gemeinsam das grenzüberschreitende Projekt „Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet - FLOW MS“ im Rahmen des INTERREG IV-A-Programms „Großregion“ ins Leben gerufen.

Das Projekt läuft noch bis Ende 2013 und hat ein Gesamtbudget von 3,35 Millionen Euro, die zur Hälfte aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und zur Hälfte von den Projektpartnern, dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (MULEWF), der Regionalen Behörde für Umwelt, Raumplanung und Wohnungswesen Lothringen (DREAL Lorraine), der Wasserwirtschaftsverwaltung Luxemburg (AGE) und dem Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr des Saarlandes (MUEV), finanziert werden.

Die Ziele des Projekts FLOW MS sind die Verbesserung der Hochwasservorsorge, die Verringerung von potentiellen Hochwasserschäden und das Schaffen eines Niedrigwassermanagements im Mosel- und Saareinzugsgebiet. Diese Ziele sollen erreicht werden, durch:

- Verbesserung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems
- Anpassung des Hoch- und Niedrigwassermanagements an die Auswirkungen des Klimawandels
- Stärkung der Eigenvorsorge der Kommunen, ihrer Verbände und der betroffenen Bevölkerung und
- eine verbesserte grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Hochwasserschutz

Die Umsetzung dieser Ziele erfolgt durch fünf Aktionen, in die sich das Projekt gliedert, und die jeweils ein Aufgabengebiet abdecken. In der Aktion 1 geht es um die Einrichtung von Hochwasserpartnerschaften entlang eines Gewässers. In diesen Partnerschaften werden beispielsweise die Hochwassergefahren und -risikokarten plausibilisiert, die Hochwasservorhersage und Frühwarnung erläutert, sowie die Möglichkeiten des hochwasserangepassten Planens, Bauens und Sanierens kommuniziert (Aktion 2). Die Aktion 3 beschäftigt sich mit der Verbesserung der Hochwasservorhersage im Einzugsgebiet von Mosel und Saar. In der Aktion 4 werden mit dem weiterentwickelten Wasserhausmodell LARSIM regionale Klimaszenarien berechnet, um so mögliche zukünftige Hoch- und Niedrigwasserabflüsse zu ermitteln sowie Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Aktion 5 hat zur Vernetzung der Hochwasserpartnerschaften untereinander und zur Bereitstellung von Informationen eine zweisprachige, innovative Kooperationsplattform ([www.flow-ms.eu](http://www.flow-ms.eu)) aufgebaut, ein Webseiten-generator und ein GeoExplorer zur individuellen Kartengestaltung und -publikation entwickelt und in die Kooperationsplattform integriert.

## **Verbesserung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems**

Bereits mit der Ausführungsvereinbarung von 2007 wurde festgelegt, dass es einen umfassenden Austausch von hydrologischen und hydrometeorologischen Daten sowie von Informationen zur Stauregulierung an Mosel und Saar, eine gemeinsame Entwicklung und Anwendung von hydrologischen Modellen und Systemen zur Hochwasservorhersage, die Verbesserung und Ausweitung des Informations- und Erfahrungsaustauschs, die Durchführung von regelmäßigen, grenzüberschreitenden Alarmübungen und die zweisprachige Weiterbildung im Bereich der Hochwasservorhersage geben soll (IKSMS 2011). Im Jahr 2008 stärkt das „Übereinkommen über die Zusammenarbeit bei Pflege und Support für das transnationale Hochwasservorhersagesystem LARSIM“ die bereits existierende Kooperation. So kommt das Hochwasservorhersagesystem LARSIM in den Hochwassermeldezentren in Metz/Nancy, Straßburg, Luxemburg, Grevenmacher, Trier, Saarbrücken und Mainz zur operationellen Anwendung und ist ein zentraler Baustein der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit im Bereich von Hochwassermeldedienst und Hochwasservorhersage. Bereits im Rahmen des INTERREG IIIB-Projekt „TIMIS Flood“ (Transnational Internet Map Information System on Flood) erfolgte eine Kalibrierung von LARSIM für das Moseleinzugsgebiet. Aktuelle meteorologische Vorhersagen und hydroklimatologische Messdaten werden kontinuierlich eingebunden. Da die Hochwasservorhersage ein Bereich ist, der ständig weiterentwickelt wird und in dem es hochwertiger Instrumente und guter fachlicher Kenntnisse bedarf, finden regelmäßig internationale Fortbildungen und Übungen im Bereich der Hochwasservorhersage und zur Nutzung des Vorhersagemodells statt. In den letzten Jahren erfolgte eine Modernisierung der Messnetze und in allen Vorhersagezentralen wurde in die technische Infrastruktur zum Datentransfer investiert (IKSMS 2011). Dank FLOW MS wird die bereits bestehende Zusammenarbeit zwischen den französischen, deutschen und luxemburgischen Vorhersagediensten weiter gestärkt. Zur Bestätigung dieser Zusammenarbeit wurde am Rande der Halbzeitveranstaltung des Projekts FLOW MS im Herbst 2011 ein neues „Übereinkommen über die Zusammenarbeit bei Pflege und Support für das transnationale Hochwasservorhersagesystem LARSIM“ abgeschlossen.

Der Informationsaustausch zwischen den Hochwasservorhersagezentralen im Einzugsgebiet von Mosel und Saar erfolgt über die Informationsaustauschplattform PLATIN MS (PLATInformationsaustausch der Hochwasservorhersagezentralen im Einzugsgebiet von Mosel und Saar). Zur Sicherstellung der Verfügbarkeit werden zwei PLATIN FTP-Server in Mainz und Saarbrücken betrieben. Zurzeit werden im Rahmen der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit Messdaten von 13 Betreibern mit mehr als 300 Stationen sowie meteorologische Vorhersagen über die FTP-Server verteilt. PLATIN MS ermöglicht es, innerhalb eines geschlossenen Anwenderkreises, formularbasierte Meldungen sowie formlose Nachrichten zu versenden (IKSMS 2011).

Im Rahmen des INTERREG IV-A-Projekts FLOW MS ist eine Studie zur Quantifizierung der Unsicherheiten von Abflussvorhersagen mit dem Hochwasservorhersagesystem LARSIM im Einzugsgebiet von Mosel und Saar in Auftrag gegeben worden. Mit Hilfe der Ergebnisse kann aufgezeigt werden, in welchen Bereichen das Vorhersagemodell verbessert werden muss, wo z.B. Nachkalibrierungen oder die Einbindung zusätzlicher Stationsdaten erforderlich sind. Des Weiteren können die Mitarbeiter der Vorhersagezentralen zukünftig die Verlässlichkeit der operationellen Abflussvorhersagen besser bewerten und es können Verfahren und Methoden entwickelt werden, um die Unsicherheiten der Hochwasservorhersage auch der breiten Öffentlichkeit zu vermitteln (IKSMS 2011). Darüber hinaus ist es möglich, die Wirkung von Modell- und Systemverbesserungen auf die Güte der operationellen Abflussvorhersagen nach einheitlichen Kriterien zu bewerten.

Der Bereitstellung von Hochwasserinformationen über die verschiedenen Medien leisten einen wesentlichen Beitrag zu Hochwasservorsorge und Schadensminderung. Aufgrund der vorhandenen Schadenspotenziale und Sachwerte entlang von Mosel und Saar kommt dem Vorhersagesystem als schadensmindernde Maßnahme eine wesentliche Rolle zu (IKSMS 2011).

## Schlussfolgerung

Die Verbesserung der Hochwasservorhersage ist zentraler Bestandteil bei der Umsetzung der EU-HWRM-RL und eine wichtige Aktion im Projekt FLOW MS. Unter dem Dach der IKSMS beschäftigen sich die Fachleute der Partnerstaaten in den Arbeitsgruppen „Hydrologie“ und „Technischen Ausschuss“ zusammen mit der Aktion 3 „Verbesserung und Erweiterung des grenzüberschreitenden Hochwasservorhersagesystems“ erfolgreich mit dieser Herausforderung. Neben dem Austausch auf Ebene der Fachverwaltungen werden die Ergebnisse auch auf der lokalen Ebene kommuniziert. Die Überwindung von Verwaltungs- und Staatsgrenzen, die Aufbereitung von komplexem Fachwissen für die Nutzer- und Praktikerebene hat sich in den bisher gegründeten Hochwasserpartnerschaften sehr bewährt. Der Informationsfluss und Erfahrungsaustausch findet dabei nicht nur auf vertikaler Ebene, sondern auch horizontal, d.h. innerhalb und zwischen den Hochwasserpartnerschaften statt.

## Literatur

IKSMS (2011): Umsetzung des Aktionsplanes Hochwasser im Einzugsgebiet von Mosel und Saar – Bilanz 2006-2010, Trier.

Weidenhaupt, A., A. Schulte-Wülwer-Leidig, und D. Assfeld (2011): Internationale Abstimmung beim Hochwasserrisikomanagement am Beispiel der IKSR und der IKSMS. *Wasserwirtschaft* 11, 21-26.



*Die Europäische Union investiert in Ihre Zukunft*

# **Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum**

Enno Nilson und Peter Krahe

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Referat M2 (Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen), Koblenz, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Der Beitrag stellt einen Erfahrungsbericht aus dem Bereich der politikberatenden Wissenschaft dar und zeigt exemplarisch (a) welche Bandbreite sich unter Annahme von rund 20 Klimaprojektionen für verschiedene Abflusskennwerte im Rheineinzugsgebiet ergibt (Hintergrund: Projekt RHEINBLICK2050 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, KHR), (b) mit welcher Rationale die Bandbreite Eingang in politische Entscheidungsprozesse gefunden hat (Hintergrund: Expertengruppe KLIMA der der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR), und (c) welche Abflussszenarien für weitere Modellierungsschritte vorgeschlagen wurden (Hintergrund: Forschungsprogramm KLIWAS des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS).

## **Einleitung**

Die hydrologische Klimafolgenforschung steht vor einem Dilemma. Einerseits (1) muss sie das komplexe Wirkungsgefüge des atmosphärischen und terrestrischen Wasserkreislaufes verstehen und so abstrahieren, dass es über große Räume und Zeiträume simuliert und in seiner Dynamik erfasst werden kann. Da dies nicht in Perfektion gelingt und kein allgemein anerkannter Ansatz existiert, differieren Ergebnisse unterschiedlicher Herkunft auch wenn Gebiet, Zeitraum und hydrologischer Kennwert identisch gewählt wurden. Andererseits (2) müssen aus diesen z.T. heterogenen Ergebnissen "belastbare" Informationen abgeleitet, und für verschiedene Fragestellungen anwenderfreundlich aufbereitet werden. Die Anwendungen schließen weitere Modellierungsschritte ein, aber auch politische Entscheidungsprozesse im Hinblick auf z.T. weitreichende Anpassungsmaßnahmen.

Hinsichtlich beider Aspekte wurden in den vergangenen Jahren bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Mit Blick auf (1) besteht der Fortschritt insbesondere in einer verbesserten Kenntnis der Unsicherheiten. Bezüglich (2) wird die Kenntnis von Unsicherheiten durch die Entscheidungsträger zunehmend als wertvoll anerkannt, nicht zuletzt da sie politische Handlungsspielräume eröffnet.

In den Jahren 2008 bis 2011 wurden in Zusammenarbeit von verschiedenen gewässerkundlichen Institutionen, aus dem internationalen Rheineinzugsgebiet klimatologische und hydrologische Modelle und Daten zusammengetragen, zueinander ins Verhältnis gesetzt und schließlich in einem institutions- und länderübergreifend abgestimmten Dokument an die politische Ebene weitergegeben (Görgen et al., 2010), wo sie in die Entwicklung einer konkreten Anpassungsstrategie eingehen (IKSR, 2011).

Nachfolgend beschreiben wir einen Ansatz, der diesen Transfer erleichtert hat.

## Datengrundlagen

Die Klimamodellierung hat in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht. Im Kontext des 4. Sachstandsberichtes des IPCC wurden zahlreiche globale Klimasimulationen vorgelegt (Meehl et al., 2007). Einige dieser Simulationen wurden in koordinierten internationalen (Van der Linden und Mitchell, 2009) und nationalen Projekten (z.B. Hollweg et al., 2008; Jacob, 2006; Jacob et al., 2009) mit verschiedenen Verfahren für Europa bzw. Mitteleuropa regionalisiert. Derzeit umfasst dieses regionale Multi-Modell-Ensemble gut 20 unterschiedliche Kombinationen von sozioökonomischen Szenarien, globalen und regionalen Klimamodellen.

Um den aktuellen Kenntnisstand der Klimamodellierung mitsamt seinem Unsicherheitsbereich möglichst weitgehend abzubilden, muss eine Vielzahl von Klimasimulationen in Wirkungsmodellen (s. Abb. 1) verarbeitet werden. Dies stellt einerseits gewisse Ansprüche an die Schnittstelle zum Entscheidungsträger, da hier die Informationen und ihre Unsicherheitsbereiche adäquat kommuniziert werden müssen. Andererseits stellt es die Klimafolgenmodellierer oft (noch) vor Probleme, da deren Werkzeuge aufgrund von rechenzeit- oder schnittstellenbedingten Limitierungen oft nicht in der Lage sind, die Vielzahl von Modellläufen mengenmäßig in angemessener Zeit zu verarbeiten. Dies gilt umso mehr, je komplexer und detaillierter die eingesetzten Modelle sind. In der Praxis können makro- und mesoskalige hydrologische Modelle, die auf die Abbildung von Änderungen des Abflussregimes zielen, große Ensembles verarbeiten, hochauflösende hydrodynamische oder hydromorphodynamische Modelle wegen des (zu) hohen Bedarfs an Rechenzeit aber nicht. Detaillierte Modellierungen sind jedoch erforderlich, wenn planungsrelevante Aussagen zu lokalen Klimawirkungen und spezifischen Anpassungsmaßnahmen gemacht werden sollen.



Abb. 1: Schema einer exemplarischen Modellkette zur Abschätzung von gewässerkundlichen und verkehrswasserwirtschaftlichen Klimafolgen (Vorhaben 4 des Forschungsprogramms KLIWAS, BMVBS, 2009).

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem Leitwerte für die Politikberatung abgeleitet und Modellläufe ausgewählt werden können, die die Bandbreite des aktuellen Multi-Modell-Ensembles abbilden.

## Methodischer Ansatz und Fallbeispiel

Der hier gewählte Weg der Szenarienerstellung schließt drei Schritte ein:

(A) Zunächst wird anhand des Vergleichs von meteorologischen Beobachtungsdaten in der Kontrollperiode die grundsätzliche Plausibilität der Vielzahl der verfügbaren Klimasimulationen geprüft. Unter Ausschluss der unplausiblen Simulationen wird mit einem hydrologischen Flussgebietsmodell das sog. "reduzierte Ensemble" von Abflusssimulationen erzeugt,

(B) aus dem sog. „Szenarienkorridore“ für eine relevante Abflusskenngröße, einen relevanten Ort und einen oder mehrere zukünftige Bezugszeiträume abgeleitet werden, d.h. Bereiche innerhalb des Ensembles in dem besonders viele Mitglieder ähnliche Werte projizieren.

(C) Die Modellketten, die für die Ränder dieses Korridors repräsentativ sind, werden ausgewählt (Schritt C). Die zugehörigen hydrometeorologischen und hydrologische Daten können dann an weitere, in der Modellkette nachgeschaltete Modelle weitergegeben werden, die nicht die Möglichkeit haben, alle verfügbaren Ensemble-Member zu verarbeiten. (vgl. Abbildung 1).

Wir erläutern das Vorgehen nachfolgend am Beispiel des sommerlichen Niedrigwasserabflusses (hier: niedrigstes 7-Tagesmittel, NM7Q des hydrologischen Sommerhalbjahres) am Mittelrhein (Pegel Kaub). Der Pegel ist für die Binnenschifffahrt besonders relevant. Die Niedrigwasserthematik ist neben der Schifffahrt auch für andere Bereiche, z.B. die Gewässerökologie, bedeutsam.

### **Schritt A: Das "reduzierte Ensemble" der Abflusssimulationen**

Das derzeit vorliegende Ensemble von hochauflösenden Klimasimulationen (d.h. horizontale Gitterauflösungen unter  $0.4^\circ \sim 50$  km) geht fast vollständig in die vorliegende Fallstudie ein. Insgesamt werden 22 Kontrollsimulationen basierend auf 5 gekoppelten globalen Klimamodellen (kurz: GCM) und 11 dynamischen Regionalisierungsverfahren (kurz: RCM) einer Bewertung unterzogen. Für die Wasserhaushaltsmodellierung im Rheingebiet wurde ein Vorgehen gewählt, in dem die grundsätzliche Eignung der GCM-RCM-Ketten anhand räumlicher Muster der Jahreswerte und des Jahresgangs des Bias für die Temperatur und den Niederschlag je Teileinzugsgebiet nachgewiesen wird (Nilson et al., 2010). Auf Grundlage dieser Kriterien wurden 5 Simulationen ausgeschlossen. Somit stehen für die "nahe" Zukunft (Periode 2021-2050) 20 Simulationen und - da einige Modellläufe in der Jahrhundertmitte enden - für die "ferne" Zukunft (Periode 2071-2100) 17 Simulationen für die hydrologische Modellierung zur Verfügung.

Die hydrologische Simulationen werden mit dem semi-distributiven konzeptionellen hydrologischen Modell HBV durchgeführt, bei dem das Rheingebiet in 134 Teileinzugsgebiete gegliedert ist (kurz: HBV134; Eberle et al. 2005). Die RCM-Daten wurden hierzu zunächst auf die HBV-Modellgebiete aggregiert und anschließend mittels einer linearen Skalierung bias-korrigiert (kurz: LS, Referenzperiode: 1961-90; Krahe et al., 2009). Die Qualität der Simulationen wurde durch den Vergleich der bias-korrigierten Kontrollläufe mit beobachteten Pegeldaten (Modellkette C20-GCM-RCM-LS-HBV134) und den Ergebnissen des mit beobachteten hydrometeorologischen Daten angetriebenen HBV-Referenzlaufes ermittelt. Der Grad der Übereinstimmung ist zufriedenstellend.

### **Schritt B: Die "Szenarienkorridore"**

Das Ergebnis von Plausibilitäts-Prüfung, Klimamodellauswahl, Biaskorrektur, hydrologischer Modellierung und Validierung bezeichnen wir als "reduziertes Ensemble" von Abflusssimulationen, das Grundlage der Änderungsanalyse für die interessierenden Kenngrößen ist. Abb. 2 zeigt die Änderungssignale des NM7Q für das hydrologische Sommerhalbjahr, die sich für zwei Zukunftszeiträume (2021-2050 und 2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum 1961-1990 ergeben.

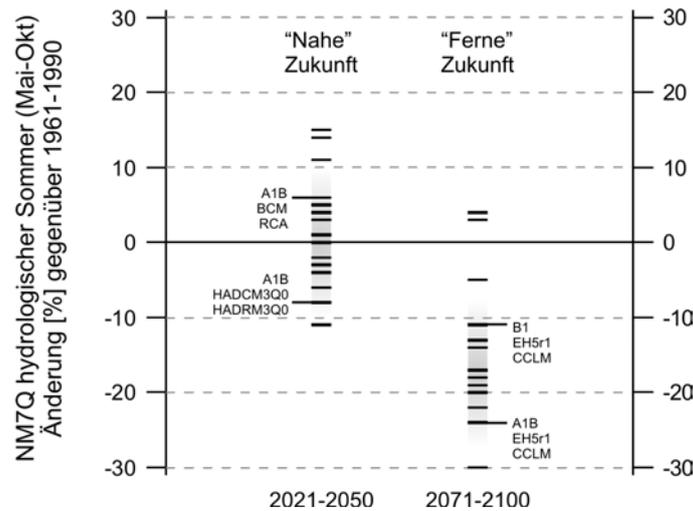


Abb. 2: Das sog. „reduzierte Ensemble“ von Abflussprojektionen. Jeder horizontale Strich stellt das Ergebnis einer Kopplungen von SRES, GCM und RCM mit dem hydrologischen Modell HBV134 dar. Die Simulationen wurden mit Blick auf Sommerniedrigwasserabflüsse ausgewertet. Die "nahe" Zukunft ist mit 20 Läufen realisiert, die "ferne" Zukunft mit 17 Läufen. Verlängerte horizontale Linien markieren die repräsentativen Simulationen an den Rändern der Szenariokorridore (farbig hinterlegt).

Es zeigt sich eine erhebliche Bandbreite der einzelnen Projektionen. Allerdings wird auch deutlich, dass einige Wertebereiche vergleichsweise oft projiziert werden. Diese Bereiche bilden den Ausgangspunkt der Konstruktion von „Szenariokorridoren“. Gefasst werden kann ein solcher Szenariokorridor  $S$  innerhalb eines Ensembles  $E$  als der Bereich, in dem die einzelnen Mitglieder besonders eng beieinander liegen. Dies ist gegeben, wenn die Differenzen  $D_k$  zwischen den benachbarten Projektionen  $x_k$  und  $x_{k+1}$  unter einem definierten Schwellenwert  $D_{krit}$  liegen (Gleichung 1),

$$S = \{x_k \in E \mid D_k(x_k - x_{k+1}) \leq D_{krit}\} \quad \text{Gleichung 1}$$

wobei  $E = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Als Schwellenwert  $D_{krit}$  wird der Abstand vorgeschlagen, der sich nach Gleichung 2 ergibt.

$$D_{krit} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n - 1} \quad \text{Gleichung 2}$$

Zudem wird für einen Szenariokorridor eine Mindestmächtigkeit  $m_{krit}$  definiert, d.h. eine Anzahl von Mitgliedern  $m(S)$ , die mindestens im Korridor liegen muss. Es gilt somit,  $m(S) \geq m_{krit}$ . Im vorliegenden Beispiel wurde als minimale Mächtigkeit  $m_{krit}$  ein Schwellenwert von einem Viertel aller Mitglieder angenommen (Gleichung 3).

$$m_{krit} \geq \frac{n}{4} \quad \text{Gleichung 3}$$

Aus den so identifizierten Projektionen  $x_{k_s}$  ergibt sich der Wertebereich des Szenariokorridors durch die Werte der jeweils höchsten und niedrigsten Projektion ( $x_{k_s \min}$  und  $x_{k_s \max}$ ).

Für den Sommerniedrigwasserabfluss in Kaub reichen die so ermittelten Szenarienkorridore von etwa +10% bis -10% für die „nahe“ Zukunft und -10% bis -25% für die „ferne“ Zukunft (unter der Annahme eines fortgesetzten Anstiegs der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen). Die Szenarienkorridore werden durch 16 von 20 Simulationen (nahe Zukunft) bzw. 13 von 17 Simulationen (ferne Zukunft) repräsentiert. Dies entspricht rund 80% bzw. 75% der Projektionen.

### Schritt C: Die "repräsentativen Simulationen"

Für die praktische Arbeit mit Klima- und Abflussprojektionen in komplexen Modellketten (vgl. Abb. 1) sind nicht die Szenarienkorridore bzw. Änderungssignale, sondern Zeitreihen relevanter hydrologischer oder hydrometeorologischer Größen erforderlich. Für den eingangs geschilderten Fall, dass aufgrund rechner- oder softwarebedingter Restriktionen nur wenige Mitglieder des "reduzierten Ensembles" in einer Modellkette verarbeitet werden können, liefern die Szenarienkorridore Argumente für eine Auswahl.

Greift man jeweils die am oberen und unteren Rand der Szenarienkorridore gelegenen Mitglieder des "reduzierten Ensembles" heraus (sog. representative Simulationen), reduziert sich die Anzahl der zu verarbeitenden Simulationen auf zwei (sofern nur ein Zukunftszeitraum und nur ein Kennwert als relevant betrachtet wird). Gleichzeitig bleibt ein Großteil der Bandbreite des Ensembles erhalten, ohne dass jedoch die wenigen Läufe, die das Minimum bzw. Maximum des Ensembles repräsentieren, überbetont werden. Für das Fallbeispiel des Niedrigwasserabflusses im hydrologischen Sommerhalbjahr am Mittelrhein, ergeben sich für die "nahe" bzw. "ferne Zukunft" die in Tab. 1 aufgeführten Läufe.

Tab. 1: Repräsentative Simulationen, ausgewählt jeweils am oberen und unteren Rand des Szenarienkorridors (s. Abb. 2) für das Fallbeispiel der Sommerniedrigwasserabflüsse am Pegel Kaub

Zeitscheibe	Simulation am oberen Rand des Szenarienkorridors	Simulation am unteren Rand des Szenarienkorridors
2021 bis 2050 ("nahe" Zukunft) Änderung rund	A1B_BCM_RCA_HBV134 +10%	A1B_HADCM3Q0_HADRM3Q0_HBV134 -10%
2071 bis 2100 ("ferne" Zukunft) Änderung rund	A1B_EH5r3_RACMO_HBV134 -10%	A1B_EH5r1_CCLM_HBV134 -25%

Als Zeitreihen stehen einerseits die mit HBV134 simulierte täglichen Abflüsse der angegebenen Modellketten zur Verfügung. Andererseits können die hydrometeorologischen Größen, die diesen Simulationen zugrunde liegen, herangezogen werden (biaskorrigierte Lufttemperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer/Globalstrahlung), um mit dem Niedrigwasser thematisch verwandte Modellstudien und Auswertungen durchzuführen (z.B. zu Wassertemperaturen, chemische und biologische Prozesse).

### Fazit

An einem praktischen Beispiel wurde demonstriert, wie ausgehend von einem umfangreichen Ensemble von Klimaprojektionen (hier: 22 Simulationen) auf transparente Weise eine Einengung der Bandbreite vorgenommen ("Szenarienkorridore") und eine Auswahl von „repräsentativen Simulationen“ an weitere Wirkmodelle weitergegeben werden kann.

Die Szenarienkorridore stellen einen Kompromiss dar zwischen der oft gewünschten Fokussierung auf die mehrheitlich projizierten Änderungssignale und der notwendigen Darstellung der Unsicherheitsbereiche. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der "Mehrheitsbegriff" der Szenarienkorridore nicht mit einer Wahrscheinlichkeitsaussage verwechselt werden darf. Wahrscheinlichkeiten sind bei szenario-basierten Ansätzen a priori nicht bestimmbar. Szenarienkorridore wurden für mehrere Kennwerte und Pegel am Rhein ausgewertet und werden aktuell von verschiedenen Nutzergruppen aufgegriffen. Sie sind beispielsweise in eine Szenarienstudie der Internationale Kommission zum Schutz den Rheins (IKSR, 2011) eingegangen, die nun als Grundlage für die Anpassungsdiskussionen in verschiedenen IKSR-Arbeitsgruppen sowie in der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt dienen (ZKR, 2011).

## Literatur

- BMVBS (2009): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. *Tagungsband der ersten KLIWAS - Statuskonferenz*. 166 S.
- Eberle, M., H. Buitefeld, K. Wilke und P. Krahe (2005): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part III – Daily HBV Model for the Rhine Basin. *Bericht BfG-1451*, Koblenz.
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. und D. Volken (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. *CHR Report I-23*. pp. 51-95. Download: [http://www.chr-khr.org/files/CHR\\_I-23.pdf](http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf)
- Hollweg, H.-D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woltd, M. und C. Wunram (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. 150 S. Download: [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/documents/reports/MaD\\_TechRep3\\_CLM\\_\\_I\\_.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/documents/reports/MaD_TechRep3_CLM__I_.pdf)
- IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. *IKSR Bericht Nr. 188*. 28 S. Download: [http://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/Dokumente\\_de/Berichte/188\\_d.pdf](http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Berichte/188_d.pdf)
- Jacob, D. (2006): REMO climate of the 20th century run and A1B scenario run, UBA project, 0.088 degree resolution, 1h data. *World Data Center for Climate*. CERA-DB.
- Jacob, D., Nilson, E., Tomassini, L. und K. Bülow (2009): REMO climate of the 20th century run and A1B scenario run, BfG project, 0.088 degree resolution, 1h data. *World Data Center for Climate*. CERA-DB.
- Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D. und H. Moser (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Heft 5/2009. S. 316-331.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer und K. E. Taylor (2007): The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research, *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 1383-1394.
- Nilson, E., Perrin, C., Beersma, J., Carambia, M., Krahe, P., de Keizer, O. und K. Görgen (2010): Evaluation of data and processing procedures. In: Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. & D. Volken (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. *CHR Report I-23*. pp. 51-95. Download: [http://www.chr-khr.org/files/CHR\\_I-23.pdf](http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf)
- Van der Linden P. und J.F.B. Mitchell (2009): ENSEMBLES - Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. *Met Office Hadley Centre*. 160 S. Download: [http://ensembles.eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles.eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf)
- ZKR (2011): Klimawandel und Rheinschifffahrt. Anlage zum Beschlussprotokoll 2011 - II der Herbstsitzung 2011. 209 S. Download: [http://www.ccr-zkr.org/files/documents/resolutions/ccr2011\\_IId.pdf](http://www.ccr-zkr.org/files/documents/resolutions/ccr2011_IId.pdf)

# **Künstliche Feuchtflächen in Hochwasserrückhaltebecken – eine Chance für die Reduzierung von Pflanzenschutzmitteleinträgen in Gewässer**

Jens Lange<sup>1</sup>, Klaus Kümmerer<sup>2</sup>, Gwenaël Imfeld<sup>3</sup>, Barbara Herbstritt<sup>1</sup>, Elodie Maillard<sup>3</sup>, Marie Lefrancq<sup>3</sup>, Lukasz Gutowski<sup>2</sup>, Romy Durst<sup>1</sup>, Robin Steudten<sup>1</sup>, Cyrielle Regazzoni<sup>3</sup>, Matthias Gassmann<sup>2</sup> und Sylvain Payraudeau<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie, Leuphana Universität Lüneburg, Deutschland

<sup>3</sup> Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS), Université de Strasbourg, Frankreich

## **Zusammenfassung**

Künstliche Feuchtflächen in Hochwasserrückhaltebecken (HRB) können zum Rückhalt von Pflanzenschutzmitteln (PSM) beitragen. Dies ergaben Input-Outputmessungen an verschiedenen Standorten in Europa. Das vor kurzem gestartete INTERREG-Projekt PhytoRet baut auf diesen Ergebnissen auf und hat zum Ziel, das Potential von künstlichen Feuchtflächen in HRB zur Reduktion (durch Sorption und Abbau) des Eintrags von PSM aus Intensivlandwirtschaft im Oberrheingebiet beiderseits des Rheins zu erforschen. Dazu werden im Labor und im Gelände Analysen von PSM und deren Transformationsprodukten durchgeführt und über Referenztracer Aussagen zum Verhalten und Verbleib in Feuchtflächen gemacht. In einem Säulenversuch mit Feuchtflächensediment und –vegetation konnte der Referenztraceransatz bestätigt werden. So konnten Aussagen von wiederholten Tracerversuchen im Freiland für eine Abschätzung des PSM-Retentionsvermögens von Feuchtflächen herangezogen werden. Hier zeigte sich vor allem die wichtige Rolle von akkumuliertem Sediment. Kommunen auf beiden Seiten des Oberrheins bietet PhytoRet nun die einmalige Gelegenheit, unter Forschungsbegleitung ihre bestehenden HRB, oder im Fall von neu geplanten auch diese, im Sinne von PSM-Retention untersuchen zu lassen und Hinweise für eine wirksame (Um-)Gestaltung zu erhalten. HRB werden dabei ökologisch aufgewertet und können neue Funktionen erfüllen. Bei der praktischen Umsetzung auf Gemeindeebene können auf deutscher Seite Feuchtflächen in HRB auch als Kompensationsmaßnahmen im Sinne der deutschen Naturschutzgesetzgebung dienen, was einen zusätzlichen Anreiz für deren Einrichtung bietet.

## **Rückhalt von Pflanzenschutzmitteln in künstlichen Feuchtflächen**

Viele Aquifere sind durch den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln (PSM) aus der Landwirtschaft gefährdet. Während ein Teil der PSM flächenhaft über direkte Grundwasserneubildung aus den Anbauflächen eingetragen wird, geht auch von Oberflächenabfluss eine bedeutende Gefahr aus. Besonders zu Zeiten geringer Vegetationsbedeckung und kurz nach PSM-Ausbringung, können große PSM-Mengen bei Starkniederschlägen oberflächlich mobilisiert, in Oberflächengewässer eingetragen und danach in das Grundwasser infiltrieren. Während der flächenhafte PSM-Eintrag eigentlich nur über Einschränkungen bei der PSM-Ausbringung verringert werden kann, besteht beim zweiten Eintragspfad über Oberflächengewässer eine zusätzliche Chance: der Rückhalt von PSM in künstlichen Feuchtflächen, die gezielt an Vorflutern in Einzugsgebieten mit Intensivlandwirtschaft angelegt wer-

den. Das vor kurzem gestartete INTERREG-Projekt PhytoRet erforscht dieses Potential im Oberrheingebiet.

In Feuchtflächen laufen verschiedene Prozesse ab, die zur Minderung der PSM-Belastung beitragen können. Zu diesen zählen Sorption an Sedimenten oder Pflanzen, Photolyse, chemischer bzw. mikrobieller Abbau, oder die PSM-Aufnahme von Organismen. Die Effizienz von Feuchtflächen hängt hauptsächlich von deren hydrologischen und hydrochemischen Eigenschaften sowie von den Konzentrationen und Eigenschaften der eingebrachten PSM ab. Bestehendes Wissen beschränkt sich bisher größtenteils auf eine Berechnung von Massenbilanzen durch den Vergleich von Frachten am Zu- und Ablauf, über interne Prozesse ist dagegen noch wenig bekannt. So zeigt sich eine hohe Variabilität der Feuchtflächeneffizienz, jedoch können einige Stoffe effizient zurückgehalten werden (Tab.1).

Tab. 1: Studien zur Retention von PSM in künstlichen Feuchtflächen; Retention berechnet sich aus dem Anteil der PSM-Frachten in gelöster Phase im Ablauf verglichen mit Frachten im Zulauf.

Studie	PSM	Retention
Moore et al. (2000)	Atrazin	66 - 77 % (73 µg/l *) 34 - 37 % (147 µg/l *)
Moore et al. (2001)	Metolachlor	91% (73 µg/l*) 87% (147 µg/l*)
Schulz & Peall (2001)	Endosulfan Azinphosmethyl	~100 % (0,2 µg/l*) 77 - 93 % (0.85 µg/l*)
Stearman et al. (2003)	Metolachlor Simazin	17 – 91% 63 – 78%
Braskerud & Haarstad (2003)	Propachlor, Metalaxyl, Linuron, Metamitron Metribuzin Propiconazol, Fenpropimorph Dicamba, Bentazon, Fluroxypyr	30 - 67 % (2000) 11 - 14 % (2001) 40 % (2000) 19 % (2001) 25 - 36 % (2000 ) 10 - 13 % (2001) 0%
Sherrard et al. (2004)	Chlorothalonil, Chlorpyrifos	98 - 100 %
Blankenberg et al. (2006)	Fenpropimorph, Linuron, Metalaxyl, Metamitron, Metribuzin, Propachlor, Propiconazol	25 - 67 % (2000) 3 - 19 % (2001) 3 - 47 % (2003)
Maillard et al. (2011)	Dimethomorph, Glyphosat, Isoxaben, Kresoxim methyl, Metalaxyl AMPA**	74 - 92% (2009) 62 - 96% (2010)  26% (2009) 81% (2010)

\* Konzentration im Zulauf

\*\* Transformationsprodukt

## **Künstliche Feuchtflächen in Hochwasserrückhaltebecken (HRB) des Oberrheingebiets**

Der Grundwasservorrat des gesamten Oberrheingrabens beträgt ungefähr 45 Milliarden m<sup>3</sup> Wasser. Auf beiden Seiten des Oberrheins wird Grundwasser für Trinkwasserversorgung, Industrie und zur Bewässerung eingesetzt. Somit ist die Qualität dieser Wasserressource für mehr als 3 Millionen Einwohner im Elsass und in Baden-Württemberg von großer Bedeutung. Für den Einsatz von künstlichen Feuchtgebieten zur PSM-Reduktion bieten sich im Oberrheingebiet Kleinzugsgebiete mit intensivem Weinbau an. Jene befinden sich vor allem in den ansteigenden Randlagen (Vogesen, Vorbergzone, Schwarzwald) sowie zentral im Kaiserstuhl. Dort kommt es durch die Hanglage und durch die Unterdrückung bodenbedeckender Vegetation bei Starkniederschlägen häufig zu Oberflächenabfluss. Da parallel intensiver Pflanzenschutz betrieben wird, ist mit einem deutlichen Eintrag von PSM in Oberflächengewässer zu rechnen. Dieser geschieht durch Abdrift beim Spritzen und in gelöster und partikulärer Phase bei Abflussereignissen. Werden künstliche Feuchtflächen in Bachabschnitten oberhalb der Oberrheinebene angelegt, können sie PSM zurückhalten, bevor eine Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser des Oberrheingrabens auftritt.

Gerade an den Schnittstellen zwischen Randlagen und Oberrheinebene befindet sich sowohl auf deutscher als auch auf französischer Seite eine Vielzahl von Rückhaltebecken, die vornehmlich dem Hochwasserschutz dienen. Diese könnten mit verhältnismäßig geringem Aufwand zum Rückhalt von Pflanzenschutzmitteln umgestaltet werden, ohne dabei ihre Hauptfunktion zu verlieren. Auf beiden Rheinseiten wurden geeignete Standorte lokalisiert. Auf deutscher Seite konnte hierbei auf einen bestehenden Datensatz zu Hochwasserrückhaltebecken (HRB) in Baden-Württemberg (LUBW, 2008) zurückgegriffen werden. Es ergaben sich ungefähr 140 HRB, in denen Feuchtflächen zur PSM-Retention angelegt werden könnten. Die tatsächliche Eignung hängt von lokalen Bedingungen ab (Landnutzung im Einzugsgebiet, Vorhandensein von permanentem Abfluss) und muss im Einzelnen überprüft werden. Auf elsässischer Seite wurde eine vergleichbare Anzahl (ungefähr 110) ausgewiesen und vor Ort auf Eignung für PSM-Rückhalt überprüft.

## **Prozessforschung im Projekt**

Verschiedene verbrauchsstarke PSM dienen als Modellsubstanz, um den Verbleib und das Verhalten der Stoffe in den künstlichen Feuchtflächen zu untersuchen. Dazu werden spezifische Analyseverfahren (LC-MS/MS) und Modellierungen angewendet und adaptiert, um die Stoffe im Zulauf und im Ablauf der Feuchtflächen sowie im Wasser, im Sediment und in der Vegetation mit modernen Methoden (Chromatographie mit Massenspektrometrie) zu bestimmen. In Laborversuchen werden diese Stoffe einem biologischen Abbau (Wasser-Sedimenttest) und einem Photoabbau unterzogen. Dabei entstehende gegen weiteren Abbau stabile Produkte („Transformationsprodukte“) werden ebenfalls mit den o.g. Methoden identifiziert und mittels Chemieinformatikmethoden bewertet. Ein weiteres Werkzeug ist der Referenztraceransatz, der in Feuchtflächen schon erfolgreich angewendet wurde (Lange et al., 2011). Hierbei nutzt man das analoge Verhalten von PSM und verschiedenen Tracern (v.a. Fluoreszenztracern) in Bezug auf Sorption, Lichtabbau und biologischen Abbau, sie dienen als Referenz für andere organische Stoffe, z.B. PSM. Auf diese Weise stellen Tracerverfahren eine umweltfreundliche und kostengünstige Methode dar, um den Verbleib von PSM in komplexen Umweltsystemen zu beschreiben. Zusätzlich kann die Anzahl von (teuren) PSM-Beprobungen limitiert werden. So werden in PhytoRet Prozessforschungen parallel mit Tracern und PSM durchgeführt.

In einem ersten Beispiel wurden 65 cm hohe Glassäulen mit Sediment einer Feuchtbläche befüllt und mit einem equimolaren Cocktail aus zwei Fluoreszenztracern (Sulforhodamin B, Uranin) und zwei PSM (Metalaxyl und Isoproturon) beschickt (Durst, 2011). Um möglichst naturnah die Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser zu simulieren, wurde eine Säule mit einem Vertreter typischer Feuchtblächenvegetation (*Phragmites australis*) bepflanzt. Da Photolyse durch Abdeckung vermieden wurde, waren die Durchgangskurven von Uranin und Isoproturon nahezu deckungsgleich (Abb.1a). Auch die Wiederfindungsraten (Uranin: 81.7%, Isoproturon: 76.6%) waren vergleichbar. Sulforhodamin B zeigte zwar Retardation und einen stärkeren Massenverlust (Wiederfindung: 65.5%) aber eine ähnlich geformte Durchgangskurve. Metalaxyl wurde am stärksten zurückgehalten (Wiederfindung: 39.5%) und wies auch eine völlig andere Form der Durchgangskurve auf. Generell bestätigten die Laborergebnisse aber die Eignung des Referenztraceransatzes.

So wurden in einem zweiten Schritt wiederholte, standardisierte Markierungen mit Fluoreszenztracern in einer Versuchsfeuchtbläche durchgeführt, um den Einfluss von Sedimenteintrag auf die Effizienz der PSM-Retention zu untersuchen (Schuetz et al., 2012; Steudten, 2011). Sowohl Impuls- als auch kontinuierliche Einspeisungen ergaben ähnliche Wiederfindungsraten. Unterschiedliche Abflussbedingungen erschwerten zwar einen direkten Vergleich, dennoch war eine Abschwächung des Retentionsvermögens erkennbar (Abb. 1b). Dies wurde auf präferentielle Fließwege und auf die Abnahme des Wasservolumens zurückgeführt. So war die Feuchtbläche 20 Monate nach ihrer Fertigstellung zu 56% mit Sediment gefüllt. Hierdurch verringerten sich Kontaktzeiten und Kontaktflächen (Adsorption) in der kontinuierlich durchströmten Feuchtbläche.

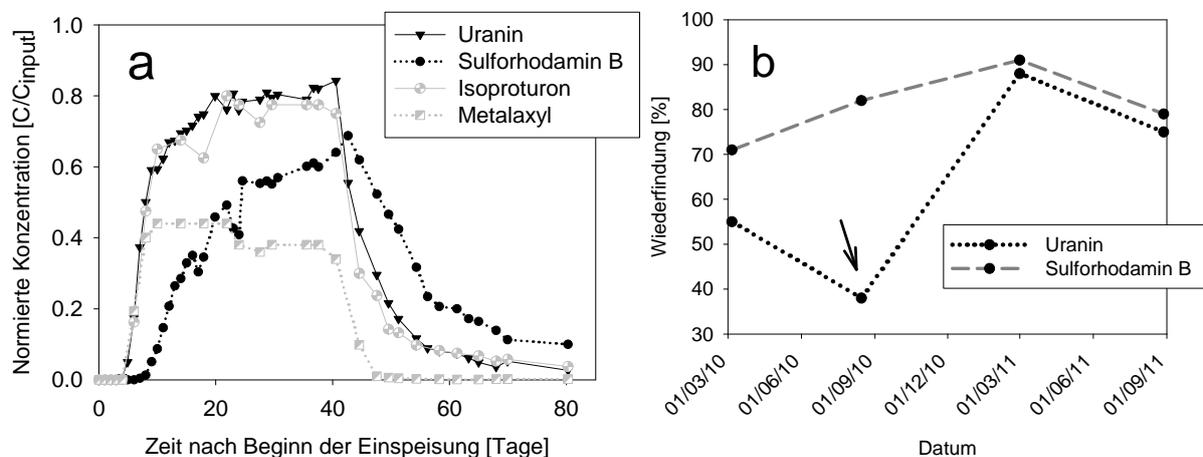


Abb. 1: a) Durchgangskurven von PSM und Referenztracern im Säulenversuch bei kontinuierlicher Einspeisung; b) Rückholraten für Uranin und Sulforhodamin B in vier Multitracerversuchen in einer künstlichen Feuchtbläche; Pfeil: verstärkter Lichtabbau, da tags und nicht nachts eingespeist wurde.

## Umsetzung auf Gemeindeebene

Grundsätzlich müssen die Kommunen in bestehenden HRB regelmäßige Unterhaltungsmaßnahmen durchführen (z.B. das Ausbaggern von Sediment oder das Entfernen von Vegetation), um deren Funktionsfähigkeit aufrecht zu erhalten. Gerade diese Unterhaltungsmaßnahmen können in vielen Fällen dazu dienen, künstliche Feuchtblächen zu schaffen und so Retentionsraum nicht nur für Hochwässer,

sondern auch für PSM zu erzeugen. Dadurch entstehen nur geringe zusätzliche Kosten. Kommunen auf beiden Seiten des Oberrheins bietet sich aber im Gegenzug die einmalige Gelegenheit, unter Forschungsbegleitung ihre bestehenden HRB, oder im Fall von neu geplanten auch diese, im Sinne einer PSM-Retention untersuchen zu lassen und Hinweise für eine wirksame (Um-) Gestaltung zu erhalten. HRB werden dabei ökologisch aufgewertet und können neue Funktionen erfüllen. So wird an einem Beispiel auch eine Zusammenarbeit mit einer Schule diskutiert, die die neu angelegte Feuchtfläche innerhalb einer Projektarbeit langfristig betreuen könnte. Grundsätzlich ist die landwirtschaftliche Nutzung innerhalb von HRB eingeschränkt, weswegen sie eigentlich prädestiniert für die Anlagen von Feuchtflächen sind.



Abb. 2: Blick auf das HRB Kelleracker (Gemeinde Pfaffenweiler) mit integrierter Feuchtfläche; links hinter den Bäumen ist die Lärmschutzwand der Landesstraße L 125 zu erkennen, für deren Ausbau die Feuchtfläche im HRB als Kompensationsmaßnahme diente.

Über Internetpräsenz und zweisprachige Informationsveranstaltungen auf Gemeindeebene versucht das PhytoRet-Projekt Kommunen auf beiden Seiten des Oberrheins für die Projektidee zu begeistern. Hauptproblem ist hierbei, dass Entscheidungsträger genau zu jenem Zeitpunkt angesprochen werden müssen, wo Instandsetzungsmaßnahmen in bestehenden HRB anstehen oder neue HRB geplant werden, da sonst Zusatzkosten entstehen, die einer Verwirklichung entgegen stehen. So beschränkt sich die praktische Umsetzung bislang auf Einzelfälle. Aktiver Gemeinden sind auf französischer Seite Rouffach und Alteckendorf, auf deutscher Seite Eichstetten, Pfaffenweiler, Kenzingen und Herbolzheim. Vom Zeitpunkt der Planung bis hin zur Umsetzung können mehrere Jahre vergehen. Hier zeigte sich jedoch, dass durch persönliches Engagement auf beiden Seiten (Projektmitarbeiter und Gemeindevertreter) pragmatische und schnellere Lösungen möglich sind.

Auf deutscher Seite bietet sich ein weiterer rechtlicher Anreiz an. Im Sinne der deutschen Naturgesetzgebung kann die ökologische Aufwertung von HRB in vielen Fällen als Kompensationsmaßnahme für Beeinträchtigungen durch Baumaßnahmen herangezogen werden. Dies macht Feuchtflächen in HRB auch finanziell für Kommunen interessant. Als Beispiel dient das HRB Kelleracker der Gemeinde Pfaffenweiler, 12 km südlich von Freiburg i. Brsg.. Schon vor Projektbeginn von PhytoRet wurden

im HRB eine künstliche Feuchtfläche als Kompensationsmaßnahme für den Ausbau der nahen Landesstraße L 125 angelegt (Abb. 2). Das PSM-Retentionsvermögen dieser Feuchtflächen wird nun im Rahmen von PhytoRet untersucht.

## Danksagung

Das Projekt PhytoRet wird vom europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen von INTERREG IV kofinanziert: „Der Oberrhein wächst zusammen, mit jedem Projekt.“

## Literatur

- Blankenberg A.-G. B., B. Braskerud und K. Haarstad (2006): Pesticide retention in two small constructed wetlands: treating non-point source pollution from agriculture runoff. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 86, 225-231.
- Braskerud B.C. und K. Haarstad (2003): Screening the retention of thirteen pesticides in a small constructed wetland. *Water Science and Technology* 48, 267-274.
- Durst, R. (2011): Transfer of tracers and pesticides in lab-scale wetland systems, Masterarbeit, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- Lange J., T. Schuetz, C. Gregoire, D. Elsässer, R. Schulz, E. Passeur und J. Tournebize (2011): Multitracer experiments to characterize contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 91: 768-785.
- LUBW (2008): Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren in Baden-Württemberg, *Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie* 111, LUBW, Karlsruhe.
- Maillard, E., S. Payraudeau, F. Ortiz und G. Imfeld (2011): Removal of dissolved pesticide mixtures by a stormwater wetland receiving runoff from a vineyard catchment: an interannual comparison. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, published online.
- Moore M. T., J. H. Rodgers Jr., C. M. Cooper und S. Smith Jr. (2000): Constructed wetlands for mitigation of atrazine-associated agricultural runoff. *Environmental Pollution* 110, 393-399.
- Moore M. T., J. H. Rodgers Jr., S. Smith Jr. und C. M. Cooper (2001): Mitigation of metolachlor-associated agricultural runoff using constructed wetlands in Mississippi, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84, 169-176.
- Sherrard R. M., J. S. Berr, C. L. Murray-Gulde, J. H. Rodgers und Y. T. Shah (2004): Feasibility of constructed wetlands for removing chlorothalonil and chlorpyrifos from aqueous mixtures. *Environmental Pollution* 127, 385-394.
- Schuetz, T., M. Weiler und J. Lange (2012): Multi-tracer assessment of wetland succession: Effects on conservative and non-conservative transport processes. *Water Resources Research*, in review.
- Schulz R. und S. K. C. Peall (2001): Effectiveness of a constructed wetland for retention of nonpointsource pesticide pollution in the Lourens River catchment, South Africa. *Environmental Science & Technology* 35, 422-426.
- Stearman G. K., D. B. George, K. Carlson und S. Lansford (2003): Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells. *Journal of Environmental Quality* 32, 1548-1556.
- Studten, R. (2011): Remobilisierung von Schadstoffen in Feuchtflächen: Anwendung des Referenztraceransatzes, Masterarbeit, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.

# Grundwassernutzung im Reich der Hethiter – Hydrologie und Archäologie

Hartmut Wittenberg

Leuphana Universität Lüneburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Hattuša (Hattuscha) war von etwa 1650 bis 1200 v. Chr. die Hauptstadt des Hethiterreiches im mittleren Anatolien. Auf dem steil ansteigenden Gelände der heutigen Ruinenstadt lebten und arbeiteten viele tausend Menschen, deren Haushalte, Vieh, Werk- und Kultstätten mit Wasser versorgt werden mussten, das zum Teil aus Quellen stammte. Offen war die Frage, wie den großen im Stadtgebiet angelegten, heute verlandeten Teichen das Wasser zugeführt und entnommen wurde. Die Hypothese der Archäologen, dass die Zuleitung der Wassermengen (Ostteiche ca. 36.000 m<sup>3</sup>, Südteiche ca. 20.000 m<sup>3</sup>) durch lange Rohrleitungen erfolgte, war durch wasserbauliche Überlegungen praktisch auszuschließen. Es wurde die hydrologische Arbeitshypothese aufgestellt, dass die Teiche bergseitig in Grundwasser führende Schichten einschneiden, aus denen sie sich im nasseren Winterhalbjahr füllten. Zur Überprüfung wurden im Herbst 2009 Grundwassermessstellen jeweils direkt oberhalb der Teiche eingerichtet. Die Messungen ergeben, dass das Schichtenwasser im Winter über die ehemaligen Teichoberflächen ansteigt und damit die Teiche füllen konnte. Die Hethiter nutzten offenbar auch in ihren anderen Stauseen vornehmlich zusickerndes Grundwasser und vermieden die heftigen und unregelmäßigen Oberflächenzuflüsse. Die Zusammenarbeit zwischen Archäologie und Hydrologie überwindet transdisziplinäre Grenzen und eröffnet neue Einblicke in die Geschichte der Menschheit.

## Einleitung

Die Ruinenstadt Hattuša liegt ca. 200 km östlich von Ankara, unmittelbar südlich des Städtchens Boğazkale (früher Boğazköy) bei etwa 40°N und 34.6°E. Die Fläche von etwa 200 ha steigt von Nord nach Süd von 1050 auf 1250 m ü.M. an. Die mittlere jährliche Temperatur ist rund 9°C mit heißen, trockenen Sommern und kalten Wintern. Niederschläge mit einer mittleren Jahreshöhe von ca. 500 mm fallen überwiegend im Winter. Im Sommer mit einem hohen Verdunstungsdefizit treten im Stadtgebiet auch in den Bachläufen keine Oberflächenabflüsse auf. Dagegen zeigen artesisch gespeiste Weidebrunnen die Verfügbarkeit von Grund- und Schichtenwasser an.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Frage der Wasserzuführung zu den Ost- und Südteichen der hethitischen Hauptstadt. Abb. 1 ist eine topographische Karte der Oberstadt von Hattuša mit den eingezeichneten Teichen. Analysen von <sup>14</sup>C-Daten ergaben, dass die Südteiche zusammen mit weiterer Bebauung in der Mitte des 16. Jahrhunderts v. Chr. angelegt wurden (Schoop & Seeher, 2006). Sie wurden mit praktisch senkrechten Wänden in den undurchlässigen Boden gegraben. Auch die zwei Ostteiche sind bergseits in die undurchlässige Bodenschicht eingetieft. An ihren nördlichen Rändern, also talwärts, sind sie durch Erddämme von ungefähr 3 m Höhe umschlossen. Diese Dämme haben senkrechte Kerndichtungen aus Lehm, die in einem Sporngraben im festen, undurchlässigen Boden gegründet sind. (Seeher, 2006). Das gleiche Prinzip der Innendichtung findet sich auch in antiken Staudämmen von Kuşaklı und Karakuyu (Hüser, 2007) und wird auch bei modernen Staudämmen angewandt. Die Böschungen sind mit einer Steinpflasterung gegen Erosion geschützt.

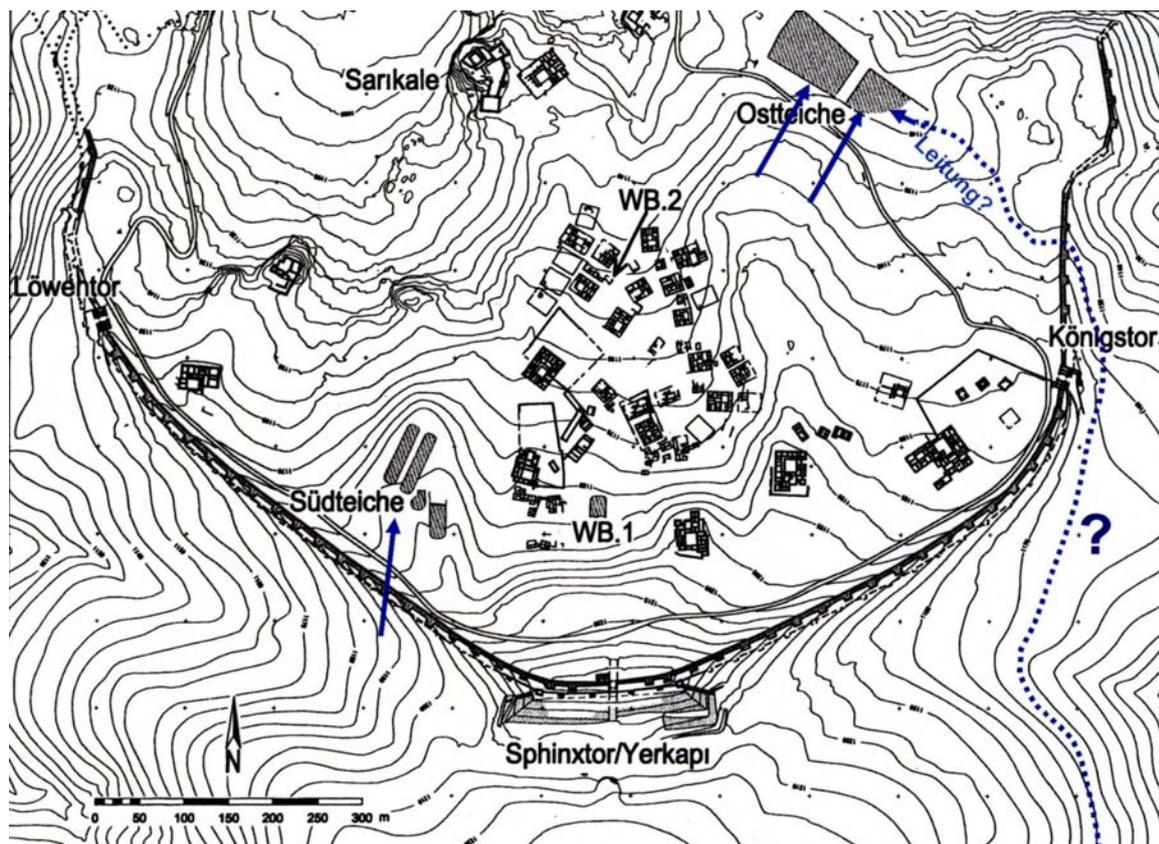


Abb. 1: Topographische Karte der Oberstadt von Hattuša mit Ost- und Süchteichen (Seeher, 2001). Die blau gepunktete Linie ist die ungefähre Trasse einer zunächst vermuteten Rohrleitung; blaue Pfeile zeigen die Sickerrichtungen des Grundwassers.

Überreste von Zuleitungen oder Entnahmeeinrichtungen wurden nicht gefunden. Zunächst wurde von einer Befüllung von außerhalb der Stadt durch Rohrleitungen ausgegangen (Neve, 1992; Seeher, 2006). Die blau gepunktete Linie in Abb. 1 zeigt eine hypothetische Trasse. Das einzige Indiz hierfür war die Öffnung in der Stadtmauer südlich des Königstores, die 1907 von O. Puchstein (1912) gefunden wurde. Die schwierigen topographischen Bedingungen, das starke Seitengefälle außerhalb der Stadtmauer und die weite Entfernung von ca. 2,5 km zu dem Teich Sülüklü Gölü, aus dem man sich die Entnahme vorstellte, schließen diese Hypothese praktisch aus. Die Zuleitung wäre unnötig teuer, unsicher und nicht nachhaltig gewesen. Rohrleitungen oder auch Kanäle waren nicht erforderlich, da genügend Wasser innerhalb der Stadtmauer gewonnen werden konnte: Grundwasser.

## Das Forschungsvorhaben

In einer Zusammenarbeit zwischen Archäologie und Wasserbau wurden Antworten auf die offenen Fragen zur Befüllung der Teiche gesucht (Schachner & Wittenberg, 2012).

Offenbar nutzten die hethitischen Ingenieure vorzugsweise den stetigeren Zufluss aus Grundwasser und Quellen zur Füllung ihrer Speicher und vermieden so die Risiken plötzlicher großer Zuflüsse aus Oberflächengewässern, die die Dämme durch Überströmen zerstören konnten. Auch die ebenfalls hethitischen Speicher von Karakuyu (Emre, 1993) und Alacahüyük (Inak et al., 2009) wurden nicht durch Bäche oder Flüsse sondern durch Zusickern von Grund- und Quellwasser gespeist. Es erscheint logisch, dass auch die Teiche von Hattuša durch unterirdische Zuflüsse gefüllt wurden. Mehrere

Quellhorizonte befinden sich auf dem abfallenden Gelände der früheren Stadt. Artesische Weidebrunnen werden aus den Wasser führenden Schichten gespeist und auch der heutige Ort Boğazkale erhielt vor dem Bau der zentralen Wasserversorgung vor rund 30 Jahren Wasser aus Quellhorizonten an den Hängen der Ruinenstadt. Ein Teil der Ortsbrunnen wird noch heute genutzt. Überall in der Region weisen die zahlreichen artesischen Quellen und Viehtränken auf reiche Grundwasserressourcen hin, während Bäche und Flüsse jahreszeitlich versiegen. Abb. 2 zeigt einen schematischen Querschnitt in Süd-Nord-Richtung durch das Gelände und die Ostteiche unter Beachtung der topographischen und geologischen Bedingungen.

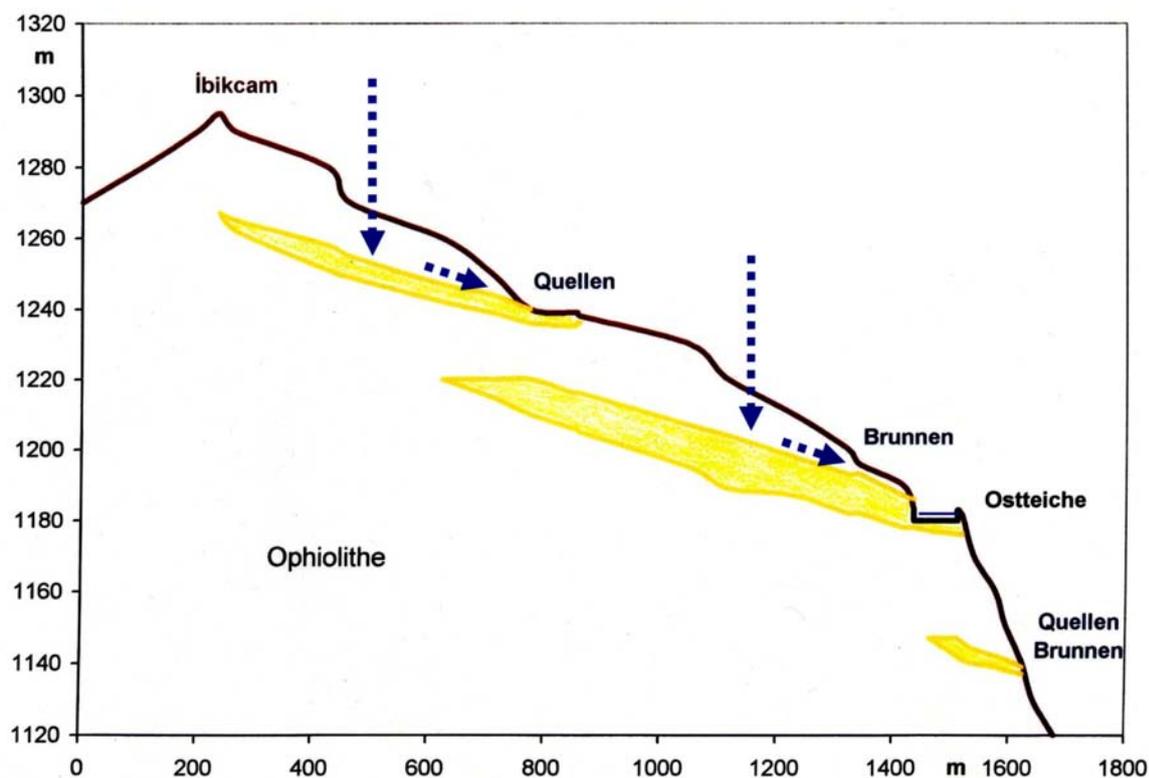


Abb. 2: Topographisch-geologischer Schnitt Ostteiche (schematisch). Versickerndes Niederschlagswasser staut über undurchlässigen Tonschichten und speist Quellen und Brunnen.

Die Arbeitshypothese des Vorhabens war, dass die Ost- und Südteiche von Hattuša während der Wintermonate aus den dann ansteigenden Grundwasserleitern gefüllt wurden. Diese Möglichkeit wurde bereits von Seeher (2006) für die Ostteiche erwogen, aber verworfen, da er nur die Schüttung des heutigen Weidebrunnens direkt oberhalb der Teiche berücksichtigte. Diese Quelle (Kör Ahmet'in Pınarı) läuft ganzjährig wäre jedoch nicht ausreichend. Ein Einschnitt in den Quellhorizont über die ganze Länge der Teiche lässt jedoch bedeutend mehr Wasser austreten als die Punktquelle eines Brunnens.

Um die Theorie zu überprüfen, wurden im September 2009 vier Grundwassermessstellen eingerichtet, jeweils zwei an den Ost- und Südteichen. Die Bohrungen wurden unmittelbar an den Südrändern der Teiche, also im Bereich des vermuteten Zustroms, niedergebracht, jedoch im gewachsenen Boden, um nicht die Teichwände zu durchstoßen. Die Bohrungen und Messrohre erstrecken sich bis unter die bei den Grabungen ermittelten Höhen der Teichsohlen (Rohrtiefe: Ostteiche, ca. 5 m; Südteiche, ca. 8 m unter Gelände). Die Filterbereiche der Brunnenrohre haben Längen von 2 m bei den Ostteichen und 4 m bei den Südteichen und sind in Filterkies eingebettet. Abb. 3 zeigt den heute verlandeten Ostteich 1 mit der Oberkante des Böschungspflasters. Die vorherrschende Grundwasserströmung kommt von der

Hügelseite (blauer gepunkteter Pfeil). Die Grundwassermessstelle 1 ist eingezeichnet. Die Grundwasserstände werden wöchentlich mit einem Kabellichtlot gemessen. Zusätzlich ist ein weiteres Messrohr mit einer Drucksonde mit Data Logger (SEBA-MDS Dipper 3) ausgestattet.



Abb. 3: Osteich 1 (Doğu havuz 1), Foto von der Nordwest-Ecke in Süd-Ost-Richtung. Blauer Pfeil: Richtung der Grundwasserströmung; oranges Symbol: ungefähre Ort der Grundwassermessstelle; schwarzer Pfeil: Weidebrunnen.

Während der Bohrungen im September 2009, dem trockensten Monat des Jahres, wurden nur Spuren von Wasser angetroffen. Nach den ersten stärkeren Regenfällen im Oktober begannen die Wasserstände auf Höhen zu steigen, die deutlich über den vermuteten höchsten Teichwasserständen lagen und damit zur Füllung der Teiche geführt hätten. Abb. 4 zeigt die Ganglinie des Grundwasserstandes 2009-2011 bei Osteich 1 und eine Demonstration der hydraulischen Füllungsvorgänge.

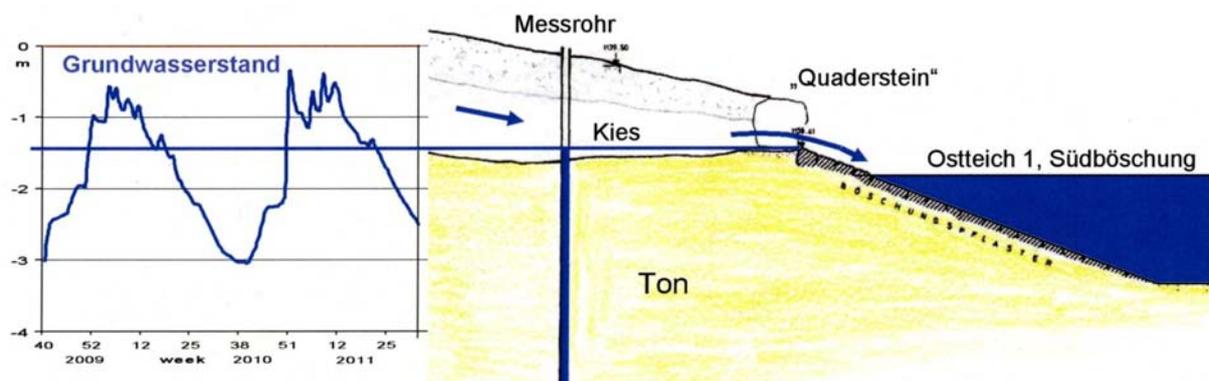


Abb. 4: Ganglinie des Grundwasserstandes und Füllungsvorgang am Osteich 1. Der Schnitt durch die gepflasterte Teichböschung entspricht den Ausgrabungen von Neve, 1991.

Die Böschung des Osteiches ist in den undurchlässigen Tonboden gegraben während die nördlichen und westlichen Begrenzungen aus kleinen Dämmen mit Trapezquerschnitt mit Lehmkern bestehen (rechts außerhalb des Bildes). Die Böschung ist gepflastert und mit einer Reihe von „Mauerquadern“ auf dem Rand versehen. Hinter diesen Mauerquadern, über dem undurchlässigen Boden, liegt eine durchlässige Kiesschicht, die von Wasser durchströmt werden kann. Wenn das Grundwasser über die undurchlässige Schicht steigt, fließt es durch das durchlässige Material in den Teich. Wie die Ganglinie zeigt, befindet sich der Grundwasserspiegel während mehrerer Wintermonate in diesem Höhenbereich und die Teiche werden zuverlässig gefüllt. Um ein unkontrolliertes Überlaufen und damit eine Beschädigung der Dämme während dieser Monate ständigen Zuflusses zu vermeiden, waren „Hochwasserentlastungsanlagen“ notwendig, die das überschüssige Wasser abführten. Die Überläufe waren vermutlich an der Ostecke von Teich 1 und an der Nordecke von Teich 2. Dort befinden sich noch heute Steinansammlungen, die als Reste der Bauwerke zur Ableitung talwärts gedeutet werden können.

Obwohl aus Grundwasser und Quellen, verlor das in den Teichen gespeicherte Wasser während des Sommers wohl bald seine Qualität als Trinkwasser. Es war jedoch ein wichtiger Vorrat zum Feuerlöschten, zur Tränkung des Viehs, für Gartenbau, Handwerk und kulturelle Zwecke. Es ist noch nicht geklärt, wie das Wasser den Teichen entnommen wurde. Eine Möglichkeit ist die Nutzung der beiden Kammern, Steinbauten im westlichen Abschlussdamm von Teich 1, als Auslassbauwerke („Schleusen“). Ebenso könnte das Wasser mit Eimern entnommen worden sein. Die steinerne Rampe in der nördlichen Ecke (Abb. 3, unten rechts) bietet Platz für eine Eimerkette von Männern zur Feuerbekämpfung. Weitere Untersuchungen werden diese Fragen betreffen.

Die Grundwasserstände an den Süchteichen zeigen eine sehr ähnliche jahreszeitliche Variation mit einer größeren Amplitude. In den Sommermonaten fallen sie unter die tiefste Messhöhe, steigen jedoch im Winter für mehrere Wochen um bis zu sechs Meter. Über die durchlässigen Deckschichten konnte das Wasser die Süchteiche für den Verbrauch im Sommer füllen. Abb. 5 zeigt die Ganglinien der Grundwasserstände bei den Osteichen und den Süchteichen und, für einen Vergleich, die Ganglinie der gemessenen Schüttung des Weidebrunnens bei den Osteichen.

## **Folgerungen**

Die transdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Archäologie und Hydrologie / Wasserbau führt zu einem besseren Verständnis der Funktion hethitischer Wasserbauten. Messungen legen nahe, dass die Teiche und Speicher wesentlich durch den Anschnitt Wasser führender Schichten mit Grundwasser gefüllt wurden. Die relativ einfache Technologie erlaubte eine sichere Wasserversorgung und Speicherfüllung, während die Risiken stark schwankender Oberflächenzuflüsse vermieden wurden. Hattuša liegt in einem topographisch und hydrographisch ungünstigen Gelände, das auf den ersten Blick nicht für die Anlage einer großen Stadt geeignet erscheint. Die beschriebene Technologie der Nutzung von Grund- und Schichtenwasser war eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung Hattušas zur Hauptstadt eines Großreiches.

## **Danksagung**

Das Vorhaben wurde durch die GRH-Stiftung (Gisela und Reinhold Häcker Stiftung, Österingen) gefördert. Gedankt wird auch der Antikenbehörde der Türkei für die Genehmigung der Feldarbeiten

und Messstationen sowie dem Deutschen Archäologischen Institut DAI (Grabungsleiter PD Dr. Andreas Schachner) für die Anregungen und gute Zusammenarbeit.

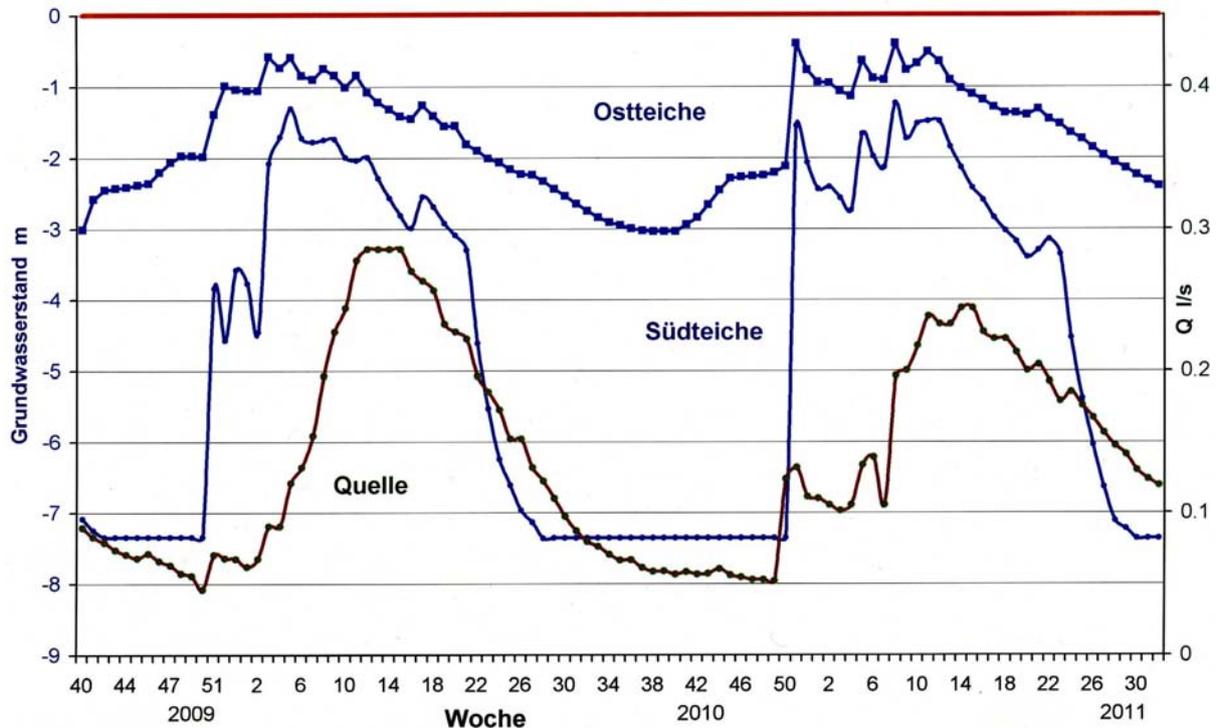


Abb. 5: Ganglinien der gemessenen Grundwasserstände 2009 - 2011 und Quellschüttung.

## Literatur

- Emre, K. (1993). The Hittite Dam of Karakuyu. In: H.I.H. Prince Takahito Mikasa (ed.), *Essays on Anatolian Archaeology, Bulletin of the Middle Eastern Culture Center in Japan VII*, Wiesbaden, 1-42
- Hüser, A. (2007). *Hethitische Anlagen zur Wasserversorgung und Entsorgung, Kuşaklı-Sarissa 3*, Rahden.
- Inak, I., Kaleyçi, H., Kaviş, M. (2009). Hittite Dam from 1250 B.C. towards today, *DSİ Devlet Su İşleri, Türkische Republik*.
- Neve, P. (1991). Die Ausgrabungen in Boğazköy-Hattuša 1990, *AA 1991*, 337-344
- Neve, P. (1992). Die Ausgrabungen in Boğazköy-Hattuša 1991, *AA 1992*, 307-338
- Puchstein, O. (1912). Boghazkoei, Die Bauwerke. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen der Deutschen Orient-Gesellschaft: WVDOG*, 53-61
- Schachner, A., Wittenberg, H. (2012). Zu den Wasserspeichern in Boğazköy - Hattuša und der Frage ihrer Befüllung. *Deutsches Archäologisches Institut, Berlin*, im Druck.
- Schoop, U.D., Seeher, J. (2006). Absolute Chronologie in Boğazköy-Hattuša: Das Potential der Radiokarbon daten. In: D.P. Mielke, U.-D. Schoop, J. Seeher (Hrsg.), *Strukturierung und Datierung in der hethitischen Archäologie, BYZAS 4*, 197-214
- Seeher, J. (2001). Die Ausgrabungen in Boğazköy-Hattuša 2000. *Archäologischer Anzeiger*, 2001/3, 333-362
- Seeher, J. (2006). Die Untersuchungen im Bereich der Osteiche in der Oberstadt 1996-1998. In: J. Seeher (Hrsg.), *Boğazköy-Berichte 8*, Mainz, 1-23

# Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsbereich zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei

## Teil 1: Evapotranspiration und Energiebilanz

Stefanie Minderlein und Lucas Menzel

Institut für Geographie, Universität Heidelberg, Deutschland

### Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Integriertes Wasser Ressourcen Management in Zentralasien - Modellregion Mongolei (MoMo)“ werden die Komponenten der Wasserbilanz im Teileinzugsgebiet des Sugnugur (Abb. 1), einem der wichtigsten Oberläufe des Kharaa Einzugsgebietes, untersucht. Da das Untersuchungsgebiet im Grenzbereich zwischen Taiga und Steppe liegt und weitgehend unberührt ist, kommt dieser Studie eine wichtige Bedeutung für die Sicherung der knappen Wasserressourcen in der Mongolei zu. Die Gebirgstaigazone stellt das wichtigste Quellgebiet für die angrenzenden, besiedelten Steppenregionen dar. Klimaszenarien prognostizieren einen Anstieg der durchschnittlichen Temperatur und Veränderungen im Niederschlag und damit auch der Bodenfeuchte, was wiederum Auswirkungen auf die Evapotranspirationsraten und die Vegetationsentwicklung von Steppe und Taiga innerhalb der Gebirgswaldsteppe hat.

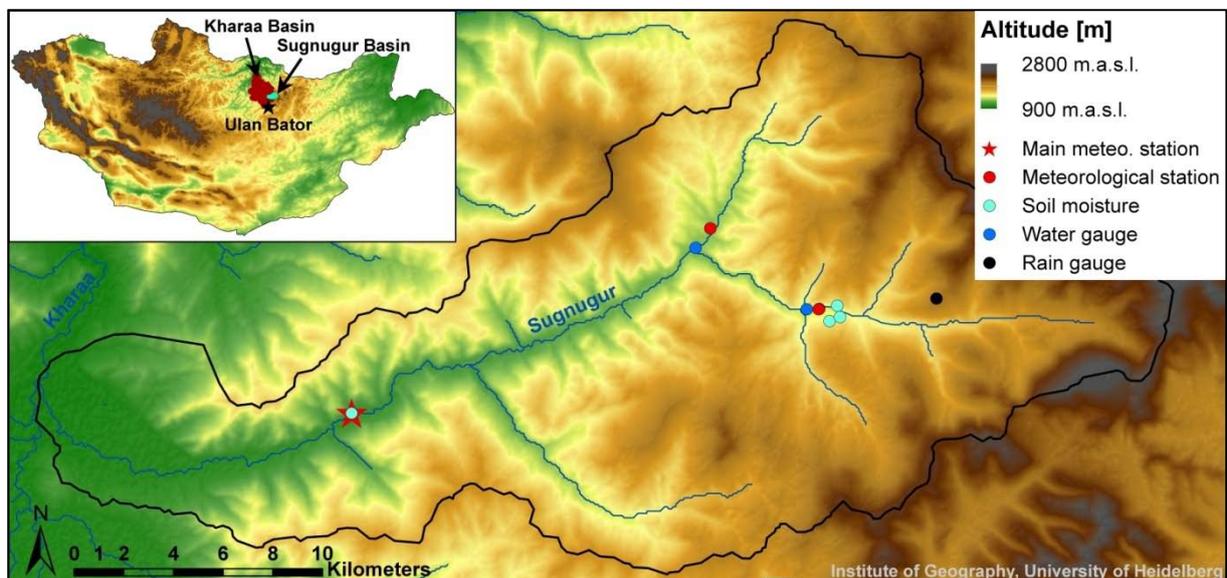


Abb. 1: Topographische Karte des Sugnugur Einzugsgebietes. Die Beobachtungspunkte des Messprogramms (u.a. hydrometeorologischer Hauptstation) sind dargestellt.

Um die Evapotranspiration für die Wasserbilanzgleichung zu bestimmen, werden seit Sommer 2011 die wichtigsten Parameter (Lufttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Komponenten der kurzwelligen und langwelligen Strahlung, Niederschlag sowie Schneehöhe im Winter) über eine stationäre und zwei temporäre meteorologische Messstationen zusammen mit einem Bodennessfeld (Bodentemperatur, -feuchte und Bodenwärmestrom) erfasst. In die Berechnung der Evapotranspiration fließen der Penman-Monteith Ansatz mit den Verdunstungswiderständen unter Berücksichtigung der hydrometeorologischen, bodenspezifischen und Vegetationsparametern sowie der Limitierung durch die Bodenfeuchte, die u.a. vom Bodentyp abhängig ist, mit ein. Weiterhin wird das physikalisch-basierte, ökohydrologische Modell TRAIN angewendet.

Erste Ergebnisse zeigen Niederschlagsmaxima während der Sommermonate: 94 mm im Juli und 63 mm im August. Die Sommerniederschläge machen ca. 70 % des Jahresniederschlages aus (Menzel et al., 2011). Der volumetrische Bodenwassergehalt der Kastanozeme variierte zwischen 5.4 % und 36.8 % in 10 cm Tiefe, was auf sehr trockene Böden schließen lässt, vor allem während sonnigen und niederschlagsarmen Phasen, wie z.B. Mitte August. Die mittlere Globalstrahlung im Juli betrug  $-243.34 \text{ W m}^{-2}$  mit Maxima über  $-1000 \text{ W m}^{-2}$ . Der mittägliche Anteil des Bodenwärmestroms zur Nettostrahlung im Juli und August machte jeweils 19 % und 24 % aus. Durch hohe Strahlungsraten und Bodentemperaturen ( $> 30^\circ\text{C}$  in 5 cm) sowie geringe Bodenfeuchten kommt es zu einem hohen Verhältnis von aktueller Evapotranspiration zu Niederschlag von 0.9 während der Sommerperiode, wodurch das Wachstum von Bäumen an den südexponierten Hängen innerhalb der mongolischen Gebirgswaldsteppe gehemmt wird (Dulamsuren und Hauck, 2008). In diesem semi-ariden Untersuchungsgebiet unterliegt die Evapotranspiration relativ großen Schwankungen, mit Raten von  $0.4 \text{ mm Tag}^{-1}$  bis  $5.1 \text{ mm Tag}^{-1}$  im Juli, die hauptsächlich von der Strahlungsintensität und der Limitierung durch die Bodenfeuchte gesteuert werden.

Während der Feldphase 2012 werden der latente und sensible Wärmestrom über die Bowen Verhältnis Energiebilanz Methode bestimmt indem die Gradienten der Lufttemperatur und des Dampfdruckes zwischen zwei Höhen (0.5 und 2.0 m) verwendet werden. Mit der gemessenen Verdunstung kann die modellierte Evapotranspiration kalibriert und validiert werden.

## Literatur

- Dulamsuren, C., M. Hauck, (2008). Spatial and seasonal variation of climate on steppe slopes of the northern Mongolian mountain taiga. *Grassland Science* 54, 217-230.
- Menzel, L., J. Hofmann, R. Ibisch, (2011). Studies of water and mass fluxes to provide a basis for an Integrated Water Resources Management (IWRM) in the catchment of the River Kharaa in Mongolia. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55 (2), 88-10.

# Wasserbilanz eines Oberlaufes im Übergangsbereich zwischen Steppe und Taiga im Kharaa Einzugsgebiet, Mongolei

## Teil 2: Abfluss und Bodenfeuchte

Benjamin Kopp und Lucas Menzel

Institut für Geographie, Universität Heidelberg, Deutschland

### Zusammenfassung

Die prognostizierte signifikante Erhöhung der jährlichen Durchschnittstemperatur in der borealen Zone wird zu nachhaltigen Veränderungen der Wasserverfügbarkeit führen. Insbesondere in semi-ariden Gebieten können bereits kleine Veränderungen in der Wasserbilanz die Wasserverfügbarkeit stark beeinflussen. In der Studie zur regionalen Hydrologie im Rahmen des IWRM Projektes „Integriertes Wasserressourcen Management in Zentralasien: Modellregion Mongolei“ werden die Komponenten der Wasserbilanz (Niederschlag, Abfluss und Evapotranspiration) in einem, von menschlichen Aktivitäten weitgehend unbeeinflussten, Hauptquellgebiet des Kharaa Flusses untersucht.

Das Untersuchungsgebiet im Sugnugur Einzugsgebiet liegt im Khentii Gebirge, nördlich von Ulan Bator, Mongolei (Abbildung 1). Es zeichnet sich durch ein semi-arides Klima aus, mit einer jährlichen Niederschlagsmenge < 400 mm, von denen 70 % in den Sommermonaten fallen (Menzel et al., 2011). Auf Grund der jährlichen Niederschlagsverteilung kann es während Austrocknungsperioden in Frühjahr und Herbst zu ausgeprägten Waldbränden kommen (zuletzt 2009 und 2010). Je nach Intensität kann die Vegetation mitsamt der organischen Auflage zerstört werden, mit nachhaltigen Veränderungen der relevanten Abflussprozesse.

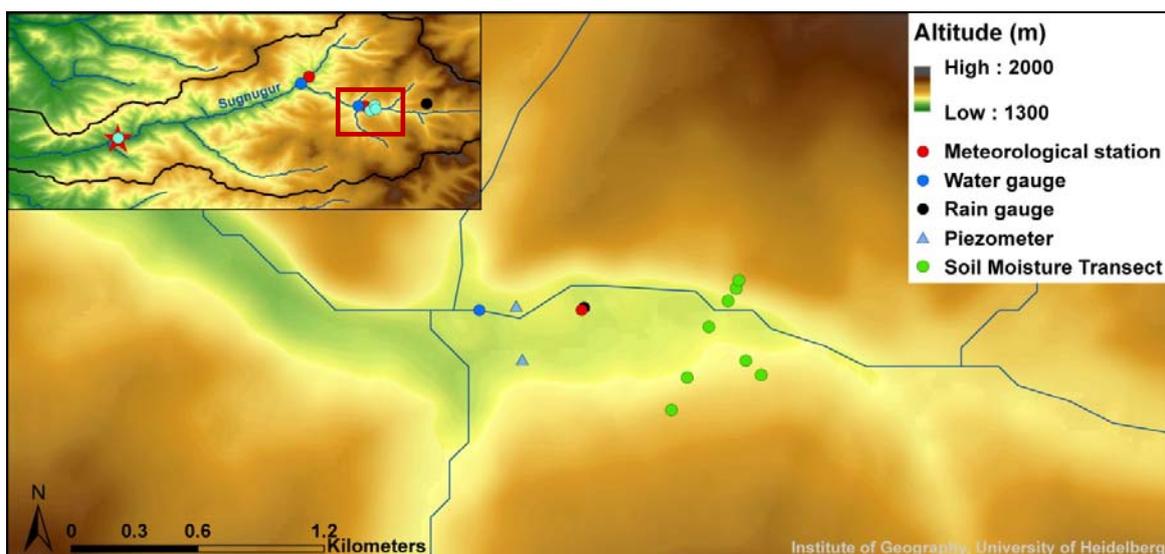


Abb. 1: Topographische Karte des Sugnugur Einzugsgebietes (oben links) und der Instrumentierung der Intensivmessfläche.

Während des Untersuchungszeitraumes im Sommer 2011 wurden Pegelstellen errichtet und die Abflussmenge anhand von Wasserstands-Abflussbeziehungen ermittelt. Des Weiteren wurden Bodenfeuchtemessfelder installiert, die sich entlang eines Transektes von einem südexponierten, unbewaldeten Gebirgshang, über die Flussaue in einen nordexponierten, bewaldeten Hang erstrecken. Parallel wurden in einem nordexponierten, verbrannten Wald (Brand: 2009 oder 2010) ebenfalls Bodenfeuchtemessfelder installiert. Zusätzlich wurden an jedem Transektpunkt Infiltrationsraten gemessen und Proben zur Bestimmung von Porosität und Wasserspannungskurve genommen.

Exposition, Hangneigung und Vegetation sind die wichtigsten steuernden Faktoren der Bodentemperatur und der Bodenfeuchteverteilung im Untersuchungsgebiet. Südexponierte Hänge sind geprägt durch die niedrigsten Werte und die größte zeitliche Dynamik (5.5% Volumetrischer Wassergehalt (VWC) in 10 cm Tiefe während Trockenperioden gegenüber 32.5% VWC nach Niederschlagsereignissen). Nordexponierte Hänge weisen stabilere und signifikant höhere Bodenfeuchten auf (35.1% VWC – 46.1% VWC in 10 cm Tiefe). Im verbrannten Wald wurden geringere Bodenfeuchtwerte als im intakten Wald gemessen (25.6% VWC – 31.7% VWC in 10 cm Tiefe). Auch die Verteilung der Infiltrationsraten variiert entlang des Transektes, mit den geringsten gemessenen Werten an den südexponierten Hängen. Mit Ausnahme der Flussaue traten die größten Raten im Wald auf. Geringere Raten im verbrannten Wald weisen auf eine hydrophobe, oberflächennahe Schicht hin, die nach Waldbränden auftreten kann (DeBano, 2000).

Der Vorfluter zeigt, bis auf ein extremes Hagelereignis am 19.7.2011, eine schnelle Reaktion auf Niederschlagsereignisse. Oberflächenabfluss der südexponierten Hänge und Interflow aus nordexponierten Hängen dominieren bei Starkregenereignissen. Ein ausgeprägter Tagesgang des Abflusses ist während Trockenzeiten zu beobachten. Anhand von Tracerversuchen und der Bestimmung stabiler Isotope sollen in der Feldphase 2012 verstärkt die abflussgenerierenden Prozesse der südexponierten Hänge, der bewaldeten, und der verbrannten nordexponierten Hänge untersucht werden. Mit Hilfe des gewonnenen Systemverständnisses wird ein hydrologisches Modell (HBV-D) erstellt, und auf Basis von Klimaszenarien sollen mögliche Entwicklungen vorhergesagt werden.

## Literatur

- DeBano L.F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231-232, 195-206
- Menzel L., J. Hofmann, R. Ibisch, 2011. Studies of water and mass fluxes to provide a basis for an Integrated Water Resources Management (IWRM) in the catchment of the River Kharaa in Mongolia. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55 (2), 88-10

# **Modellierung der Wasser- und Stoffflüsse in der Westsibirischen Tiefebene unter dem Einfluss von Landnutzungs- und Klimawandel mittels CoupModel und SWAT**

Olga Kolychalow, Antje Dietrich, Britta Schmalz und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Westsibirische Tieflandebene unterliegt einem intensiven Landnutzungs- und Klimawandel. Die von Süden nordwärts voranschreitende Desertifikation und der Anbau von Bioenergiepflanzen führen zu einer Verlagerung der Ackerflächen nach Norden aus der Wald-Steppe in die südliche Vor-Taiga hinein. Zudem führt das aktuelle Bodenmanagement zu einem Rückgang der Bodenfruchtbarkeit. Im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojektes SASCHA (Sustainable land management and adaptation strategies to climate change for the West Siberian corn-belt) soll in einem genesteten Ansatz die Interaktion des Wasser- und Stoffhaushaltes auf Schlag- und Landschaftsskala erfasst und modelliert werden. Aufgrund der unterschiedlichen natürlichen Landschaftseinheiten und der agrarstrukturellen Gegebenheiten, erfolgt die Analyse entlang eines Landnutzungs- und Klimagradienten. Daten auf Schlagebene sollen über CoupModel (Jansson & Karlberg 2004) aggregiert werden und in SWAT (Arnold et al. 1998) als differenzierte Landnutzung- und Managementoptionen einfließen. Die aufgesetzten Modelle sollen zur Entwicklung und Bewertung von standortspezifischen Anpassungsstrategien unter Berücksichtigung von Landnutzungs- und Klimaveränderungen dienen.

# Wasserhaushalt des Feuchtgebiets Nabajjuzi in Uganda, East Africa

Astrid Unterberger

Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Wasserhaushalt jenes Abschnittes des Feuchtgebiets Nabajjuzi in Uganda, Westafrika, analysiert, in welchem Wasserentnahme durch die Bevölkerung der Stadt Masaka stattfindet. Ziel der Arbeit ist, eine Grundlage für ein Entscheidungskonzept zur zukünftigen Wasserversorgung der Bevölkerung zu schaffen. Das Papyrusfeuchtgebiet gehört zu den "Wetlands of International Importance" laut Ramsar Konvention. Es beherbergt zahlreiche bedrohte und endemische Arten. Außerdem dient es als Wasserressource für die Bevölkerung der anliegenden Stadt Masaka und für die Bauern der Umgebung. Dieses Gebiet ist durch den Klimawandel und die rasch ansteigenden Bevölkerungszahlen potentiell bedroht. Anhand von bestehenden Bevölkerungswachstums- und Klimaprojektionen werden Wasserbilanzen für die nächsten 40 Jahre simuliert. Das Ergebnis der Bevölkerungswachstumsprojektion stellt sich in Form einer Simulation des Wasserverbrauchs der Stadt Masakabis 2050 dar. Die Klimaprojektionen wurde vom Potsdam Institute for Climate Impact Research auf Basis zweier unterschiedlicher Modelle generiert, geben also zwei von vielen Möglichkeiten der Klimaentwicklungen wieder. Die eigentliche Simulation wird auf Basis des "Linearer Speicher" - Modells durchgeführt, mit den Eingangsdaten Zufluss, Abfluss, Wasserstand und Wasserverlust (durch Entnahme und Evapotranspiration). Die Berechnung wird am Computer durchgeführt. Das Modell wurde anhand von Messungen der Water and Seweage Corporation Uganda (April-Mai 2010) und selbst durchgeführten Messungen kalibriert. Weitere Daten 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 und stark sinkendes Wasservolumen. Es kann angenommen werden, dass die Wasserqualität für die Trinkwasserversorgung und die Quantität zur Erhaltung des Feuchtgebietes über längeren Zeitraum nicht mehr gegeben sein wird.

# **Charakterisierung des Abflussverhaltens eines Flusses (Gunt) im semi-ariden Pamir Tadschikistans mittels stabiler Isotope, Hydrochemie und Fernerkundung**

Christiane Ebert<sup>1</sup>, Malte Knoche<sup>1</sup>, Stefan Geyer<sup>1</sup>, Tino Rödiger<sup>1</sup>, Richard Gloaguen<sup>2</sup>, Eric Pohl<sup>2</sup>, Karsten Osebrück<sup>3</sup>, Jamila Baidulloeva<sup>4</sup> und Stephan M. Weise<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Halle, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Deutschland

<sup>4</sup> State administration for hydrometeorology, Dushanbe, Tadjikistan

Im westlichen Tibet und dem ariden zentralasiatischen Tiefland sind erneuerbare Wasserressourcen aufgrund von massiver Ausbeutung und dem deutlichen Einfluss von Klimaänderungen hinsichtlich ihrer Quantität und Qualität stark gefährdet. Die großen Flusssysteme Panj und Amu-Darya werden durch Schmelzwässer aus dem Pamir-Gebirge u.a. von Ost-Tadschikistan gespeist. Im Gegensatz zu den vom Sommermonsun beeinflussten zentralasiatischen Gebirgsregionen Himalaya und Hindukush fallen die Niederschläge im Pamir überwiegend als Schnee in den Winter- und Frühlingsmonaten. Die Ursache sind die Westwinde (westerlies) aus dem Atlantikraum.

Hauptziel des Projektes ist es, die hydrologischen Schlüsselprozesse wie Abflussbildung und Grundwasserneubildung in einem exemplarischen Einzugsgebiet im Pamir Tadschikistans zu verstehen und auf den Großraum zu übertragen. Besondere Beachtung muss daher auf die Untersuchung der hydrologischen Systeme der Neubildungsgebiete gelegt werden, die durch die Kombination von Fernerkundungstechniken, isopenhydrologischen Methoden und innovativen hydrologischen Simulationsmodellen charakterisiert werden.

Hierzu gehören detaillierte Grundwasserstudien und die Untersuchung des Einflusses klimatischer Schwankungen auf die saisonale Dynamik des Oberflächenabflusses.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf das Einzugsgebiet des Gunt' (ca. 14000 km<sup>2</sup>) im tadschikischen Teil des Pamirs, welches als repräsentativ für die gesamte Region angesehen wird. Ziemlich in der Mitte des Gunt-Einzugsgebiets befindet sich ein natürlicher Stausee, Yashikul, der eine Länge von ca. 20 km aufweist.

Um die Herkünfte, die Interaktionen und die Dynamiken der ober- und unterirdischen Abflusskomponenten abschätzen zu können, wurden und werden monatlich Grund- und Flusswasserproben für isotopische und hydrochemische Analysen genommen.

Die Neubildung, Verweilzeiten und Komponenten des abfließenden Wassers werden mit Hilfe von hydrochemischen Untersuchungen der Hauptionen und Spurenelemente sowie stabiler und radioaktiver Umweltisotope (z.B. <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>7</sup>Li, <sup>18</sup>O, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>87</sup>Sr) charakterisiert und quantifiziert. Zur Beobachtung der Eisflächendynamik werden Fernerkundungsdaten genutzt, mit denen die Veränderung vergletscheter Gebiete während der letzten Jahrzehnte nachvollzogen wird.

Seit August 2011 wurden monatlich Wasserproben aus dem Gunt sowie von ausgewählten Zuflüssen und Grundwasserstellen genommen. Unter anderem wurden an den Proben die Isotope des Wassers ( $^3\text{H}$ ,  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$ ) und die Hauptanionen- und Kationen untersucht und auf die „Fingerabdrücke“ unterschiedlicher Einzugsgebiete hin ausgewertet (Abbildung 1).

Die Isotopendaten zeigen, dass das Gunt-Wasser mit zunehmender Fließlänge eine Anreicherung an schweren Isotopen erfährt. Ein Grund dafür dürfte der sogenannte Höheneffekt sein, da von der Quelle bis zur Mündung des Gunt eine Höhenunterschied von ca. 4500 m vorliegt.

Weiterhin zeigen die Daten, dass die isotopische Signatur des Gunt-Wassers hauptsächlich durch das Seewasser des Yashikul geprägt ist, jedoch vor allem in den Sommermonaten stark durch jene von Schnee- und Gletscherwasser überprägt wird. Unterschiede in der Isotopie der Zuflüsse deuten auf regionale Unterschiede in Abhängigkeit von der Westwind-Exposition der Subcatchments hin. Somit können die Isotopendaten ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) Informationen über die Höhe der Teileinzugsgebiete sowie deren Exposition zu den Westwinden liefern.

Die Konzentrationen von Anionen und Kationen sind im Untersuchungsgebiet im Allgemeinen sehr niedrig. Es sind dennoch große Unterschiede in der Mineralisierung des Gunt-Wassers und des Wassers der Zuflüsse zu verzeichnen. Mit zunehmender Fließlänge des Gunt‘ nimmt sein Gehalt an Anionen und Kationen ab, d.h. das Wasser des Stromes wird durch die geringer mineralisierten Zuflüsse verdünnt.

Mit Hilfe der hydrochemischen Daten sollen die Beiträge der Nebenflüsse zum Abflussgeschehen des Gunt‘ quantifiziert werden.

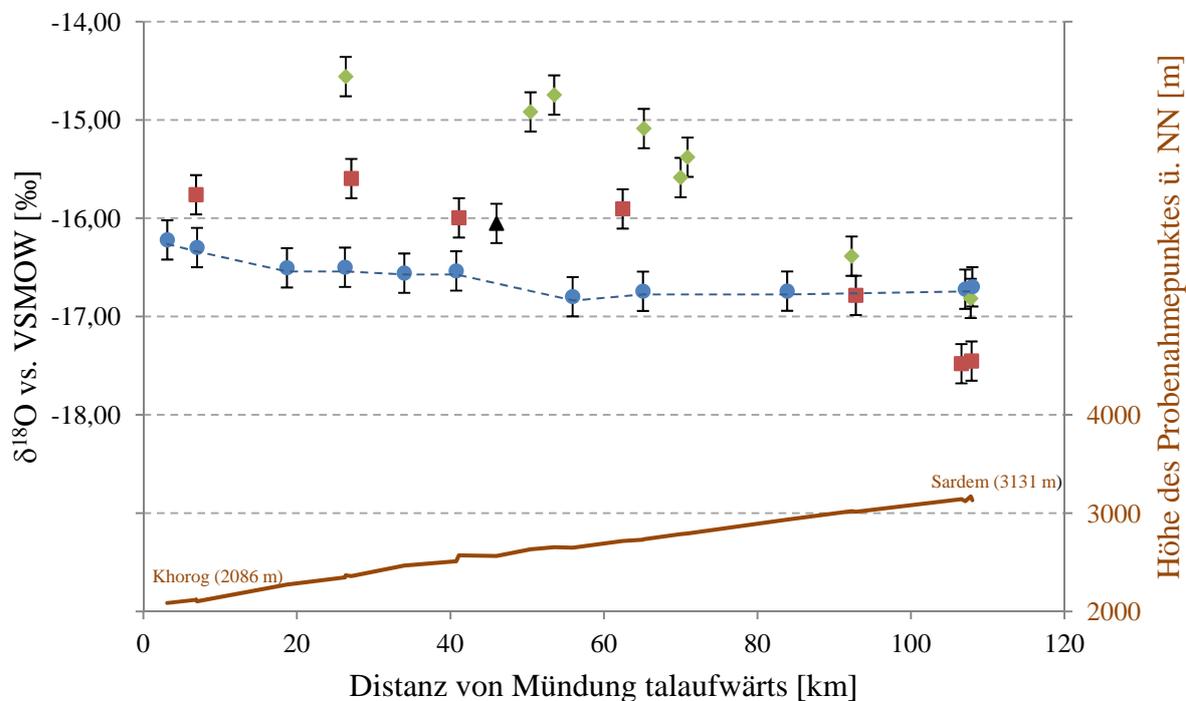


Abb. 1:  $\delta^{18}\text{O}$ -Verteilung im Gunt-Einzugsgebiet mit Fehlergrenzen (gepunktete Linien) der Probenahme im November 2011; blaue Punkte = Gunt, rote Quadrate = Zuflüsse aus Süden, grüne Rauten = Zuflüsse aus Norden, schwarzes Dreieck = Grundwasser, braune Linie = Höhenprofil der Probenahmestandorte.

# **Abschätzung der Auswirkungen des Landnutzungswandels in der Drei-Schluchten-Region in China auf Wasserquantität und -qualität durch Simulation von Landnutzungsszenarien mit dem Modell SWAT**

Katrin Bieger, Georg Hörmann und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Durch den Bau des Drei-Schluchten-Staudamms in China hat sich die Landnutzung in der Region in den vergangenen Jahren stark verändert. Es wird erwartet, dass sich die großräumige Umnutzung der Landschaft auch in der Zukunft fortsetzt. Da die Drei-Schluchten-Region sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht von großer Bedeutung ist, sollten die Auswirkungen verschiedener Landnutzungsmuster auf die Wasserquantität und -qualität bei der Entwicklung von Managementmaßnahmen berücksichtigt werden.

Felduntersuchungen zu den Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Einzugsgebieten sind sehr zeit- und arbeitsintensiv und erlauben zudem keine Abschätzung der Wirksamkeit von Managementmaßnahmen vor deren Implementierung. In dieser Studie wird daher das öko-hydrologische Modell SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al. 1998) verwendet, um den Abfluss sowie den Sediment- und Phosphortransport in der Drei-Schluchten-Region unter Annahme verschiedener Landnutzungsmuster abzubilden. Als Untersuchungsgebiet dient das 3200 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Xiangxi im Westen der Provinz Hubei. Durch die Analyse von Landnutzungskarten für die Jahre 1987, 1999 und 2007 wurden Trends des Landnutzungswandels identifiziert, die als Grundlage für die Entwicklung der Landnutzungsszenarien verwendet wurden.

Zur Kalibrierung und Validierung des Modells SWAT wurde die Landnutzungskarte für das Jahr 1987 genutzt. Die Kalibrierung des Abflusses erfolgte für die Jahre 1981 bis 1986 und resultierte in guten Simulationsergebnissen (NSE = 0,70; R<sup>2</sup> = 0,70). Die Validierung der Abbildung des Sediment- und Phosphorhaushalts im Xiangxi-Einzugsgebiet erwies sich aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Messdaten als problematischer. Dennoch können die Kalibrierungsergebnisse als Grundlage für die Simulation der Szenarien verwendet werden. Dementsprechend können die Auswirkungen verschiedener Landnutzungsmuster auf den Abfluss sowie die Sediment- und die Phosphorfrachten am Pegel Xingshan und auf einzelne Komponenten des Wasserhaushalts (Verdunstung, Oberflächenabfluss, Grundwasserabfluss) mit dem Modell SWAT quantifiziert werden. Durch die räumliche Betrachtung der Sediment- und Phosphorausträge können Belastungsschwerpunkte identifiziert werden, an denen Maßnahmen zur Verringerung der Stoffausträge gezielt ansetzen sollten.

# Der Effekt von Baumarten auf die Versickerungsraten auf einer tropischen Aufforstung

Matthias Sprenger, Sebastian Wolf, Nina Buchmann, Werner Eugster, Lutz Weihermüller,  
Wolfgang Wilcke und Yvonne Oelmann

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Studien haben gezeigt, dass Aufforstungen den lokalen Wasserhaushalt beeinflussen. In dieser Studie wurden i) Bodenwasserflüsse berechnet und der Effekt von ii) verschiedenen Baumarten und iii) Artenvielfalt von Bäumen auf das Sickerwasser in einer experimentellen Plantage in Panama untersucht. Die Analysen wurden für die Regenzeiten in 2007 und 2008 in Sardinilla (Panama) für Flächen, in denen einheimische Baumarten in Monokultur ( $n = 2$  je Art) und in Mischungen von drei oder sechs Arten gepflanzt worden sind (je  $n = 6$ ), durchgeführt. Meteorologische, hydrologische, pedologische und biologische Gegebenheiten wurden erfasst und die Evapotranspiration mit der Penman-Monteith Gleichung modelliert. Die Versickerung ist einerseits über eine Wasserbilanzierung berechnet worden, die Wasserinput, -output und Bodenspeicheränderungen beachtet, und andererseits über ein bodenphysikalisches Transportmodell (HYDRUS-1D) modelliert worden. Die Ergebnisse der Wasserbilanzierung und der Modellierung mit HYDRUS-1D hinsichtlich der Versickerung stimmten für alle Flächen überein ( $r = 0,92$ ,  $p < 0,001$ ). Bei den Monokulturen war die höchste Versickerungsrate ( $\pm$  SE) unter *Hura crepitans* ( $6,69 \pm 0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ) und die geringste unter *Luehea seemannii* ( $6,23 \pm 0,07 \text{ mm d}^{-1}$ ) zu verzeichnen. Die Mischkulturen von drei und sechs Baumarten wiesen Versickerungsraten von  $6,31 \pm 0,09$  bzw.  $6,36 \pm 0,08 \text{ mm d}^{-1}$  auf, wodurch ein signifikanter Effekt der Baumdiversität nicht festgestellt werden kann. Versickerungsraten wurden durch die Transpiration der unterschiedlich großen Biomassen auf den Flächen gesteuert ( $r = 0,615$ ,  $p = 0,002$ ). Daher zeigt diese Studie, dass der Wasserbedarf der Bäume einen Einfluss auf Wasserflüsse in tropischen Aufforstungen hat. Die Ergebnisse der Modellierung lassen darauf schließen, dass Mischkulturen mit Baumarten unterschiedlicher Wachstumsraten zu gemäßigten Versickerungsraten im Vergleich zu Monokulturen von schnell oder langsam wachsenden Baumarten führen.

# **Statistische Auswertung forstwirtschaftlicher Maßnahmen bzw. Störungen der Bestandesstruktur auf die Gewässerchemie**

Carina Sucker

Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Wasserqualität in bewaldeten Einzugsgebieten hängt überwiegend von natürlichen und anthropogenen Standortfaktoren ab und kann durch Bodenschuttkalkungen und Bestandeszusammensetzung bzw. durch Störungen der Bestandesstruktur durch Borkenkäferbefall und Sturmereignisse beeinflusst werden. Ziel meiner Untersuchung war es die Wirksamkeit der Maßnahmen zu quantifizieren und Aussagen abzuleiten, um in weniger gut untersuchten Gebieten Angaben über das Potential forstlicher Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität treffen zu können. Anhand von statistischen Analysen (multivariaten Regressionen, Korrelationen und Faktorenanalysen) wurden 86 Bäche aus dem Mittelgebirgsbereich in Deutschland, auf die die verschiedensten Maßnahmen und Störungen gewirkt haben, von 1980 bis 2009 chemisch ausgewertet. Forstwirtschaftliche Maßnahmen beeinflussen die Gewässerchemie der verschiedenen Einzugsgebiete in unterschiedlicher Weise, je nachdem wie stark die Beeinflussung war und wie gut die Puffer- und Filterkapazität im Gebiet selber ist, sind Maßnahmen und Störungen kaum im Bachwasser zu erkennen oder kurzfristig als Konzentrationsspitzen bzw. langfristig noch bis zu 10 bis 20 Jahre später erkennbar. Allgemein gültige Aussagen zur Wirksamkeit der Maßnahmen, ohne die spezifischen Standorteigenschaften genauer vor Ort zu untersuchen, lassen sich aufgrund der stark heterogenen Datenbasis und der geringen Datenbasis bei Borkenkäferbefall nicht treffen.

# Modellierung des Bodenwasserhaushalts und Analyse des Trockenstresses für zwei Waldstandorte im Odenwald

Jannis Groh<sup>1,2</sup>, Heike Puhmann<sup>2</sup> und Yvonne Morgenstern<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Deutschland

Die Modellierung und Untersuchung des Bodenwasserhaushalts sowie die Analyse von Trockenstressereignissen für Waldstandorte bilden ein wichtiges Kriterium für die Planung von Adaptionsmaßnahmen im Forstsektor und gewährleisten damit aus ökologischer und ökonomischer Sicht eine nachhaltige und an die Veränderung des Klimas angepasste Waldwirtschaft.

Hauptziel dieser Arbeit war die Abschätzung von Trockenstressereignissen im Bezug auf Anzahl, Dauer und Fehlmenge pro Jahr für einen Fichten- und einen Buchenstandort mittels Wasserhaushaltsmodellierungen (LWF-Brook90, Hammel und Kennel, 2001). Für diese Fragestellung wird eine Modellkalibrierung benötigt, welche die natürlichen Gegebenheiten der Wasserretentions- und –leitfähigkeitseigenschaften am Messstandort wiedergeben kann. Sehr oft werden diese hydraulischen Kennfunktionen über Labormessungen erhoben, welche nur bedingt in der Lage sind, die natürlichen Bedingungen am Standort wiederzugeben.

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Klimafolgenforschungsprojekts der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württembergs auf der Level II-Fläche Heidelberg durchgeführt und basierte auf Messungen der Wassergehalte und Saugspannungen in verschiedenen Bodentiefen. In einer der Modellkalibrierung vorgeschalteten Sensitivitätsanalyse wurden die sensitiven Modellparameter für den Wassergehalt und die Saugspannungen je Bodentiefe separat identifiziert. Anschließend wurden über einen Parameteroptimierungsalgorithmus die optimalen Parametersets und die Parameterunsicherheit für drei verschiedene Zielfunktionen bestimmt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass unterschiedliche Parameter für die Anpassung der einzelnen Outputvariablen verantwortlich sind. Die verschiedenen Parameteroptimierungsansätze bestätigten die Vermutung, dass ein kombinierter Ansatz der beste Weg ist, um eine Übereinstimmung für beide Outputvariablen (Wassergehalte und Saugspannungen) zu finden. Mit Einbezug der Feld-pF-Werte und einer modifizierten Gütefunktion für die Berechnung der posteriori-Dichteverteilung der Modellparameter im SCEM-UA-Algorithmus konnte eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Outputvariablen erreicht werden. In Abbildung 1 ist beispielhaft für die Modellkalibrierung das Ergebnis des kombinierten Ansatzes für den Buchenplot dargestellt.

Ein Vergleich der Trockenstressgrößen beider Standorte zeigte ein erhöhtes Stressrisiko für die Buche, welches auf das physiologische Transpirationsverhalten und die standörtlichen Bodeneigenschaften zurückgeführt werden kann. Der für die Trockenstressanalyse verwendete kritische Schwellenwert der Saugspannung von -1300 hPa (Puhmann et al., 2010) deckt sich gut mit dem von Granier et al. (1999) vorgeschlagenen Wert der kritischen relativen nutzbaren Feldkapazität von 0.4.

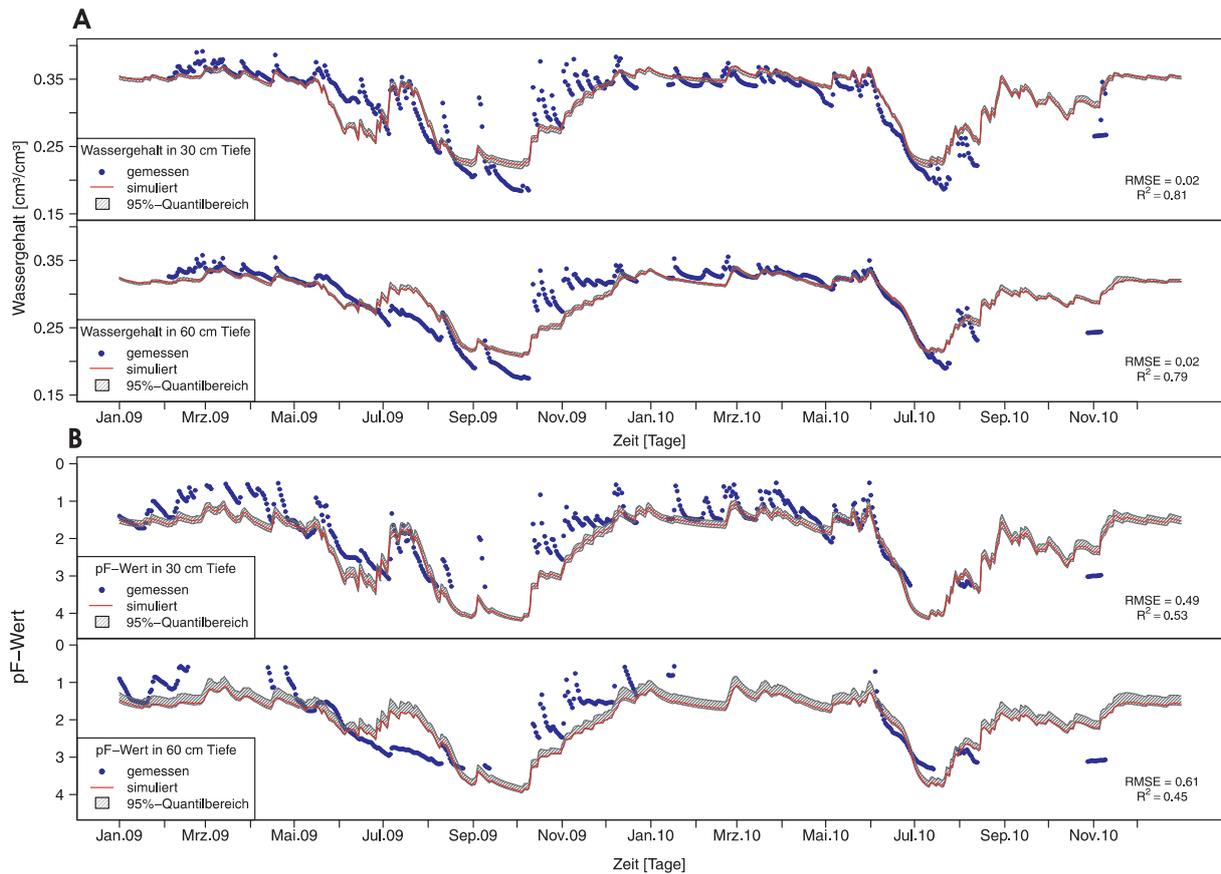


Abb. 1: Ergebnis der Modellkalibrierung und der Parameterunsicherheitsanalyse des kombinierten Optimierungsansatzes für den Wassergehalt (A) und die Saugspannung (B) in den Tiefen 30 cm und 60 cm für den Zeitraum von 01.01.2009 bis 31.12.2010 des Buchenstandorts.

## Literatur

- Granier A., N. Bréda, P. Biron, und S. Vilette (1999): A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116 (2-3), 269-283.
- Hammel K., und M. Kennel, (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München* (185).
- Puhlman H., Y. Morgenstern, A. Hölscher, und K. von Wilpert, (2010): Water stress induced transpiration reduction and effects on radial growth of beech, Zürich.

# Flächenbezogene Schätzung von physikalischen und hydraulischen Bodeneigenschaften aus Monitoringdaten

Klaus v. Wilpert<sup>1</sup>, Dietmar Zirlewagen<sup>2</sup>, Yvonne Mogenstern<sup>1</sup> und Heike Puhmann<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup> Interra, Büro für Umweltmonitoring, Kenzingen, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Deutschland

Für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts werden bodenphysikalische Messgrößen benötigt und meist nicht nur an den Bodenprofilen, an denen sie gemessen oder geschätzt wurden, sondern im flächigen Landschaftsbezug, wenn auf dieser Ebene Wasserhaushaltsmodelle eingesetzt werden sollen. Am Beispiel der ersten Wiederholung der Bodenzustandserfassung im Wald, mit 304 Bodenprofilen, wird gezeigt, wie in die Monitoringroutine die vergleichsweise aufwendig zu messenden bodenphysikalischen und bodenhydraulischen Messgrößen einbezogen wurden. Für die Regionalisierung von Texturparametern (Ton-, Schluff- und Sandgehalte) standen neben dem kompletten BZE II-Datensatz auch Daten von 324 sogenannten Musterprofilen des geologischen Landesamtes von Baden-Württemberg (LGRB) zur Verfügung (nur Waldstandorte). Zusätzlich zu deskriptiven bodenphysikalischen Parametern wurden mittels Multi-Step-Outflow Experimenten (MSO) die bodenhydraulischen Parameter nach Mualem und van Genuchten an allen nicht extrem skelettreichen Profilen bestimmt (Puhmann et al. 2009).

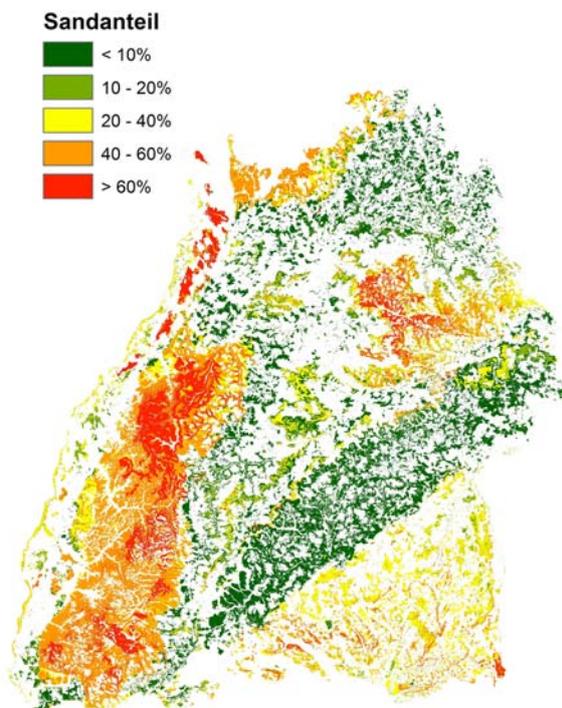


Abb. 1: Sandanteil im Feinboden <2 mm für ganz Baden-Württemberg, zusammengesetzt aus 6 regionalen Teilmodellen.

Bodenphysikalische Daten wurden entweder den Profilbeschreibungen als Schätzwerte entnommen, oder lagen in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm als Messwerte vor. Sie beinhalteten Parameter wie Trockenraumdichte der Feinerde (<2 mm), Grobbodenanteil, Bodentextur und Feinwurzdichte. Aus den Profilbeschreibungen der BZE wurde die Bodenentwicklungstiefe abgeleitet. Die Messgrößen wurden mittels multipler linearer Regressionsmodelle von den Messprofilen in die Fläche übertragen. Die Parameteridentifikation erfolgte als schrittweise, multiple Regressionsanalyse. Diese sog. Regionalisierungsmodelle erklärten mit Ausnahme der Feinwurzdichte zwischen 45 und 75 % der Varianz in den Messdaten (Tab. 1). Bei der Feinwurzdichte war die nicht erklärbare Variation deutlich höher, da diese Messgröße neben Gelände- und Bodendaten stark von Bestandesdaten wie Baumartenzusammensetzung und Bestandesdichte abhängt, die weder im Kalibrierdatensatz noch quasi kontinuierlich in der Fläche als „Übertragungsschlüssel“ verfügbar sind. Trotzdem konnten auch für diese Größe Modelle kalibriert werden, deren Standardfehler bei  $\pm 0,57 - 0,73$  Feinwurzeln pro  $\text{dm}^2$  lag. Die Modelle für die einzelnen Parameter setzen sich aus 4 – 5 regionalen Einzelmodellen für deutlich unterschiedliche Naturräume und ein Landesmodell zusammen. Dadurch soll weitgehend sichergestellt werden, dass die regional identifizierten Prädiktorensätze regionale Besonderheiten wie z.B. geologische Substrate oder die regionale Geländemorphologie adäquat abbilden (Zirlewagen u. v. Wilpert, 2011). Als Beispiel wird in Abb. 1 die landesweite Verteilung des Sandanteils im Boden gezeigt.

Tab. 1: Adjustiertes Bestimmtheitsmaß und Standardfehler der Geländemodelle für die bodenphysikalischen Kenngrößen Entwicklungstiefe, Trockenraumdichte, Textur und Feinwurzdichte für die Tiefenstufen 0-5cm, 5-10cm, 10-30cm, 30-60cm und 60-90cm.

	0-5cm		5-10cm		10-30cm		30-60cm		60-90cm		ganzes Profil	
	adj. r <sup>2</sup>	RSME										
<b>Entwicklungstiefe [cm]</b>											0,65	19,83
<b>TRD [g cm<sup>-3</sup>]</b>	0,56	0,12	0,60	0,14	0,53	0,18	0,42	0,24	0,41	0,09		
<b>Grobboden [Vol%]</b>	0,65	0,78	0,62	0,84	0,63	0,86	0,61	0,91	0,52	1,04		
<b>S, geschätzt [Gew%]</b>	0,66	11,28	0,67	11,68	0,74	10,53	0,65	12,04	0,65	12,46		
<b>S, gemessen [Gew%]</b>			0,73	13,40	0,68	14,94						
<b>U, geschätzt [Gew%]</b>	0,54	6,04	0,58	6,34	0,56	6,53	0,46	5,52	0,51	5,22		
<b>U, gemessen [Gew%]</b>			0,64	10,23	0,55	11,66						
<b>T, geschätzt [Gew%]</b>	0,66	4,86	0,60	5,60	0,66	5,26	0,48	5,23	0,56	5,03		
<b>T, gemessen [Gew%]</b>			0,71	7,20	0,60	9,46						
<b>Feinwurzdichte [n dm<sup>-2</sup>]</b>	0,20	0,57	0,20	0,60	0,23	0,57	0,33	0,64	0,30	0,73		

Vergleiche zwischen gemessenen bodenphysikalischen Daten, mittels der Regionalisierungsmodelle interpolierten Daten sowie den am Bodenprofil geschätzten Daten wurden durchgeführt um zu zeigen, welche dieser Datengrundlagen hinreichend geeignet für die Parametrisierung von Wasserhaushaltsmodellen ist und welche weniger. An 207, in den jeweils 100 – 200 km<sup>2</sup> großen Geländeauschnitten um die Level II Flächen Conventwald (Freiburg), Heidelberg, Esslingen und Ochsenhausen verteilten Bodenprofilen wurden parallel Schätzdaten und Messdaten für die bodenphysikalischen Eingangsgrößen der bodenhydraulischen Pedotransferfunktionen (PTF) nach Puhmann und v. Wilpert (2011) erhoben. Außerdem waren an den gleichen Profilen Schätzungen der gleichen Größen aus den regionalisierten Karten (siehe Beispiel in Abb. 1) verfügbar. In den Tiefen 10 und 30 cm wurden an je 3 – 5 100ml Stechzylindern mittels MSO Experimenten und der Parametrisierung eines Richards Modells auf dem Weg inverser Parameteroptimierung (Puhmann et

al., 2009) Wasserretentionsfunktionen abgeleitet. An diesem unabhängigen Datensatz (n=540 Proben) wurde die Anwendbarkeit der Pedotransferfunktion getestet. Dafür wurde die PTF an drei verschiedene Dateneingangssätze (Profilansprachen, regionalisierten Bodeneingangsgrößen und Labormesswerte) angewendet und mit den im Labor gemessenen Retentionsfunktionen verglichen. Der mittlere RMSE für die geschätzten Eingangsdaten ist mit  $0.066 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  ähnlich hoch wie für die regionalisierten Datensätze ( $0.064 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). Die Labordatensätze schneiden deutlich besser ab (RMSE =  $0.0404 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), da die Eingangsdaten wesentlich genauer sind als in Klassen geschätzten Eingangsparameter. Der Schätzfehler der PTF-PUH2 liegt zwischen  $0.04$  und  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Sowohl für die Profilansprachen als auch für die Regionalisierungsdaten werden die Schätzfehler zwar leicht überschritten, jedoch liegen diese noch im Fehlerbereich anderer Pedotransferfunktionen ( $0.02$ - $0.11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).

## Literatur

- Puhlmann, H. und v.Wilpert, K. (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 12, 61-71.
- Puhlmann, H., v.Wilpert, K., Lukes, M., Dröge, W. (2009): Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *Europ. J. Soil Science*, 60/5, 792-806.
- Zirlewagen, D. & v.Wilpert, K. (2011): Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenhydraulische Pedotransferfunktionen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 12: 73-83.

# Modellstudie zum Einfluss der Substratheterogenität auf die Bestimmung von Sickerwasserflüssen

Tobias L. Hohenbrink<sup>1,2</sup>, Gunnar Lischeid<sup>1,2</sup> und Uwe Schindler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Müncheberg, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Müncheberg, Deutschland

## Zusammenfassung

Bei Wasserbilanzbetrachtungen stellt die Bodenzone einen wichtigen Grenzbereich zwischen Atmosphäre und Grundwasser dar. Die Tiefenversickerung als Teilprozess der Grundwasserneubildung ist in der Praxis häufig schwer zu quantifizieren. Hierbei können bodenphysikalische Langzeitmessungen verwendet werden, um auf Basis des Darcy-Buckingham-Gesetzes Zeitreihen der Grundwasserneubildung einzelner Standorte abzuleiten.

Die betrachtete Methode beruht auf kontinuierlichen Bodenwassergehalts- und Saugspannungsmessungen in der Sickerwasserzone und erfordert eine einmalige Kalibrierung an die Wasserbilanz des Versuchsstandortes. Da das Verfahren sich bereits im Vergleich mit Messdaten aus Lysimeteranlagen bewährt hat, besteht das Ziel dieser Modellierstudie darin, die Unsicherheit der Methode in Bezug auf Textur und Substratheterogenität für einen sehr weiten Bereich realistischer Randbedingungen zu untersuchen.

Zunächst wurde mit einem Monte-Carlo Ansatz eine ausreichend große Menge unkorrelierter Parameterkombinationen generiert, mit denen hydraulische Substrateigenschaften (van Genuchten/Mualem-Parameter) und räumliche Heterogenität (Variogrammparameter) beschrieben werden können. Für jede dieser Realisationen wurden auf Basis der Richardsgleichung instationäre Sickerwasserflüsse unter realistischen Rand- und Anfangsbedingungen zweidimensional simuliert. Die so erzeugten synthetischen Zeitreihen von Bodenwassergehalten und Matrixpotenzialen wurden als Eingangsdaten verwendet, um mit der getesteten Methode Zeitreihen der Sickerwasserflüsse zu bestimmen. Diese wurden anschließend mit den "wahren" synthetischen Wasserflüssen aus den Simulationen verglichen. In 77 % der Fälle wurde die Sickerwasserdynamik mit der untersuchten Methode sehr genau wiedergegeben (Nash-Sutcliffe Gütemaß größer als 0,99). Mit einer Self-Organizing Map, einem multivariaten nichtlinearen statistischen Verfahren, wurde der Einfluss der Substrateigenschaften auf die Anwendbarkeit der untersuchten Methode visualisiert und Hotspots der Unsicherheit im Phasenraum der Parameter identifiziert. Damit lassen sich der Anwendungsbereich und die Limitationen der Methode recht genau abschätzen.

# **Interaktionen zwischen hydrologischen Prozessen unterschiedlicher räumlich-zeitlicher Skalen**

Sophie Bachmair und Markus Weiler

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Experimentelle Prozessforschung über abflussbildende Mechanismen auf der Hang-Skala ist eine wichtige Voraussetzung für die Weiterentwicklung konzeptioneller hydrologischer Modelle und Theorien. Das Bild, das man durch experimentelle Daten bekommt, hängt jedoch stark von der räumlichen und zeitlichen Auflösung ab, mit der die Daten erhoben werden. Wissen über die Interaktion hydrologischer Prozesse auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ist deshalb enorm wichtig. Wie repräsentativ sind beobachtete Prozesse der Plot-Skala für die Hang- oder Einzugsgebietskala? Wie lässt sich die Prozessinformation einer Skala auf die nächst höhere übertragen bzw. stellen verschiedene räumlich-zeitliche Skalen Grenzen der Übertragbarkeit dar? Diese Fragen werden anhand eines aufwändigen experimentellen Messnetzes an drei nebeneinanderliegenden Hängen unterschiedlicher Landnutzung (Wiese-Nadelwald-Mischwald) untersucht. Die Hänge befinden sich innerhalb eines 0.21 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiets erster Ordnung am Fuße des Schwarzwalds. Jedes Hangstück umfasst eine Fläche von knapp 2500 m<sup>2</sup> (33 m x 75 m). Das Herzstück des Messnetzes stellen 90 Beobachtungsrohre dar, in denen mittels kapazitiver Sonden die Reaktion der gesättigten Zone seit knapp zwei Jahren im 2-min-Intervall gemessen wird. Darüber hinaus wird der Zwischenabfluss am Fuße jedes Hangs mit einem 10 m langem Drainagegraben erfasst. Oberflächenabfluss wird an je einem Standort pro Hang gemessen. Niederschlags-Input sowie weitere meteorologische Parameter werden mit einer Wetterstation und zusätzlich 66 räumlich verteilten Niederschlagstotalisatoren aufgezeichnet. Ein V-Wehr misst den Abfluss des Bachs am Fuße der drei Hänge im 10-min-Intervall. Bisherige Untersuchungen zeigen i) eine hohe räumlich-zeitliche Variabilität des Wasserstandes in den Beobachtungsrohren, ii) unterschiedliche Reaktionen je Hang und iii) unterschiedliche räumliche Muster der Sättigungszone in den nassen Jahreszeiten im Vergleich zu den trockenen Sommermonaten. Nun soll untersucht werden, inwieweit die Wasserstandsreaktionen der Beobachtungsrohre repräsentativ sind für den Zwischenabfluss der Drainagegräben, und wie diese mit dem Abfluss auf Einzugsgebietskala zusammenhängen.

# **Räumlicher Vergleich von Abflussbildung Mechanismen in einem Schweizer voralpinen Einzugsgebietes**

Benjamin Fischer, Clemens Michael und Jan Seibert

Physische Geographie - H2K, Universität Zürich, Schweiz

## **Zusammenfassung**

In Gebirgs-Einzugsgebieten fehlen oft lange detaillierte Zeitreihen oder sind lückenhaften und zusätzlich fehlen Grundwasser oder Isotopen Daten. Das erschwert das identifizieren von Abfluss Prozessen welche als Basis für eine gute Wasserwirtschaft gilt. Hier präsentieren wir erste Resultate von einen neuen Daten Satz des Zwäckentobel, einen 4.3 km<sup>2</sup> Schweizer voralpinen Einzugsgebietes. Der hohe jährliche Niederschlag, schnellen aggressiven Charakter der Bergbäche und dominanten nassen Zustand macht dieses Einzugsgebiet ein interessantes Untersuchungsgebiet. Leider fehlt Prozess Verständnis zusammen mit dem anspringen der Bäche während Regen Ereignissen in Zeit und Raum. Diese Studie probiert dies näher zu erforschen durch mehrere teil Einzugsgebiete mit einander zu vergleichen. Das Ziel ist von den Ähnlichkeiten und Unterschieden jedes Sub Einzugsgebiet in Relations mit verschiedenen Skalen zu sehen. Gibt es Unterschiede im Respons zu den Niederschlägen und kann man Unterschiede in hydrologischen Abfluss Prozessen sehen. Für den Zwäckentobel und seiner sechs neu bemessenen Einzugsgebieten sind Niederschlag, Abfluss zusammen mit stabilen Isotopen Konzentrationen gemessen und untereinander verglichen mit einen Langzeit Referenz Einzugsgebietes. Hier zeigen wir Resultate dieser Studie.

# Quantifizierung der Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Kielstau

Cindy Hugenschmidt, Florian Honsel, Matthias Pfannerstill und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Stoffaustragspfade in Einzugsgebieten sind im hohen Maße von den Fließpfaden abhängig. Das norddeutsche Tiefland nimmt in Bezug auf die Austragspfade eine besondere Rolle ein, da das Austragspotenzial aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung besonders hoch ist. In diesem Kontext stellen vor allem die Dränagen der landwirtschaftlichen Flächen ein großes Problem dar, da Fließpfade verkürzt und Aufenthaltszeiten in der Bodenmatrix verringert werden.

Die Belastung Oberflächengewässer durch Nährstoffeinträge kann durch langjährige Messungen im Einzugsgebiet der Kielstau (50 km<sup>2</sup>) bestätigt werden. Die Messdaten wurden mit dem Model SWAT in zahlreichen Studien analysiert, um durch Modellierung die Hauptaustagspfade zu identifizieren. Eine experimentelle Verifizierung dieser Austragspfade mittels Abflusskomponenten fand bisweilen jedoch noch nicht statt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deswegen, den Abfluss im Kielstaeinzugsgebiet in die einzelnen Komponenten aufzuteilen. Hierfür werden innerhalb des Kielstau Einzugsgebietes an 19 Messpunkten Grund- und Oberflächenwässer hinsichtlich der Chlorid- und Nährstoffkonzentrationen zeitgleich untersucht. Darüber hinaus werden in den Teilabschnitten der Kielstau und in zwei Hauptzuflüssen zusätzlich Abflussmessungen vorgenommen, um Chlorid- und Nährstofffrachten zu bestimmen. Die Niederschlagsmenge wird anhand von drei Messstationen im EZG ermittelt, Chloridkonzentrationen werden für zwei dieser Stationen gemessen und dienen zur Ermittlung des Anteils des Niederschlags am Gesamtabfluss. Unter Verwendung der gemessenen Chloridkonzentrationen werden die Anteile des Grund- und Oberflächenwassers am Gesamtabfluss bestimmt. In Kombination mit den Nährstoffkonzentrationen werden schließlich die Hauptquellen der Nährstoffbelastung im EZG identifiziert. Die Studie wird Informationen bezüglich des Anteils des vom Niederschlag induzierten Abflussanteils am Gesamtabfluss liefern, um eine Verbesserung der hydrologischen Modellgrundlage in Bezug auf Nährstoffeinträge im Einzugsgebiet zu ermöglichen. Dies erfolgt über einen Abgleich mit den Ergebnissen der einzelnen, modellierten Abflusskomponenten, die aus dem SWAT Model ausgegeben werden. Insbesondere Phosphoreinträge können dann mit den Anteilen des Oberflächenwassers von Abflussereignissen kombiniert und lokalisiert werden.

# **Verweilzeit und Hydrochemie in vier alpinen Einzugsgebieten (Urserntal, Schweiz)**

Matthias H. Müller und Christine Alewell

Institut für Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Schweiz

## **Zusammenfassung**

In vier Kleinstzeugsgebieten in den Schweizer Alpen wurde der Einfluss der Landbedeckung auf die mittlere Verweilzeit des Wassers mittels stabiler Isotope untersucht. Aus dem Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Niederschlag und der Oberflächenfließgewässer wurden mittlere Verweilzeiten des Basisabflusswassers von 7,5 - 14 Monaten berechnet. Unsere Daten legen nahe, dass die geologische, pedologische und topographische Situation einen stärkeren Einfluss auf die mittleren Verweilzeiten des Basisabflusses hat als die Landbedeckung.

## **Einleitung**

Die mittlere Verweilzeit des Wassers in einem Einzugsgebiet liefert Informationen über Speicherung, Fließwege und Herkunftsräume des Wassers und beeinflusst gleichzeitig dessen Hydrochemie (McGuire et al., 2005). Landschaftsstruktur aber auch die Landbedeckung können die Verweilzeit des Wassers beeinflussen (McDonnell et al. 2010, McGuire et al., 2005). Der Einfluss der Landbedeckung ist bisher aber, unseres Wissens nach, noch nicht auf Einzugsgebietsebene untersucht worden. In den Alpen vollzieht sich seit einigen Jahrzehnten ein Landnutzungswandel, der zu Verbuschung ehemals offener Weideflächen führen kann. Eine verstärkte Durchwurzelung der Böden könnte zu einer erhöhten Infiltration und damit zu kürzeren Verweilzeiten und einer veränderten Hydrochemie der Oberflächenfließgewässer führen.

## **Methoden**

Um den Einfluss dieses Landnutzungswandel auf die mittlere Verweilzeit des Wassers zu beurteilen, haben wir vier relativ steile Kleinstzeugsgebiete ( $< 1 \text{ km}^2$ ) im Urserntal (Zentralschweiz) mit unterschiedlichem Buschbestand (Grünerle und Vogelbeere zwischen 1 bis 90 % Bedeckungsgrad) untersucht. Die mittlere Verweilzeit wurde mittels stabiler Wasserisotope des Niederschlags und des Basisabflusses modelliert. Des Weiteren wurden während 1,5 Jahren hydrochemische Parameter in den Oberflächenfließgewässern ( $\text{DOC}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH, Ca, Mg, K, Na, Si) in zweiwöchentlich entnommenen Proben und zeitlich hoch aufgelöst, während eines Niederschlagsereignisses, gemessen.

## **Ergebnisse**

Das zeitlich starke variierende Isotopensignal im Niederschlag war im Basisabfluss deutlich gedämpft (Abb. 1). Die Modellierung der mittleren Verweilzeiten ergab 7,5 - 14 Monate für die vier Gebiete,

unabhängig von deren Landbedeckung. Die starke Dämpfung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluss deutet darauf hin, dass ein Teil des sehr schnell infiltrierenden Niederschlags in tiefer gelegenen Gesteinsschichten zirkuliert und sich Wässer verschiedenen Alters mischen. Unsere Ca-,  $\text{SO}_4^{2-}$ -, und pH-Messungen lassen zudem vermuten, dass die Wässer durch gips- und/oder kalkhaltige Schichten oder Linsen fließen, die in die anstehenden Gneise eingefaltet sein können.

Nur ein kleiner Anteil des Gesamtniederschlags war während der Ereignisbeprobung im Abfluss zu finden. Dieses Ereigniswasser gelangte aber wiederum sehr schnell in die Gewässer und verließ die Einzugsgebiete innerhalb weniger Stunden. Der Anteil des Ereigniswassers am Hochwasserabfluss betrug zeitweise 60 - 70%. Bezüglich der Hydrochemie zeigten die Parameter eine Verdünnung im Verlauf des Ereignisses, ausgenommen der DOC Konzentration. Höchst wahrscheinlich werden während Niederschlagsereignissen vor allem Schichten, die reich an organischer Substanz sind, durchspült.

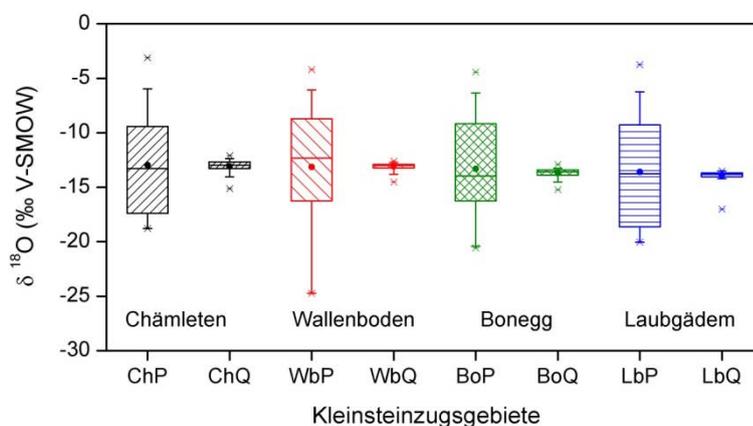


Abb. 1:  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den vier Kleinsteinzugsgebieten Chämleten (1,9 ha), Wallenboden (38,4 ha), Bonegg (71,2 ha), Laubgädem (9,5 ha) im Niederschlag (P) und Basisabfluss (Q), n = 50 pro Gebiet.

## Schlussfolgerung

Es konnte kein Einfluss der Landbedeckung auf die mittleren Verweilzeiten des Basisabflusses sowie dessen Hydrochemie festgestellt werden. Offensichtlich hat die geologische, pedologische und topographische Situation und die Dynamik der Schneeakkumulation und -schmelze in alpinen, steilen Einzugsgebieten mit einer relativ dünnen Bodendecke einen stärkeren Einfluss als die Landbedeckung.

## Literatur

- McDonnell J. J., K. J. McGuire, P. Aggarwal, K. J. Beven, D. Biondi, G. Destouni, S. Dunn, A. James., J. Kirchner, P. Kraft, S. Lyon, P. Maloszewski, B. Newman, L. Pfister, A. Rinaldo, A. Rodhe, T. Sayama, J. Seibert, K. Solomon, C. Soulsby, M. Stewart, D. Tetzlaff, C. Tobin, P. Troch, M. Weiler, A. Western, A. Wörman, S. Wrede (2010): How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrological Processes* 24, 1745–1754.
- McGuire, K. J., J. J. McDonnell, M. Weiler, C. Kendall, B. McGlynn, J. M. Welker, J. Seibert (2005): The role of topography on catchment-scale water residence time. *Water resources research* 41, W05002, doi:10.1029/2004WR003657.

# **Kartierung räumlicher Muster der Bodenfeuchte anhand qualitativer Indikatoren**

Michael Rinderer, Andrea Kollegger, Benjamin Fischer und Jan Seibert

Geographisches Institut, Universität Zürich, Schweiz

## **Zusammenfassung**

Räumlich verteilte Muster der Bodenfeuchte und deren zeitliche Veränderung sind von zentraler Bedeutung in der Hydrologie. Eine Reihe von Forschungsergebnissen zeigt, dass diese räumlichen Muster interessante Aufschlüsse über relevante Steuergrößen des Abflussgeschehens im Boden eines Einzugsgebietes geben können. Um diese Bodenfeuchtemuster zu erfassen, benötigt man jedoch räumlich verteilte Messungen, welche mit hohen Kosten und Arbeitsaufwand betrieben werden müssen. Speziell in sehr feuchten, humusreichen Böden sind die Messungen herkömmlicher, quantitativer Methoden wie z.B. TDR (Time Domain Reflectometry) unzuverlässig. Diese Tatsache motivierte die Entwicklung einer Bodenfeuchteklassierungsmethode basierend auf qualitativen Feuchteindikatoren, welche sich als kostengünstige und dennoch zuverlässige Ergänzung zu quantitativen Messungen versteht. Das Klassierungsschema besteht aus sieben Feuchteklassen, von gesättigten Bedingungen, wenn Wasser an der Bodenoberfläche sichtbar ist, bis zu trockenen Verhältnissen, wenn man auf dem Boden sitzen könnte, ohne feuchte Hosen zu bekommen. Ein Test mit 20 Probanden zeigte, dass in etwa 70% aller Fälle eine übereinstimmende Zuordnung der Feuchteklassen zu den 52 vorgegebenen Standorten erfolgte und dass etwa 95 % aller Klassierungen maximal eine Feuchtekategorie davon abwichen. Die feuchteste Klasse wurde von allen Probanden eindeutig anhand der qualitativen Indikatoren erkannt. Die Zuordnung der Feuchteklassen bei Standorten mit mittlerer Bodenfeuchte war hingegen mit grösserer Streuung behaftet. Einzelne Probanden zeigten eine Tendenz, alle Punkte entweder zu trocken, oder zu feucht zu klassieren. Die Abweichungen waren jedoch im Mittel kleiner als eine Feuchtekategorie. Gravimetrische Messungen der Bodenfeuchte anhand 45 Bodenproben belegten zudem, dass die qualitativen Feuchteklassen auch tatsächlich Unterschiede im Bodenwassergehalt repräsentieren. Diese Ergebnisse zeigen das Potential qualitativer Indikatoren zur Kartierung von Bodenfeuchtemustern. Die einfache und sehr rasch anwendbare Methode erlaubt das Kartieren der Feuchtezustände mehrerer hundert bis tausend Standorte in einem Gebiet im Zuge einer Kampagne und kann so ein interessantes Werkzeug für die Datenerhebung zur Prozessforschung und Modellkalibrierung sein.

# **Untersuchung steuernder Faktoren der Grundwasserdynamik in einem Wildbacheinzugsgebiet**

Michael Rinderer und Jan Seibert

Geographisches Institut, Universität Zürich, Schweiz

## **Zusammenfassung**

Die Erfassung der Grundwasserdynamik ist von entscheidender Bedeutung für das Verständnis von Speicher-Abflussbeziehungen und damit dem Reaktionsverhalten eines Einzugsgebietes unter variablen Systemzuständen. Speziell die raum-zeitliche Veränderung und damit die Konnektivität der gesättigten Zone kann eine wichtige Rolle für das Verständnis des oft nicht-linearen Verhaltens hydrologischer Systeme sein. Beobachtungen sind aber meistens auf ausgewählte Messpunkte beschränkt, obwohl die Grundwasserdynamik über Abstände weniger Meter eine grosse Variabilität zeigen kann. Aus diesem Grund ist das Verständnis der massgebenden Steuerfaktoren der Grundwasserdynamik am Beobachtungspunkt und seines Einwirkungsbereichs wichtig, um das Verhalten an nicht beprobten Stellen des Einzugsgebietes einigermaßen abschätzen zu können. Aus den Punktbeobachtungen und auf die unbeprobten Standorte übertragenen Abschätzungen lassen sich räumliche Muster erkennen, die interessante Aufschlüsse über das oft nicht-lineare Abflussverhalten eines Einzugsgebietes zulassen können. In einem 20 ha grossen voralpinen Testeinzugsgebiet im Alptal /Schweiz wurde ein räumlich verteiltes Grundwassermessnetz aus 52 Stationen errichtet. Die Piezometer sind auf sieben zum Teil ineinander geschachtelte Teileinzugsgebiete mit je einer Abflussmessstelle verteilt, die die Untersuchung von skalenabhängigen Beziehungen ermöglichen soll. Dieser Beitrag beschreibt erste Resultate sowie Analysen der Messergebnisse in Bezug auf die saisonale und ereignisbasierte Grundwasserdynamik. Hauptaugenmerk liegt auf der Identifikation der massgeblichen Steuergrössen anhand der Standorteigenschaften mit Hilfe multivariater Methoden.

# Modellierung der Abflusskonzentration auf unterschiedlich bearbeiteten landwirtschaftlichen Flächen

Florian Winter und Markus Disse

Universität der Bundeswehr München, Deutschland

## Zusammenfassung

Die konservierende Bodenbearbeitung kann zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlich genutzten Flächen beitragen. Durch das Belassen von Ernterückständen auf den Ackerschlägen wird eine jahreszeitlich konstante Bodenbedeckung erreicht, die die Krume nicht nur vor dem Austrocknen, sondern auch vor der mechanischen Wirkung auftreffender Regentropfen schützt, und einer dadurch entstehenden Verschlammungsschicht entgegenwirkt. Weitere Auswirkungen hat die Mulchschicht auch bei Starkniederschlägen und auftretendem Oberflächenabfluss. Die natürliche Rauigkeit der Bodenoberfläche wird weiter erhöht und die Fließgeschwindigkeit somit verringert, sodass der Oberflächenabfluss wiederum verstärkt in den Boden infiltrieren kann (Runon-Infiltration). Das hydrologische Modellsystem WaSiM-ETH simuliert die Abflusskonzentration in einem Einzugsgebiet traditionell durch ein Fließzeitengrid im Einzugsgebiet, welches aus topographischen Eigenschaften abgeleitet wird. Am Gebietsauslass eines jeden Teileinzugsgebiets werden die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Interflow jeweils durch eine Einzellinearspeicher-kaskade geroutet. Für einepartikuläre Betrachtung der Fließwege in Einzugsgebieten der unteren Mesoskala ( $< 1 \text{ km}^2$ ) wurde das Modell um einen Abflusskonzentrationsansatz nach der kinematischen Welle für den Oberflächenabfluss erweitert, der es ermöglichen soll, die kleinräumige Variation der Fließgeschwindigkeiten auf der Bodenoberfläche und deren zeitliche Verteilung flächendetailliert zu simulieren und so Abschätzungen zu einer angepassten Bewirtschaftung zu geben. Dazu wurden im Modell zwei Konfigurationen zur konservierenden und konventionellen Bodenbearbeitung implementiert. Auf einzelnen Ackerschlägen des Versuchsgutes Scheyern nordwestlich von München kann dabei gezeigt werden, wie verschiedene Feldfrüchte bei einer bodenschonenden Bewirtschaftung bei einzelnen Starkregenereignissen auf die Abflussbildung und -konzentration wirken. Durch die konservierende Bodenbearbeitung und die erosionsverringende Fruchtfolge konnte im Modell ein erhöhter Interflow nachgewiesen werden, der durch die erhöhte Ausbildung von Makroporen und ein ungestörtes Porengefüge als verzögerte Abflusskomponente größeren Einfluss hat. Bei der Simulation einzelner Ereignisse in landwirtschaftlichen Gebieten der unteren Mesoskala können so hydrologisch sensitive Bereiche identifiziert und die positiven Auswirkungen einer angepassten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsform auf die Abflussbildung und -konzentration quantifiziert werden.

# Welche Gebietseigenschaften bestimmen das Abflussverhalten in kleinen Einzugsgebieten?

Björn Thomas<sup>1,2</sup>, Gunnar Lischeid<sup>1,2</sup>, Jörg Steidl<sup>1</sup> und Ralf Dannowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Müncheberg

<sup>2</sup> Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam

## Zusammenfassung

Im Nordosten Deutschlands soll die Vulnerabilität kleiner Einzugsgebiete für Niedrigwasserabflüsse abgeschätzt werden. Die Komplexität der pleistozänen Landschaft sowie eine Vielzahl anthropogener Veränderungen und Eingriffe erschweren jedoch das Vorgehen. Hier werden die Entwicklung und die ersten Ergebnisse einer auf multivariaten statistischen Verfahren basierenden Methode vorgestellt, die eine Identifikation verschiedener für Niedrigwasserabflüsse relevante Prozesse ermöglicht, deren Unterschiede herausgearbeitet und räumliche Muster beschrieben werden. Die Datengrundlage bilden ein Datensatz von täglichen Abflüssen aus 37 kleinen Einzugsgebieten von 1991 bis 2006, sowie dazugehörige Niederschlagswerte und Parameter für Gebietseigenschaften. Eine Hauptkomponentenanalyse wurde angewandt, um den Datensatz auf möglichst wenige, einen hohen Anteil seiner Varianz erklärende, Hauptkomponenten zu reduzieren. Die erste Hauptkomponente spiegelt das mittlere gewichtete Verhalten aller Messstellen wieder. Weitere Hauptkomponenten bilden (2.) ein NW-SO und (3.) WSW-ONO Niederschlagsmuster, (4.) eine hochfrequente Dämpfung der Abflüsse, und (5.) eine niederfrequente Dämpfung der Abflüsse ab. Die räumliche Betrachtung der Komponenten 3 und 5 erlauben eine Abschätzung der Vulnerabilität in Bezug auf Niedrigwasserabflüsse.

## Einleitung

Im Nordosten Deutschlands erschwert sowohl die Komplexität der pleistozänen Landschaft, als auch die Vielzahl anthropogener Veränderungen und Eingriffe eine Klassifizierung des Abflussverhaltens von Einzugsgebieten in Bezug auf Niedrigwasserabflüsse. Für eine Anpassung des Wassermanagements an den Klimawandel und die Priorisierung von potentiellen Maßnahmen (Thomas et al., 2011), wie auch das verbesserte Verständnis räumlicher und zeitlicher Muster, wäre eine solche Beschreibung jedoch von großem Nutzen. Die Zielsetzungen unserer Arbeit ist die Entwicklung einer allein auf Abflusszeitreihen basierenden Verhaltensklassifizierung kleiner (< 500 km<sup>2</sup>) Einzugsgebiete Brandenburgs. Darauf aufbauend sollen mit der Bestimmung der jeweils hydrologisch relevanten Prozesse und der statistischen Ermittlung der dafür relevanten Gebietseigenschaften verschiedene Prozesse, die zu Niedrigwasserabflüssen führen, identifiziert, deren Unterschiede herausgearbeitet und deren räumliche Muster beschrieben werden.

## Methode

Die Datengrundlage bildet ein Datensatz von skalierten (Mittelwert = 0, Standardabweichung = 1) täglichen Abflussmessungen an Pegeln aus 37 kleinen Einzugsgebieten in Brandenburg von 1991 bis 2006. Die Daten wurden vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus stehen korrigierte Niederschlagsdaten (REGINE, über Thiessen Polygone auf die Einzugsgebiete interpoliert) und Parameter für Eigenschaften der Einzugsgebiete zur Verfügung, deren Werte auf die Einzugsgebietsflächen aggregiert

wurden (Isohypsen der Hydrogeologische Karte Brandenburgs und Digitales Geländemodell). Eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurde angewandt, um den Abfluss- und Niederschlagsdatensatz auf möglichst wenige, einen hohen Anteil seiner Varianz erklärende, Hauptkomponenten zu reduzieren. Für die Beschreibung der Methodik verweisen wir auf Lischeid et al. (2010). PCA stellt ein robustes und alternatives Verfahren der Funktionsanalyse zu herkömmlichen Verhaltensanalyseverfahren, wie z.B. der Trendanalyse, dar (Lischeid et al., 2012). Über Analysen der zeitlichen Muster in den Hauptkomponenten (Autokorrelationen und Powerspektren) und räumlichen Muster der Korrelation der Hauptkomponenten mit den Ausgangszeitreihen des Abflusses und Niederschlages (Korrelation mit Gebietseigenschaften und untereinander) werden statistische Zusammenhänge ermittelt. Auf diese Weise können Hypothesen über Prozesse, die den Hauptkomponenten zugeordnet werden können, gebildet werden.

## **Ergebnisse**

Fünf Komponenten erklären mehr Varianz im Datensatz als eine einzelne Zeitreihe und eignen sich daher auch zur Identifizierung räumliche Muster. Zusammen erklären sie 72.9% der Varianz, wobei mit 57.4% der größte Anteil auf die erste Komponente fällt. Die erste Hauptkomponente spiegelt das mittlere gewichtete Verhalten aller Messstellen wieder. Die Korrelation zum Mittelwert aller Abflusszeitreihen beträgt  $r^2 = 0.98$ . Die folgenden beiden Komponenten korrelieren mit den räumlichen und zeitlichen Mustern der 2. und 3. Niederschlagskomponente. Darüber zeigt die 3. Abflusskomponente einen stärkeren Abflussrückgang im Spätsommer, höhere Autokorrelation und Dämpfung im hochfrequenten Bereich für Einzugsgebiete im ost-nordöstlichen Teil Brandenburgs. Die 4. Abflusskomponente beeinflusst die Autokorrelation und Dämpfung im hochfrequenten Bereich, wobei Gebiete am südlichen Rand von Brandenburg eine geringere Dämpfung und Autokorrelation aufweisen. Die Räumliche Verteilung korreliert mit dem Grundwasserflurabstand. Die 5. Abflusskomponente weist auf einen prägnanteren Jahresgang mit stärkerem Abflussrückgang während der Sommermonate hin. Die räumliche Verteilung korreliert negativ mit dem Grundwasserflurabstand.

## **Schlussfolgerung**

Sowohl die 3. als auch die 5. Hauptkomponente weisen auf einen stärkeren Abflussrückgang im Spätsommer hin und sind daher Indikatoren für Einzugsgebiete mit stärkerer Vulnerabilität bezüglich Niedrigwasserabflüssen. Vulnerablere Gebiete liegen im Bereich der Barnim-Hochfläche und Nordosten Brandenburgs. In Gebieten deren Abfluss nur wenig durch die ersten fünf Komponenten erklärt wird, muss von einer stärkeren Wasserbewirtschaftung ausgegangen werden. Maßnahmen zur Verringerung der Unterschreitung von Zielvorgaben müssen hier an ein Wassermanagement angegliedert werden, welches das natürliche Abflussverhalten deutlich überprägt. Eine Verschneidung unserer Ergebnisse zur Vulnerabilität mit geforderten Minimalabflüssen des Naturschutzes und Wassermanagements wären der nächste Schritt zur Identifizierung der Gebiete in denen Maßnahmen zur Niedrigwasservorsorge notwendig werden.

## **Literatur**

- Lischeid, G., Steidl, J., Merz, C., (2012): Funktionsanalyse versus Trendanalyse zur Abschätzung anthropogener Einflüsse auf Grundwasserganglinien. Grundwasser, online erschienen.
- Lischeid, G. et al. (2010): Assessing coupling between lakes and layered aquifers in a complex Pleistocene landscape based on water level dynamics. *Advances in Water Resources* 33(11), 1331-1339.
- Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O. und Lischeid, G. (2011): Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes: a review. *Journal of Hydrology* 408(3-4), 296-307.

# **Ableitung des Retentionsverhaltens des Karstkörpers an der Zugspitze mit Hilfe des hydrologischen Modells ALPINE3D**

Matthias Bernhardt, Karsten Schulz, Michael Lehning, Stefan Härrer und Karl Wetzel

Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die modelltechnische Beschreibung des Wasserhaushalts alpiner Einzugsgebiete ist mit vielen Unwägbarkeiten verbunden. Eingeschränkte Messapparatur im Gelände und die nur begrenzte Möglichkeit Vorortmessungen durchzuführen, erschweren die Modellierung. Karstkörper im Untergrund gestalten die Interpretation und Validierung der Ergebnisse nochmals komplizierter, da sich der Abfluss aus verkarsteten Gebieten, aufgrund der unklaren Fließwege im Untergrund und verschiedenster Quellaustritte, zumeist nur schwer quantifizieren lässt. Die vorgestellte Studie nutzt das schneehydrologische Modell ALPINE3D, um den Wasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung der Schneedeckenvariabilität im Bereich des Zugspitzplatt (Bayern/Deutschland) nachzuvollziehen. Weiterhin wird versucht, die Retentionszeit des Karstkörpers an der Zugspitze genauer zu bestimmen. Dazu wird das Signal aus der Schneeschmelze mit der verzögerten Antwort des Abflusses am Partnachursprung verglichen. Dieses Verfahren ist valide, da Tracerversuche gezeigt haben, dass das Platt ausschließlich durch den Partnachursprung entwässert. Somit können die Schmelzwassermenge und die Abflussmenge in direkte Verbindung gesetzt werden.

# **Evaluierung der Einzugsgebietsspeicher mit stabilen Isotopen und einem Grundwassermodell mit Focus auf Trockenheit**

Anita Gundel, Markus Weiler und Kerstin Stahl  
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die zeitlichen und räumlichen Speichereigenschaften eines Einzugsgebietes sind maßgeblich dafür verantwortlich wie stark Einzugsgebiete auf klimatische Veränderungen reagieren. Besonders Perioden mit langen Trockenzeiten können in Gebieten mit geringen oder schnell auslaufenden Speichern zu Wasserknappheit führen. Das Ziel dieser Studie ist es, anhand der unterschiedlichen Verweilzeiten des Grundwassers die Anfälligkeit eines Systems hinsichtlich Trockenheit räumlich und zeitlich zu ermitteln, sowie den Einfluss des Grundwassers auf das Niedrigwasserabflussregime zu analysieren. Eine Möglichkeit, um die unterschiedlichen Prozesse und Verweilzeiten in einem Einzugsgebiet darzustellen, ist die Anwendung eines Grundwassermodells, das die komplexen geologischen Strukturen, sowie die Austauschprozesse von Strömung und Transport detailliert widerspiegelt. Für die Simulation wurde ein numerisches 3D-Finite-Elemente Strömungs- und Transportmodell mit der Software FEFLOW erstellt. Mit diesem Modellierungsansatz lässt sich die Vielzahl an topographischen, hydrologischen und geologischen Eigenschaften eines Gebietes abbilden und ermöglicht dadurch eine detaillierte Simulation der Fließ- und Transportprozesse. Aufgrund der guten Datenlage im Einzugsgebiet des Rietholzbaches in der Schweiz eignet sich das Gebiet besonders gut, da für die numerische Modellierung ein umfangreicher Dateninput benötigt wird. Zunächst wurde ein stationäres Strömungsmodell erstellt, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten. Daraufhin wurde die räumliche und zeitliche Verteilung des Grundwasseralters im Einzugsgebiet anhand der Ausbreitung des stabilen Isotopensignals von  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\text{d}^2\text{H}$  über die Transportfunktion in FEFLOW ermittelt. Erste Ergebnisse der Untersuchung ergeben Verweilzeiten zwischen vier und fünf Monaten in Flussnähe und mehr als einem Jahr in höheren Lagen. Das Ergebnis der Simulation spiegeln die ausgeprägte Heterogenität des Gebietes wider und zeigt, dass das Gebiet anfällig ist für längere Trockenheit.

# **Grundhochwasser in Sachsen – Separation von Gebietsentwicklungen und Interaktionen bei der Entwicklung von Typganglinien für Grundhochwasserereignisse in Sachsen**

Hannaleena Pöhler<sup>1</sup>, Sybille Wendel<sup>1</sup>, Jörg Scherzer<sup>1</sup> und Peter Börke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UDATA, Neustadt (Weinstraße), Deutschland

<sup>2</sup>Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Deutschland

Im Freistaat Sachsen konnten im Zusammenhang mit den Hochwasserereignissen im August 2010 / 2011 und dem Januartauwetter 2011 vielerorts stark erhöhte Grundwasserstände beobachtet werden. Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchung ist die Analyse des Zusammenhangs zwischen den Hochwassern im Grundwasser, Niederschlagsereignissen, Hochwassern in Oberflächengewässern und externen Größen wie z.B. Geologie, Landnutzung und anthropogenen Veränderungen.

Grundlage dafür waren die langjährigen Messreihen von 126 sächsischen Grundwassermessstationen und Quellschüttungen. Ereignisbezogene Analysen erfolgten für den Zeitraum Winter 2009/2010 bis Frühjahr 2011, die Untersuchung des Langzeitverhaltens für den Zeitraum 1.1.1971 bis 1.6.2011.

Die Trend- und Bruchpunktanalyse wurde auf Grundlage der Zeitreihen von 1971 bis April 2011 durchgeführt. Insgesamt 94 der 126 Messstellen weisen einen hoch signifikanten Trend auf, darunter 54 mit sinkenden Grundwasserständen. Zusätzlich wurde eine Bruchpunktanalyse zur Identifizierung sich innerhalb der Zeitreihe signifikant verändernder Mittelwerte und Steigungen durchgeführt. Bruchpunkte bezüglich der Mittelwerte wurden vor allem Anfang und Mitte der 1980er Jahre sowie Mitte der 1990er Jahre ermittelt. Bruchpunkte bezüglich Steigung zeigen ebenfalls ein Maximum in den 1990er Jahren. Die Bruchpunkte in diesem Zeitraum sind gleichmäßig über Sachsen verteilt (Abbildung 1). Daher sind sie wahrscheinlich auf überregionale Ursachen wie klimatische Veränderungen und einen allgemein verringerten Wasserverbrauch zurückzuführen. Die genauere Analyse der Bruchpunkte zeigt, dass zahlreiche Bruchpunkte vor allem im Nordwesten Sachsens vor dem Bruchpunkt einen fallenden, danach aber einen steigenden Trend aufweisen. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass der Grundwasserspiegel in den Absenkungsgebieten des Braunkohletagebaus seit den 1990er Jahren vielerorts langsam wieder ansteigt. Im Jahr 2010 gibt es ein weiteres Maximum von Bruchpunkten bezüglich Steigung, dies steht in direktem Zusammenhang mit dem Grundhochwasser 2010 / 2011.

Die Messstellen konnten anhand der Grundwasserstandsentwicklung in Gruppen eingeteilt werden. Die wichtigsten sind dabei der Typ „Interaktion“ (starke Interaktion mit dem Oberflächengewässer) und der Typ „Kumulation“ (oberflächenhochwasserunabhängiges starkes Ansteigen des Grundwassers mit jedem Niederschlagsereignis und folgendes langsames Absinken). Der Vergleich der Grundwasserstandsentwicklung von 2010 / 2011 mit früheren Hochwasserereignissen zeigte eine große Ähnlichkeit der Grundwasserstandentwicklung vor allem mit den Ereignissen August 2002 / Frühjahr 2003. In beiden Fällen verursachten intensive Niederschläge im Sommer ein

Hochwasser sowohl in den Oberflächengewässern als auch im Grundwasser. Im darauffolgenden Frühjahr gab es einen durch Tauwetter bedingten weiteren Anstieg im Grundwasser. Dieser Anstieg führte vor allem bei Typ „Kumulation“ zu einer Verstärkung des Oberflächen-Hochwassers.

Der Einfluss natürlicher und anthropogener Effekte, darunter hydrogeologische Teilräume, Geologie, Naturräume, Landnutzung und Wassernutzung auf die Grundhochwassersituation 2010 / 2011 wurde mit einer ANOVA (analysis of variance) überprüft und bewertet. Dabei konnten für die Verfestigung, Gesteinsart, Landnutzung und hydrogeologischen Teilräume signifikante Einflüsse auf die Grundwasserstandsentwicklung nachgewiesen werden. Mittels eines Tukey-HSD-Tests wurde eine tiefere Analyse durchgeführt und die Ergebnisse regional differenziert sowie in Zusammenhang mit dem Grundwasserstandsentwicklungstyp bewertet. So treten beispielsweise im Lockergestein überwiegend Grundwassermessstellen des Typs „Kumulation“ auf, während im Festgestein der Grundwasserstandsentwicklungstyp „Interaktion“ dominiert.

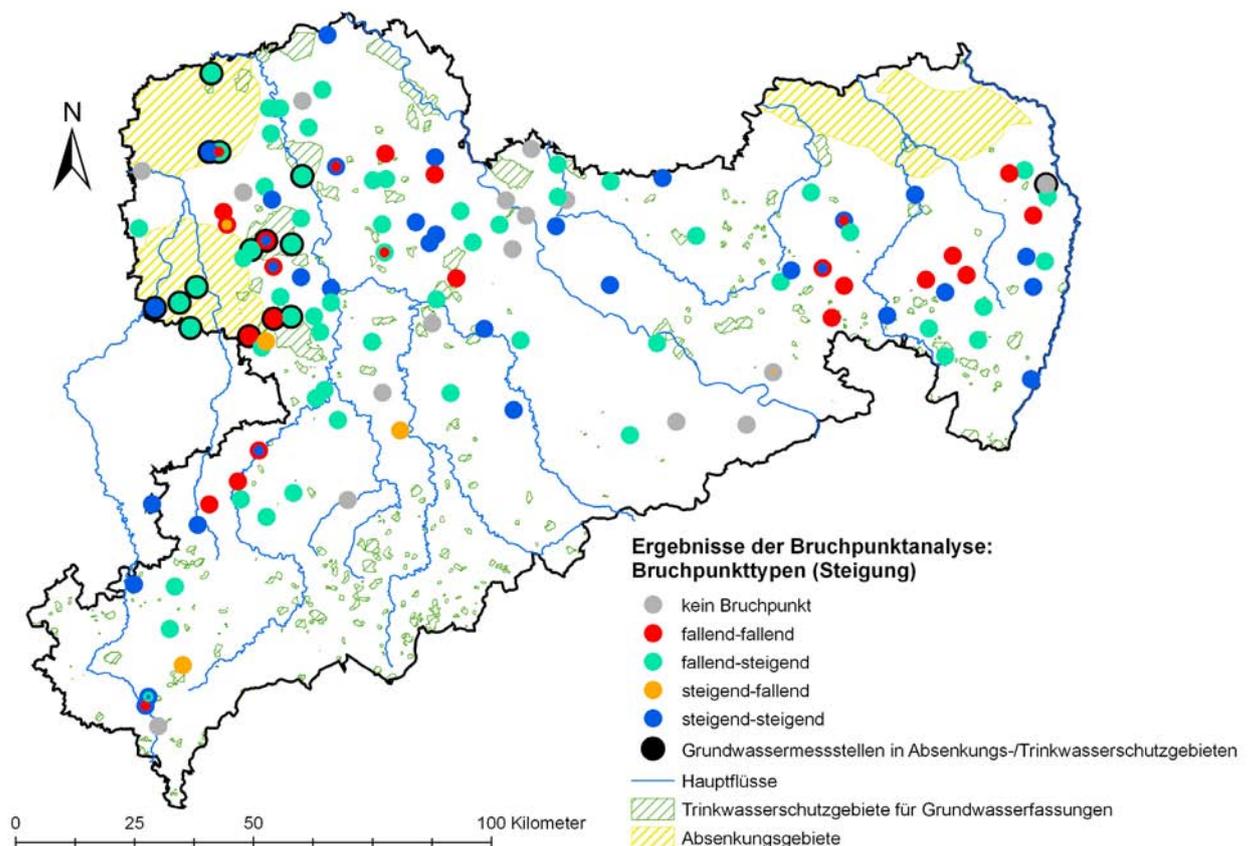


Abb. 1: Bruchpunkttypen bezüglich Steigung.

# Erweiterung eines Abflussvorhersagemodells um Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser in alpinen und voralpinen Schotterkörpern

Natalie Stahl<sup>1</sup>, Ingo Haag<sup>2</sup> und Annette Luce<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wasserwirtschaftsamt Weilheim, Deutschland

<sup>2</sup> HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft, Karlsruhe, Deutschland

## Zusammenfassung

Die an der Isar in den letzten Jahren aufgetretenen Hochwasser waren durch intensive Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser beeinflusst. Um die hierbei maßgeblichen Prozesse besser abbilden zu können, wurden neue Module in das Modell LARSIM integriert, das zur operationellen Hochwasservorhersage an der Isar genutzt wird. Die neuen Module wurden für die Isar erfolgreich eingesetzt und stehen nun auch für andere Gebiete mit ähnlichen Prozessen zur Verfügung.

## Hintergrund und Zielsetzung

Zur Erstellung von Hochwasserprognosen an der Isar wird LARSIM als Flussgebietsmodell und als Wasserhaushaltsmodell eingesetzt. Die Hochwasser der letzten Jahre haben gezeigt, dass das Hochwassergeschehen durch intensive Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser beeinflusst wird. Dabei wurden zwei unterschiedliche Prozesse als maßgeblich identifiziert, die durch Erweiterungen des Modells abgebildet werden sollten.

Zum einen liegen im alpinen Gebiet des Isar-Einzugsgebiets mächtige Schotterkörper vor, die das Wasserdargebot bis zum Erreichen eines Schwellenwerts nahezu vollständig aufnehmen und speichern können, so dass im Anschluss an ein Ereignis zunächst keine wesentliche Abflusserhöhung im Oberflächengewässer auftritt. Wird der maximale Füllungsgrad der Schotterkörper jedoch erreicht, kann das aktuelle Wasserdargebot nicht weiter aufgenommen werden. In dieser Situation gelangt die verfügbare Wassermenge ohne Zwischenspeicherung direkt in das Oberflächengewässer, wobei dann meist ein steiler Abflussanstieg zu beobachten ist.

Zum zweiten tritt im Bereich der Münchner Schotterebene eine intensive Interaktion zwischen dem Abfluss im Gerinne und dem mächtigen, gut durchlässigen Grundwasserkörper in Form eines Grundwasserbegleitstroms auf. Beim Ablauf einer Hochwasserwelle infiltriert während des Wellenanstiegs Wasser aus dem Gerinne über die Deiche und Vorländer in das Grundwasser. Im abfallenden Ast der Hochwasserwelle gelangt das Wasser wieder zurück in das Gerinne. Der Prozess zeigt sich durch einen schnellen Anstieg und Abfall der Grundwasserpegel hinter den Deichen. Im Gerinne äußert sich diese Interaktion mit dem Grundwasser in einer Verringerung des Abflussscheitels und einem verzögerten Wellenablauf.

## Ergebnisse

Die beiden oben beschriebenen hochwasserrelevanten Interaktionen zwischen Grundwasser und Gerinneabfluss wurden in entsprechende konzeptionelle Modellvorstellungen übersetzt und als zusätzliche Module in das Modell LARSIM integriert (Luce und Haag, 2011).

Für den ersten Fall wurde ein limitierter Grundwasserspeicher eingeführt. Das neue Modul wurde für das Einzugsgebiet der Ammer bis Oberammergau implementiert und erfolgreich getestet. Dabei zeigte sich zum einen, dass die simulierte Füllung des limitierten Grundwasserspeichers gut mit den gemessenen Grundwasserständen im Gebiet korrespondiert. Zum anderen konnten die sprunghaften Abflussanstiege bei Sättigung des Grundwasserkörpers wesentlich besser simuliert werden.

Für den zweiten Fall wurde ein gewässerbegleitender Grundwasserspeicher eingeführt, der entlang einer vom Benutzer zu definierenden Gewässerstrecke über ein Leakage-Interface mit dem Gerinne verbunden ist. Die Richtung und die Geschwindigkeit des Austausches werden durch die Potentialdifferenz zwischen den beiden Speichern und Leakage-Faktoren für die In- und Exfiltration definiert (Abb. 1, links). Abbildung 1 (rechts) veranschaulicht am Beispiel des Pegels Freising an der Isar, dass mithilfe des Zusatzmoduls die Simulation des Wellenablaufs im Bereich der Schotterebene deutlich verbessert wurde (Luce und Haag, 2011).

### Konzeption des GW-Begleitstroms:

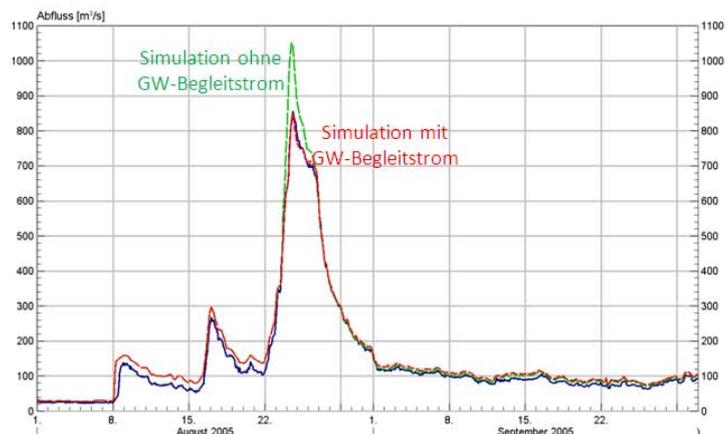
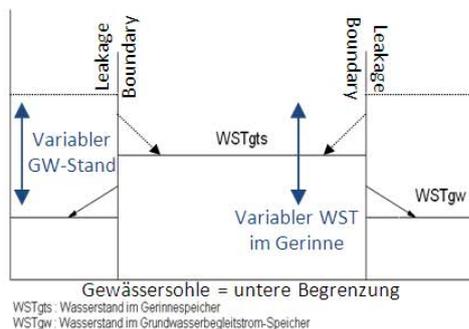


Abb. 1: Schematische Konzeption des Grundwasserbegleitstrom-Moduls (links) und dessen Wirkung auf die Simulation des Hochwassers vom August 2005 für den Pegel Freising/Isar (rechts).

## Schlussfolgerung

Die beiden zusätzlichen Module zur Beschreibung hochwasserrelevanter Interaktionen zwischen Grundwasser und Gerinneabfluss wurden in LARSIM (Flussgebiets- und Wasserhaushaltsmodus) implementiert und für das Isareinzugsgebiet erfolgreich getestet. Die zusätzlichen Module können zukünftig auch in anderen operationellen LARSIM-Modellen genutzt werden.

## Literatur

Luce, A. und I. Haag (2011): Erweiterung des Grundwasserspeichers und Implementierung eines Grundwasserbegleitstroms im Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Karlsruhe. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (*unveröffentlicht*).

# **Laborexperimente zur Dynamik von Süßwasserlinsen: Fließgeschwindigkeiten und Altersschichtung**

Leonard Stoeckl und Georg Houben

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Deutschland

Süßwasserlinsen, wie sie auf vielen Inseln und auch in Küstenregionen vorkommen, sind für die lokale Wasserversorgung unersetzlich. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erkundung des empfindlichen Gleichgewichtes zwischen Salz- und Süßwasser. Nur durch ein tieferes Prozessverständnis der Dynamik von Süßwasserlinsen kann eine nachhaltige Bewirtschaftung dieser Ressource gewährleistet werden. Untersucht werden die Prozesse während der Entstehung und nach Einstellung des dynamischen Gleichgewichtes von Linsen.

Mit Hilfe von Sandbox-Modellen ist es uns gelungen die Prozesse für den quasi-zweidimensionalen Fall im Labormaßstab zu visualisieren. Für den Versuchsaufbau wird ein Modell aus Plexiglas mit den Maßen 2 m (Länge,  $x$ ), 0,5 m (Höhe,  $y$ ) und 0,05 m (Tiefe,  $z$ ) mit Grobsand ( $d = 0,7 - 1,2$  mm) befüllt, um den Querschnitt durch eine ozeanische Insel zu simulieren. Nach dem Aufsättigen mit Salzwasser (Dichte von Meerwasser) wird über Tropfschläuche von oben Frischwasser beregnet. Neu ist dabei der Ansatz, durch den zeitlich gestaffelten Einsatz von Farbstoffen Fließgeschwindigkeiten und Altersverteilung des eingeströmten Süßwassers in der Linse sichtbar und messbar zu machen. Hierdurch können Beziehungen einzelner Eigenschaften zueinander, wie zum Beispiel Beregnungsrate, maximale Linsenmächtigkeit, Breite der Ausströmungszone und Altersschichtung (Abb. 1) oder auch Auswirkungen unterschiedlicher Morphologie untersucht werden.

Die gewonnenen Ergebnisse werden mit analytischen Lösungen verglichen, z.B. für die maximale Linsenmächtigkeit in Abhängigkeit von der Beregnungsrate mit Ansätzen von Fetter (1972) und Vacher (1988). Diese Berechnungen stimmen mit unseren Beobachtungen gut überein.

Die detaillierte Visualisierung der Bildung und der internen Dynamik von Süßwasserlinsen im physikalischen Experiment dient weiterhin der Validierung von numerischen Modellen („benchmarking“). Zum jetzigen Zeitpunkt wurden die physikalischen Experimente mit dem dichteabhängigen Strömungsmodell FEFLOW simuliert (Diersch, 2005). Der Vergleich von Linsenbildung und Rückbildung zwischen unseren physikalischen Versuchen und der numerischen Modellierung zeigt eine gute Übereinstimmung. Für Vergleichsstudien ist geplant andere numerische Modelle wie SUTRA, HydroGeoSphere und SEAWAT heranzuziehen, mit denen dichteabhängige Strömungen berechnet werden können. Dabei können Abweichungen aufgezeigt werden, die durch unterschiedliche Modellansätze hervorgerufen werden können.

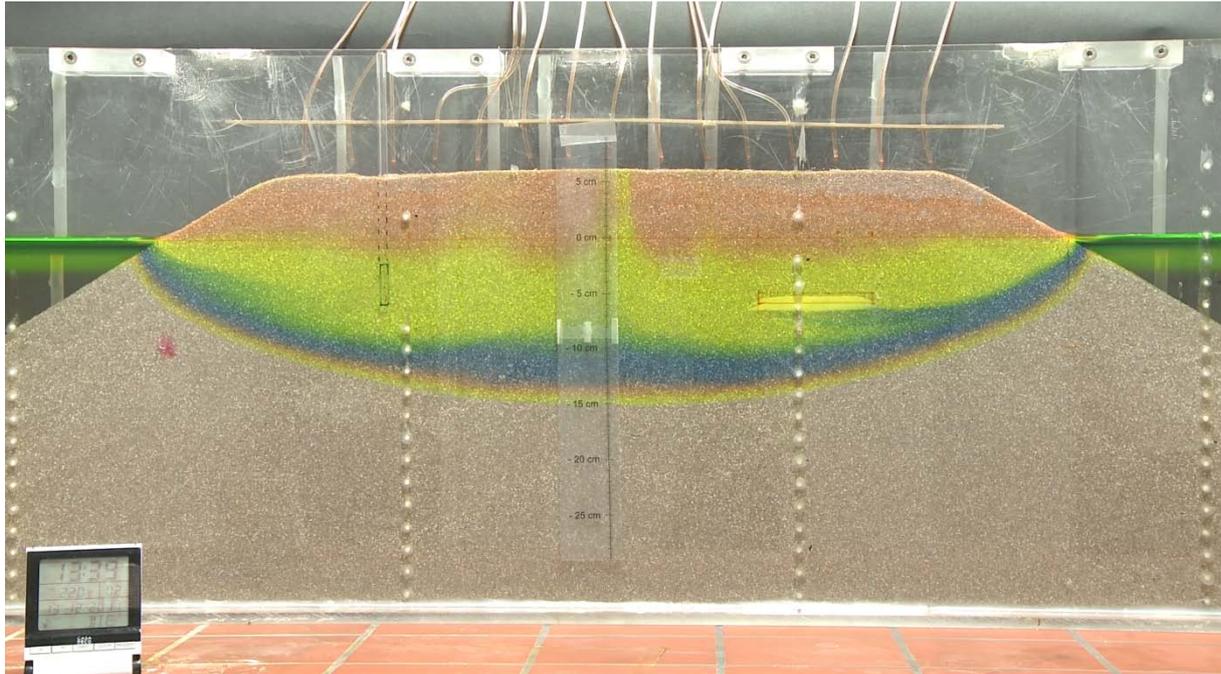


Abb. 1: Visualisierung der Altersschichtung einer Süßwasserlinse durch zeitlich gestaffelte Einfärbung des Infiltrationswassers mit unterschiedlichen Tracern.

Die genannten Untersuchungsmethoden sind Teil des interdisziplinären BGR-Projektes FLIN (Freshwater Lens INvestigation), in dem weiterhin Geländeuntersuchungen auf Nordseeinseln durch Aero-Elektromagnetik und terrestrische Geophysik sowie Isotopenanalysen zur Bestimmung der Grundwasserneubildung beinhaltet sind. Besonderes Augenmerk dieser Arbeiten liegt auf der Untersuchung von Heterogenität und der Skalenübertragbarkeit.

## Literatur

- Diersch, H.-J.G. (2005): FEFLOW: Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. WASY GmbH Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin, Germany, p. 292
- Fetter, C.W. (1972): Position of the Saline Water Interface beneath Oceanic Islands. *Water Resour. Res.* 8: 1307-1314
- Vacher, H.L. (1988): Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses. *Geolog. Soc. Amer. Bul.* 100: 580-591

# **Grenzbereiche und Anwendung numerischer Modellierung Dichte-getriebener Strömung auf verschiedenen hydrologischen Skalen**

Thomas Graf, Clemens Cremer, Carlos Roberto Guevara, Eugenia Mabel Hirthe, Qiang Sun,  
Katharina Vujevic und Jie Yang,

Leibniz Universität Hannover, Deutschland

## **Zusammenfassung**

In natürlichen hydrologischen Systemen kann sich Wasserdichte mit Temperatur und/oder Salinität signifikant ändern. Wasserdichte steigt mit sinkender Temperatur und mit steigender Salinität. Resultierende "Dichte-getriebene" Strömung tritt u.A. auf (i) in Küstennähe, (ii) in Endlagerstätten, (iii) unter Mülldeponien, (iv) in geothermalen Reservoirien, und (v) bei Erdgasvorkommen. Scheinbar insignifikante Dichte-Variationen können hydraulische Gradienten erzeugen, die den im Gelände typischerweise gemessenen hydraulischen Gradienten entsprechen (Simmons, 2005, Hydrogeology Journal). Um Dichte-getriebene Strömung zu verstehen, ist das Institut für Strömungsmechanik der Leibniz Universität Hannover an der Entwicklung und Anwendung numerischer Modellierwerkzeuge beteiligt. Ziel ist, experimentell und im Gelände beobachtete Phänomene Dichte-getriebener Strömung realitätsnah abzubilden. Dies umfasst Strömung in ungesättigten Medien, in geklüfteten Medien, sowie die Interaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasser. Wir entwickeln und verwenden das numerische finite-Elemente Grundwassermodell HydroGeoSphere (Therrien et al., 2012, HydroGeoSphere user's guide). Bei der Entwicklung liegt der Fokus auf numerischer Effizienz und Anwenderfreundlichkeit. Wir testen unser Modell mithilfe von Laborexperimenten (Elder, 1967, Journal of Fluid Mechanics; Simmons et al., 2002, Transport in Porous Media). Mit entwickelten und getesteten numerischen Modellen sind wir in Forschung, Lehre und Consulting in den folgenden Anwendungsfällen aktiv: (i) Meerwasser-Intrusionen, (ii) Sturmfluten und Küstenschutz, (iii) Strömungsdynamik in Küstenaquiferen, (iv) thermohaline Strömung in geothermalen Reservoirien, (v) Strömung in geklüftet-porösen Gesteinen, (vi) Gewinnung von Erdgas, (vii) Risikoabschätzung der fracking Technologie, und (viii) nukleare Endlager.

# **Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit von Abfluss-Messungen in mittelgroßen Flüssen**

S. Song, B. Schmalz, G. Hörmann und N. Fohrer

Wasserwirtschaft Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Mit zunehmendem Interesse und steigenden Anforderungen an die Qualität von Oberflächengewässern und die Hydrodynamik werden zusätzliche Informationen über Wasserströmungen in Flüssen und Kanälen benötigt. Die akustische Doppler-Technologie (ADQ) ermöglicht es, diese Daten hocheffizient und genau zu ermitteln. Von September 2010 bis Juni 2011 führten wir zur Datenerhebung 366 Messungen zur Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe und Abfluss in 174 Flussabschnitten in 8 Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe in Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süd-Ost-China durch. Die Messungen wurden zur Prüfung und zum Erkenntnisgewinn über Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit des eingesetzten Geräts verwendet und geben Hinweise auf unterschiedliche Parameter-Einstellungen für verschiedene Süßwassersysteme. Das Ergebnis soll zur Verbesserung der Abflussmessung in mittelgroßen Flüssen und Kanälen beitragen. Die Erkenntnisse dieser Studie zeigen deutlich, dass die Ergebnisse zu durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten, Profil-, Schicht- und Punktwerten des akustischen Doppler-Geräts sehr gut mit den Ergebnissen von elektromagnetischen Messverfahren oder Ultraschallgeräten vergleichbar sind. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Präzision der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit nahezu gleich ist, hingegen die Präzision der vertikalen Geschwindigkeit besser ist als die der Schichtgeschwindigkeit, die wiederum eine geringere Präzision in horizontaler als in vertikaler Richtung aufweist. Die Punktgeschwindigkeit, als Verhältnis aus Vertikal- und Schichtgeschwindigkeit, lässt sich nach Präzision betrachtet dazwischen einordnen. Ein Vergleich der Parametereinstellung "Zellgröße" und "Zeitintervall" ergab, dass das Messergebnis sensibler auf die Einstellung "Zellgröße" reagiert. Eine Einstellung der Zellgröße auf 0,1-0,2 ergab die präziseste Messung. Für die Fließgeschwindigkeiten  $> 0,3$  m/s ist ein Zeitintervall von 30 s erforderlich, für flachere und langsamer fließende Flüsse ein Zeitintervall von  $\geq 50$  s. Je näher der Messpunkt am Flussbett oder Flussufer ist, desto größer können die Messfehler sein. Das Flussbett nimmt dabei deutlich mehr Einfluss auf das Ergebnis als das Flussufer.

# Gestaltung des Uferzonenbereichs für effiziente Nährstoffentfernung mittels eines simplen physikalisch basierten Ansatzes

Luisa Hopp und Keith R. Smettem

Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth, Deutschland

## Zusammenfassung

Uferzonenbereiche sind wichtige natürliche Filter an der Schnittstelle zwischen terrestrischen und aquatischen Ökosystemen. In landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten ist der Einsatz von Uferzonenbereichen um Gewässer als Puffer gegen Nährstoffeinträge weit verbreitet, wobei das wichtigste Merkmal der Pufferwirkung die Breite des Uferzonenstreifens ist. Die Wirksamkeit des Nitratabbaus hängt sowohl von physikalischen als auch biogeochemischen Faktoren ab. Die Verweilzeit des Wassers innerhalb der Fließwege im System reguliert die Rate, mit der die physikalischen und biogeochemischen Umwandlungsprozesse erfolgen. Obwohl die Bedeutung von Verweilzeit für Umwandlungsprozesse allgemein anerkannt ist, ist die Verweilzeit bisher nicht in ein allgemeines physiko-chemisches Rahmenwerk einbezogen worden, das zu einer Abschätzung der Wirksamkeit von Uferzonenstreifen für die Entfernung von Nährstoffen verwendet werden kann. Um die Breite des Uferzonenstreifens zu bestimmen, die für die Reduzierung der Zuflusskonzentration um einen bestimmten Prozentsatz erforderlich ist, beginnen wir mit stationärem Fluss und einem simplen Abbauprozess erster Ordnung, der konstant ist für die gesamte Uferzone. Dieser analytische Ansatz führt zu einfachen Management-Richtlinien für die Entfernung von Nährstoffen. Für eine Reduzierung der Nitratkonzentration im Zufluss um 90% muss die Bedingung  $k_{90} \cdot t_{90} \geq 2.3$  erfüllt sein, worin  $k$  die Abbaukonstante erster Ordnung und  $t_{90}$  die mittlere Verweilzeit innerhalb des Systems ist, die erforderlich für eine Reduzierung der Nitratkonzentration um 90% ist. Die Verweilzeit  $t_{90}$  kann analytisch aus der Gleichung für einen exponentiellen Abbau erster Ordnung abgeleitet werden. Zur Berechnung der Verweilzeit  $t_{90}$  und nachfolgend der erforderlichen Breite des Uferzonenstreifens, um die gewünschte Reduzierung der Nitratkonzentration zu erreichen, müssen die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, der gesättigte volumetrische Wassergehalt, die Abbaukonstante erster Ordnung und der Gradient der Uferzone bekannt sein oder abgeschätzt werden. Mit dem numerischen Modell HYDRUS-2D analysieren wir anschließend komplexere Szenarien, wie z.B. eine räumlich ungleichmäßige Verteilung der Abbaukonstante erster Ordnung in der Uferzone. Wir zeigen, dass mit diesem physikalisch-basierten Ansatz Nährstoffprofile in Uferzonen, die in der Literatur veröffentlicht wurden, reproduziert werden können.

# **Controlled Drainage zur Minderung des Nährstoffaustrages aus dränierten landwirtschaftlich genutzten Flächen**

Petra Kahle, Adelwin Bothe und Bernd Lennartz

Professur Bodenphysik und Ressourcenschutz, Universität Rostock, Deutschland

Eine in Deutschland durchgeführte Bestandsaufnahme zeigt, dass 62% der Flüsse, 38 % der Seen und sogar 91% der Küsten- und Übergangsgewässer die Umweltziele nach EU-Wasserrahmenrichtlinie wahrscheinlich nicht erreichen werden (BMU 2005). Ursache dafür sind neben Gewässerstrukturdefiziten die nach wie vor zu hohen Nährstoffeinträge. Nach aktuellen Nährstoffeintragsberechnungen für Deutschland gelangen 22% des Stickstoffeintrages über den Pfad der Dränung in oberirdische Gewässer (Fuchs et al. 2010). Für Mecklenburg-Vorpommern wurden sogar 47 % des N-Eintrages über die Dränung kalkuliert, gefolgt vom Grundwasserpfad mit 25 % (Behrendt & Bachor, 1998).

Die Dränung landwirtschaftlicher Standorte bewirkt einen beschleunigten Wasser- und Stofftransport. Dadurch können die natürlichen Prozesse der Nährstoffretention und -umwandlung nur eingeschränkt ablaufen. Folgen sind erhöhte Nährstoffausträge aus dem Boden sowie stoffliche Belastungen der Oberflächengewässer. Obwohl die Bedeutung des Eintragspfades Dränung für die Nährstoffbelastung der Oberflächengewässer seit langem bekannt ist, fehlt es bislang an Methoden, diesem Pfad durch Änderung der landwirtschaftlichen Praxis wirksam zu begegnen. Maßnahmen, wie gezielter Düngemiteleinsatz, sinnvolles Düngemanagement, gezielte Fruchtartenwahl u.a. können zwar den Nährstoffinput in die Fläche reduzieren, vermögen aber nicht den im Boden über Jahre akkumulierten Nährstoffvorrat nachhaltig zu reduzieren. Zur Erreichung der Ziele des Gewässerschutzes rücken daher zunehmend wasserseitige Maßnahmen in den Fokus.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Stoffeinträge in Gewässer bieten direkt am Dränsystem angreifende Maßnahmen. „Controlled Drainage“ (kontrollierte Dränung) beinhaltet die Regulierung des Durchflusses an Dränausläufen und zielt auf Wasserhaltung in der Fläche ab. Dadurch können sich unterhalb des Wurzelbereiches höhere Bodenwassergehalte und dadurch reduktive Verhältnisse einstellen, die Denitrifikation und somit Nitratabbau fördern.

Zur Prüfung der Machbarkeit und der Wirksamkeit von „Controlled Drainage“ unter den Bedingungen des norddeutschen Tieflandes wurde in Zusammenarbeit zwischen der Universität Rostock und einem mittelständischen Betrieb ein Prototyp entwickelt. Als Regulierungseinheit dient ein absenkbarer, mittels Stellschlüssel ansteuerbarer, Kegelverschluss. Teststandort ist Dummerstorf (Mecklenburg-Vorpommern), wo zwei annähernd gleich große Teileinzugsflächen (4,15 ha bzw. 4,67 ha) eines Ackerschlags mit vergleichbaren Bedingungen hinsichtlich Meteorologie, Boden, Dränung sowie Bewirtschaftung ausgewählt wurden (Abb. 1). Während der Abflussperiode 2010/11 fanden an der Controlled Drainage (CD) Fläche mit der Regulierungseinheit am Dränauslass und der Uncontrolled Drainage (UCD) Fläche mit dem Dränabfluss im Freigefälle vergleichende Durchfluss- und N-Konzentrationsmessungen des Dränwassers an 24 Terminen statt.

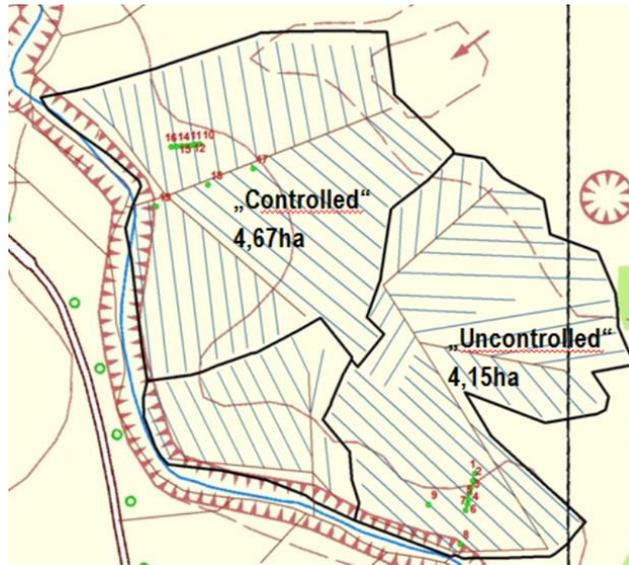


Abb. 1: Kennzeichnung der Teileinzugsgebiete der CD- und UCD-Flächen, des Dränsystems sowie der Grundwasserbeobachtungsrohre am Standort Dummerstorf

Während der Abflussperiode 2010/2011 fielen insgesamt 330 mm Niederschlag. Hervorzuheben sind die hohen Niederschlagsmengen von 139 mm im November 2010 und die Schneeschmelze im Januar 2011, in deren Folge sich ungewöhnlich hohe Wasserstände im angrenzenden Graben sowie Rückstauereffekte an der CD-Messstation einstellten. Abflussmessungen und Wasserprobenahmen waren dadurch zeitweise unterbunden. Die Nitrat-N-Konzentrationen im Dränwasser variierten im Zeitraum von Februar bis April 2011 im Größenbereich von 5,8 bis 22,2 mg l<sup>-1</sup> und ließen keine gerichtete Beeinflussung erkennen. Dennoch deutete sich eine nicht unerhebliche Reduzierung der ausgetragenen Nitrat-N-Fracht in der CD-Variante aufgrund verringerter Dränabflüsse an. Während der aktuellen Abflussperiode 2011/12 zeigte das Grundwasser der CD-Fläche bislang vergleichsweise geringere Grundwasserflurabstände (CD 0,94m, UCD 1,36m) und Nitrat-N-Konzentrationen (CD 3,0 mg l<sup>-1</sup>, UCD 15,8 mg l<sup>-1</sup>) gegenüber der UCD-Fläche. Es wird eingeschätzt, dass die Regulierungseinheit den Funktionstest trotz widriger Witterungsbedingungen und daraus resultierender eingeschränkter Wirksamkeit bestanden hat.

Künftige Untersuchungen sollen bei höherer zeitlicher Auflösung und Prüfung der Isotopensignaturen im Dränwasser dazu beitragen, die vorgefundenen Effekte abzusichern und das Prozessverständnis zu verbessern.

## Literatur

- Behrendt, H. und A. Bachor, (1998): Point and diffuse load of nutrients to the Baltic Sea by river basins of North East Germany (Mecklenburg-Vorpommern). *Wat. Sci. Tech.* 38, 10, 147 – 155.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) 2005: Die Wasserrahmenrichtlinie - Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland. Berlin, 67 Seiten.
- Fuchs, S., U. Scherer, R. Wander, H.-Behrendt, M. Venohr, D. Opitz, T. Hillenbrand, F. Marscheider-Weidemann, T. Götz, (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS – Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. UBA-Texte 45/2010.

# **Reaktive Grabensysteme zur Reinigung von Dränagewässern – Ein Baustein zur Reduktion des diffusen Stickstoffeintrags aus landwirtschaftlichen Flächen?**

Matthias Pfannerstill, Cindy Hugenschmidt, Michael Trepel und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Diffuse Stickstoffeinträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen tragen in Deutschland erheblich zur Nährstoffbelastung aquatischer Ökosysteme bei. Die norddeutsche Tiefebene nimmt in diesem Kontext eine besondere Rolle ein, denn durch die hohen Anteile gedränter Flächen ist hier der Stickstoffaustrag in Oberflächengewässer und Grabensysteme besonders hoch.

Im Hinblick auf die Produktionsziele der Landwirtschaft ist nach zahlreichen Maßnahmenprogrammen deutlich geworden, dass eine entscheidende Verringerung der Stickstoffbelastung durch alleinige Anpassung der Landwirtschaft nicht zu erreichen ist. Deshalb sind weitere technische Maßnahmen mit einzubeziehen, welche auf die nachträgliche Reinigung des Drän- und Grabenwassers abzielen.

Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems besteht in der Installation von Denitrifikationsreaktoren, deren Reaktionsmechanismus eine Verminderung der Nitratkonzentrationen erzielt. Anhand von unterirdischen und oberirdischen Denitrifikationsreaktoren konnte in zahlreichen Untersuchungen eine entscheidende Verringerung der Nitratkonzentrationen belegt werden. Bisher liegen jedoch keine Erfahrungen aus Deutschland bezüglich der Umsetzbarkeit und Effizienz solcher Reaktoren vor.

Im Rahmen des Projektes "Untersuchungen zur Wirkung von reaktiven Grabensystemen auf die Nährstoffrückhaltung in Schleswig-Holstein" wurde ein reaktives Grabensystem mit organischem Füllmaterial konzipiert und etabliert. Anhand dieses Grabensystems wurde zunächst die grundsätzliche Eignung und Effizienz der Maßnahme für den Nährstoffrückhalt ermittelt. Dabei wurde insbesondere auf die Fragestellung eingegangen, inwieweit die Einbringung von Material mit hohen organischen Anteilen die Nitratkonzentration des Grabensystems verringert.

Aus den bisherigen Ergebnissen der Untersuchung geht hervor, dass bereits bei einer kurzen Filterstrecke von 20 m eine Abnahme der Nitratkonzentration von bis zu 5 mg/L erreicht werden kann. Diese Ergebnisse deuten das hohe Potenzial reaktiver Grabensysteme an, einen Beitrag zur Verminderung diffuser Stickstoffeinträge in die Oberflächengewässer zu leisten.

# **Großräumige hydrologische Messkampagnen im Norddeutschen Tiefland und erste Auswertungen zur Erfassung des Istzustandes des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes**

Hilmar Messal, Torge Beckmann, Song Song und Nicola Fohrer

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen BMBF-Projektes "Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland (NaLaMa-nT)" wurden großräumige hydrologische Messkampagnen im Norddeutschen Tiefland in vier repräsentativen Regionen in insgesamt sechs Flusseinzugsgebieten (Hunte, Hache, Ilmenau, Nuthe (SA), Buckau, Demnitzer Mühlenfließ) durchgeführt. An über 200 Messpunkten wurden jeweils physikalische und chemische Wasserparameter bestimmt, der Abfluss gemessen bzw. berechnet und Wasserproben entnommen, die hinsichtlich der Konzentration von Pflanzennährstoffen analysiert werden. Die daraus berechneten Frachten stellen die Grundlage zur Erfassung des Istzustandes des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes dar und dienen als Basis für die Kalibrierung des Wasser- und Stoffhaushaltsmodells, im vorliegenden Falle des Modells SWAT. Erste Ergebnisse und Erkenntnisse der Messkampagnen werden vorgestellt. Die künftigen Modellrechnungen gestatten die Ableitung entsprechender hydrologischer Anpassungsstrategien an die Folgen des globalen Wandels im Landschaftswasser- und -stoffhaushalt für das Norddeutsche Tiefland. Die Modellergebnisse finden weiterhin Verwendung als Entscheidungshilfe zur Lösung potenzieller Interessenkonflikte zwischen Flächennutzung und Ressourcenbereitstellung für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserversorgung sowie Gewässer- und Naturschutz.

# Ökotonbasierte Analyse von Fauna-Habitat-Beziehungen in Quellgewässern als Beitrag für den Gewässerschutz

Martin Reiss

Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Geographie, Deutschland

## Einleitung

Quellen sind in zweifacher Hinsicht besondere ökohydrologische Grenzbereiche. Das Eukrenal als Quellaustritt ist eine Schnittstelle zwischen unterirdischem Grundwasser und oberirdischem Gewässer. In diesem Grenz-Lebensraum kommt es bei den darin lebenden Organismen (Wirbellose) häufig zu Grenzüberschreitungen, die mit dem Wasser- und Stoffaustausch einhergehen. Als grundwasserabhängiges Ökosystem und Gewässertyp sind Quellen allerdings auch Grenzbereiche zwischen dem an der Oberfläche befindlichen aquatischen Teillebensräumen und den in sie integrierten terrestrischen Grenzsäumen. Diese Ökotoncharakteristik wird bei ökologischen Untersuchungen wie der Fauna-Habitat-Beziehung selten berücksichtigt. Außerdem fehlen Informationen zur Substratpräferenz der Fauna und somit Aussagen zur gewässermorphologisch-ökologischen Bedeutung dieses speziellen Gewässertyps weitestgehend. Deshalb wurde ein Konzept entwickelt, um die gewässerstrukturelle Ausstattung und deren Besiedlung ökotonbasiert zu untersuchen. Hierzu wurden ausschließlich morphologisch ungestörte Waldquellen des zentralen Mittelgebirges in Deutschland (Hessen, Thüringen) ausgewählt. Der Untersuchungsansatz geht über eine Analyse der aquatischen Fauna hinaus und bietet die Möglichkeit den Gesamtlebensraum inklusive terrestrischer Lebewesen abzubilden. Die Substratbindung bestimmter Lebewesen (Taxa) zeigt somit eine weiterreichende ökologische Bedeutung dieses Gewässertyps und seiner Mikrohabitate in der Analyse auf.

## Methodik und Bedeutung

Das Multihabitat-Sampling für Quellgewässer wurde erarbeitet, welches eine Faunaprobennahme proportional zu den Deckungsgraden der einzelnen mineralischen und organischen Substrattypen vorsieht. Dabei wird ein Substrattyp für zwei Minuten je 5%-Deckungsgrad gekeschert und/oder abgesammelt. Das bedeutet, dass dominante Substrattypen als Mikrohabitat entsprechend analytisch höherwertig berücksichtigt werden, als unterrepräsentierte, seltene Substrattypen. Allerdings ist eine gewässertypologische Berücksichtigung bzw. Gewichtung dominanter Substrate als gewässermorphologische Struktur gewährleistet. Die Substratkartierung wird demnach mit der Faunaprobennahme gekoppelt. Dabei wird ein 2-Schicht-Ansatz in die Erfassungsmethodik eingeführt. Mineralische und organische Substrate werden getrennt von einander als einzelne Layer (= 100% Flächenbezug) gekennzeichnet. Dieser Schritt wurde gewählt, damit mineralische Substrate, die im Wald meist von Falllaub (CPOM) überdeckt werden, ansonsten nicht beprobt würde, obwohl Substratbesiedler zu vermuten sind. Die Nomenklatur richtet sich dabei nach der limnologischen Ansprache von Substrattypen: Mineralische Substrate (Argyllal, Psammal, Psammopelal, Akal,

Mikrolithal, Mesolithal, Makrolithal, Megalithal, Offener Verbau und Geschlossener Verbau als Technolithal) und organische Substrate (emerse Makrophyten, submerse Makrophyten, Moospolster, durchspülte Feinwurzeln, Xylal, CPOM, Nadelstreu, FPOM und Algen). Die Kombination dominanter Substrattypen führt zu einer Modellierung entsprechend hydromorphologisch relevanter Mikrohabitatstypen, die eine strukturelle Differenzierung des Quellgewässertyps ermöglichen, die empirisch belegbar sind. Die häufigsten, festgestellten Mikrohabitatstypen sind: a) CPOM dominierter, psammopelalreicher Habitatstyp; b) CPOM dominierter, mikrolithalreicher Habitatstyp; c) Makrophyten dominierter, psammopelalreicher Habitatstyp; d) Makrophyten dominierter, mikrolithalreicher Habitatstyp sowie e) Psammopelal dominierter Habitatstyp. Der Vorteil des Multihabitat-Samplings ist hierbei, dass die Modellierung der Gewässertypen faunistisch validiert werden kann, d.h. es handelt sich um ein integratives Verfahren, welches gleichsam die ökologische Relevanz von Mikrohabitatstypen und somit der Quellgewässer-Untertypen definiert. Aufgrund der Analyse der Substratpräferenz nach der Frequenz der festgestellten Taxa, können Substratanzeiger („Indikatoren“) abgeleitet werden. In einem statistischen Verfahren (SIMPER-Analyse oder SIMPER-Ähnlichkeit) wird die Erklärbarkeit gekennzeichnet. Insgesamt lassen sich 68 Taxa auf Art- und Gattungsniveau als Substratanzeiger charakterisieren. Da ein ökotonbasierter Ansatz verfolgt wurde, lassen sich hierbei aquatische, amphibische und terrestrische Taxa in das Verfahren integrieren. Damit liegt ein weitreichend integrativ-ökologischer Untersuchungs- und Analyseansatz zur Kennzeichnung und Bewertung der Gewässergüte vor. Neue Möglichkeiten zur Erarbeitung des Gewässer-/Arten- und Naturschutzes sind durchführbar. Erstmals können Quellgewässer in ihrer Bedeutung als grundwasserabhängige Landökosysteme untersucht und gekennzeichnet werden.

#### Schlussfolgerungen / Zusammenfassung der Ergebnisse

- Deutliche Substratpräferenzen von Wirbellosen sind feststellbar
- Teillebensräume lassen sich faunistisch differenzieren
- Der 2-Schicht-Ansatz und das Multihabitat-Sampling eignen sich zur Ableitung repräsentativer Habitatstypen
- Eine strukturelle Differenzierung limnologischer Quelltypen ist mittels Mikrohabitate im Modell möglich
- Repräsentative Habitatstypen sind faunistisch valide, d.h. das Modell ist ökologisch relevant

#### Literatur

Reiss, M. (2011): Substratpräferenz und Mikrohabitat-Fauna-Beziehung im Eukrenal von Quellgewässern. Dissertation am Fachbereich Geographie der Philipps-Universität Marburg. 244 S. + Anhang. <http://archiv.ub.uni-marburg.de/diss/z2011/0108/pdf/dmr.pdf>

# Hydrologische und hydraulische Modellierung zur Beschreibung aquatischer Habitats

Jens Kiesel, Britta Schmalz, Daniel Hering und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## Zusammenfassung

Der Lebensraum im Fließgewässer wird stark beeinflusst von menschlichen Eingriffen entlang des Fließweges sowie durch die Beschaffenheit und Bewirtschaftung des Einzugsgebietes. Um habitatverbessernde Maßnahmen zu erarbeiten, können Modelle helfen, den Einfluss von umweltrelevanten Stressoren abzubilden. Hierfür müssen einzugsgebietsbezogene Prozesse und Gerinneprozesse integriert und in einer sinnvollen Auflösung betrachtet werden.

Wir schlagen eine GIS-basierte Anwendung von drei frei verfügbaren Modellen vor. Zunächst wird das einzugsgebietsbezogene Modell SWAT genutzt, um die Wasserbilanz und flächenbezogene Erosion zu modellieren. Um Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Sedimenttransportprozesse einbeziehen zu können, werden zwei hydraulische Modelle genutzt. HEC-RAS wird dazu verwendet, die hydraulischen Parameter eindimensional abzubilden. ADH, ein zweidimensionales hydraulisches Modell, simuliert die gleichen Parameter in einer höheren Auflösung an einem ausgewählten Gerinneabschnitt.

Für das SWAT Modell war es wichtig, Drainagen und abflusslose Senken des Flachland Einzugsgebietes zu berücksichtigen. Die notwendigen Randbedingungen und Daten für HEC-RAS wurden aus den SWAT Ergebnissen, Querschnittsvermessungen und den Strukturkartierungen der WRRL abgeleitet. Für ADH wurden detaillierte Substratkartierungen und Messungen durchgeführt. Die hydraulischen Randbedingungen lieferte HEC-RAS.

Die SWAT Anpassung erreichte gute Resultate für den zehnjährigen Modellierungszeitraum. Die Ergebnisse von HEC-RAS und ADH stimmen plausibel mit gemessenen Sedimentfrachten überein, und bilden die Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen entlang des Gerinnes gut ab. Die mit HEC-RAS modellierten Erosionsprozesse im 9km langen Gerinne decken sich mit observierten Uferückgangsraten. Mit ADH wurde eine Simulation der mobilen Substrate eines 200 m langen Abschnittes durchgeführt, deren Ergebnis gute Übereinstimmung mit kartierten Substratkarten zeigt. Die Beschreibung des Makrozoobenthos-Habitats wird durch empirisch basierte Abhängigkeiten des Artenvorkommens von den berechneten Modellparametern durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit habitatbezogenen Makrozoobenthosprobenahmen und Bestimmungen verifiziert, die zu Beginn und Ende des einjährigen Modellierungszeitraumes durchgeführt wurden.

# Wassertemperaturen am Lech – Entwicklungen in den vergangenen 50 Jahren

K.-F. Wetzel, K. Auerbach und W. Merkel

Institut für Geographie, Universität Augsburg, Deutschland

Der Lech wurde seit Beginn des 20. Jahrhunderts systematisch für die Energieerzeugung ausgebaut. Zusammen mit dem Kopfspeicher Forggensee existieren über 25 Wehre und Staustufen mit einer installierten Leistung von mehr als 300 MW entlang des Lechs. Damit wurde der Lech von einem voralpinen Fluss mit hoher Feststoffführung und streckenweise verzweigtem Laufmuster in eine Kraftwerkstreppe mit festgelegtem Gerinne und regulierter Wasserführung umgewandelt. An den meisten Kraftwerken werden seit ihrer Inbetriebnahme täglich Wassertemperaturen erfasst, so dass teilweise mehr als 50 Jahre umfassende Datensätze für Wassertemperaturen vorliegen. Diese Messreihen stellen die Datenbasis für die vorliegende Untersuchung dar, in der verschiedenen Fragestellungen nachgegangen wurde. Zunächst sollte geklärt werden wie sich die Temperaturen im Unterwasser der einzelnen Staustufen verhalten und ob Temperaturtrends zu erkennen sind. Weiter wurde der Frage nachgegangen wie sich die Temperaturen flussabwärts entwickeln und welchen Einfluss ausgewählte Stauhaltungen auf das Temperaturverhalten ausüben.

Da die Staustufen unterschiedlich alt sind, beginnen die Temperaturreihen jeweils zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Auch hinsichtlich der Datenqualität bestehen Unterschiede zwischen den Datenreihen. Wurde zunächst an allen Staustufen im Unterwasser zumeist mit Schöpftthermometern täglich zu festen Terminen gemessen, erfolgte später eine Umstellung auf elektronische Messverfahren. Noch später kamen an einzelnen Kraftwerken Datalogger zum Einsatz, mit denen die Temperatur in 15-minütigen Intervallen registriert wurde. An einigen Kraftwerken, an denen bis heute von Hand gemessen wird, kam es infolge von Rationalisierungsmaßnahmen zu verlängerten Messintervallen von bis zu drei Tagen, so dass innerhalb der Datensätze Inhomogenitäten bestehen können.

Nach einer Qualitätsprüfung der Datensätze und vorsichtiger Ergänzung fehlender Temperaturwerte mit Hilfe regressionsstatistischer Methoden wurden für ausgewählte Kraftwerke mit möglichst langen und homogenen Datenreihen Trendanalysen für Mitteltemperaturen und Extremwerte unterteilt nach Jahreszeiten vorgenommen. Weiter wurden Analysen von Überschreitungs- und Unterschreitungstagen bestimmter Temperaturschwellenwerte für die gleichen Kraftwerke durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Temperaturentwicklung entlang des Flusslaufes an verschiedenen Kraftwerken im Vergleich untersucht. Die Fragen nach dem Einfluss der Stauhaltungen auf die Wassertemperaturen, aber auch die Temperaturentwicklung im Zuge des aktuellen Erwärmungstrends stehen im Zentrum der Untersuchung.

Die ersten Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Datensätze trotz einiger Lücken und Inkonsistenzen durch veränderte Messbedingungen geeignet sind, thermische Trends aufzuzeigen. Die Jahresmitteltemperaturen der einzelnen Kraftwerke sind in Abb. 1 dargestellt. Zunächst ist die Erwärmung des Wassers in Richtung Unterlauf festzustellen. Fast immer sind die Wassertemperaturen der im oberen Bereich der Stautreppe liegenden Kraftwerke höher als die der weiter unterhalb gelegenen.

Die ersten Auswertungsergebnisse zeigen einen allgemeinen Trend zur Erwärmung des Lechs. Dies betrifft die jährlichen Mitteltemperaturen genauso wie das Niveau der sommerlichen Temperaturen (Quartalsmittel JJA) und das jährliche Temperaturmaximum. Geringe Veränderungen sind während der Winterhalbjahre festzustellen. Die für das Winterquartal berechneten Trends und die der jährlichen Minima sind nicht signifikant, so dass sich die beobachteten Veränderungen vor allem auf das Sommerhalbjahr beschränken. Die Analyse von Temperaturdauerlinien zeigt einen Trend zur Zunahme von Überschreitungstagen thermischer Schwellenwerte, der insbesondere in den warmen Jahren mit langen Hitzeperioden wie 1994 und 2003 deutlich wird.

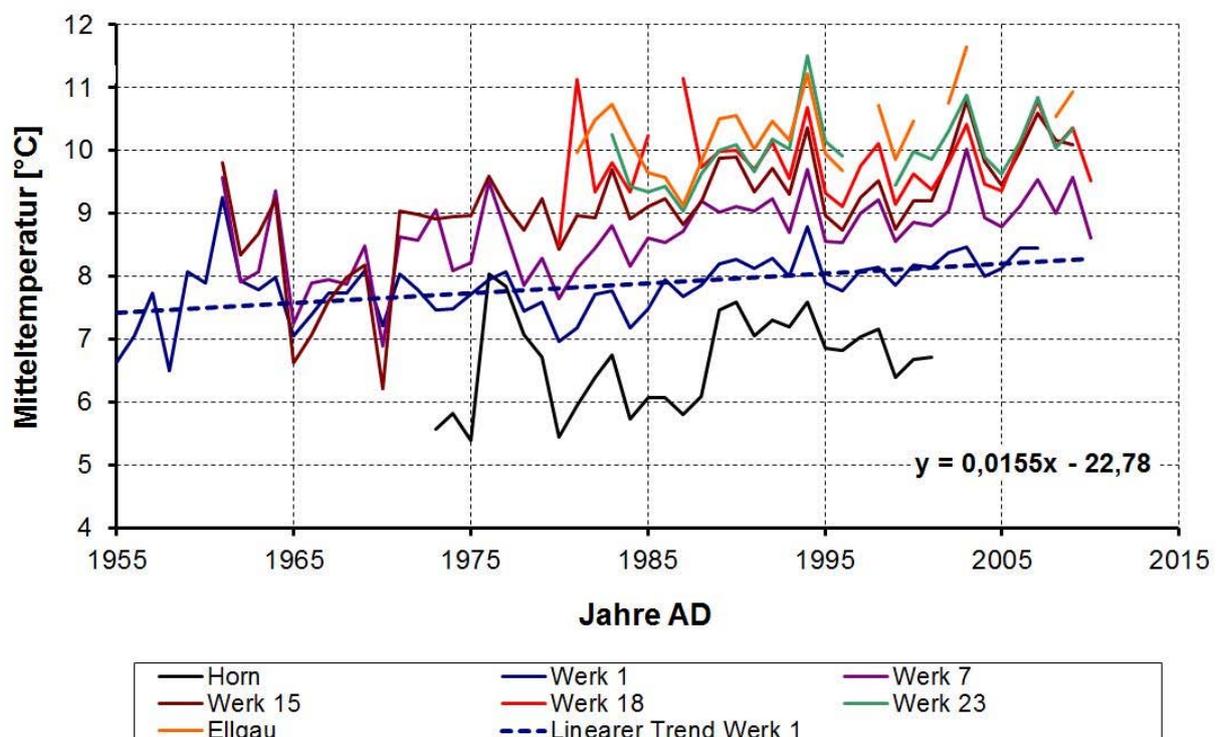


Abb. 1: Verläufe von Jahresmitteltemperaturen mit den Datenlücken entlang der Kraftwerkstreppe des Lechs vom Kraftwerk Horn bis zum Werk Ellgau. Angegeben ist der lineare Trend der Jahresmitteltemperatur am Werk 1 (Forgensee).

### Danksagung

Für die unbürokratische und freundliche Überlassung der Temperaturdaten für die Analyse sei den Kraftwerksbetreibern EON Wasserkraft, Bayerische Elektrizitätswerke (BEW) und dem Allgäuer Überlandwerk (AÜW) herzlich gedankt!

# **Auswirkungen von möglichen Klimaveränderungen auf das Erzeugungspotential von Wasserkraftwerken in einem mesoskaligen Einzugsgebiet in den Hohen Tauern**

Simon Frey<sup>1,2</sup> und Hubert Holzmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich

<sup>2</sup> alpS – Centre for Climate Change Adaption Technologies, Innsbruck, Österreich

## **Zusammenfassung**

Zur Abschätzung möglicher Klimaveränderungen auf das Nutzungspotential von Wasserkraftwerken in Österreich werden mehrere mesoskalige Einzugsgebiete mithilfe eines konzeptionellen hydrologischen Modells untersucht. Die Modellierung erfolgt auf Tagesbasis. Besonderes Augenmerk wird bei der hydrologischen Modellierung auf die zeitliche und räumliche Schneebedeckung im Einzugsgebiet gelegt. Die dafür notwendigen Informationen werden von MODIS zur Verfügung gestellt. Das Modell weist mit Nash-Sutcliffe-Werten zwischen 0.40 und 0.82 gute Übereinstimmungen mit gemessenen Abflusswerten auf. In diesem Beitrag wird das Verfahren am Beispiel des Einzugsgebietes der Isel (Hohe Tauern) vorgestellt.

## **Einleitung**

Österreich gewinnt etwa 55% seiner elektrischen Energie aus Wasserkraft. Diese Form der Energiegewinnung ist sehr stark abhängig vom Klima, da dieses die Ressource Wasser in zeitlicher und räumlicher Komponente beeinflusst. Im alpinen Raum werden besonders ausgeprägte Veränderungen aufgrund des Klimawandels erwartet. Diese Veränderungen betreffen sowohl den Niederschlag, mehr aber noch die Lufttemperatur. Das alpS - Centre for Climate Change Adaption Technologies hat in Kooperation mit der Universität für Bodenkultur und dem Energieproduzenten Verbund AG das Projekt POWERCLIM ins Leben gerufen um die Auswirkung möglicher Klimaveränderungen auf die Wasserkraftnutzung abschätzen zu können. Die Klimamodellierung wird hierbei vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur, Wien durchgeführt. Verwendet werden die regionalen Klimamodelle (RCMs) ARPEGE, REMO und RegCM3.

Das Einzugsgebiet der Isel liegt in den Alpen in der Region der Hohen Tauern. Es zählt mit ca. 1200 km<sup>2</sup> zu den mesoskaligen Einzugsgebieten und erstreckt sich von 672 m (Pegel bei Lienz) bis auf 3649 m ü. NN am Großglockner. 83 km<sup>2</sup> des Gebietes sind vergletschert (Stand: 2000). Im Mittel fallen jährlich ca. 1334 mm Niederschlag, wovon aufgrund der Höhe nur ca. 264 mm verdunsten (BMLFUW, 2005).

## **Vorgehensweise**

Verwendet wird ein konzeptionelles, hydrologisches Modell welches im Wesentlichen auf dem HBV Modell basiert (Holzmann et al., 2010). Die potentielle Verdunstung wird mittels des Ansatzes von Turc berechnet, bei der Schnee- und Gletscherschmelzmodellierung kommt ein einfaches Tagesgradverfahren zum Einsatz. Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand der Jahre 1996 bis 2005, die Validierung direkt im Anschluss daran anhand der Jahre 2006 bis 2010. Für die Kalibrierung wurde neben der Ganglinie und der Abflussdauerkurve auch die zeitliche und räumliche Verteilung der Schneedecke verwendet. Für die Wasserkraft sind auf längere Sicht die mittleren Abflüsse entscheidend, weshalb die Dauerlinie auf diese fokussiert und die Extremereignisse bei der Kalibrierung weniger ins Gewicht fielen.

Um Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen des Abflussverhaltens treffen zu können, ist es wichtig neben guter Übereinstimmung des Modells mit gemessenen Abflusswerten auch die dominierenden Abflussprozesse im Einzugsgebiet abzubilden. Sehr häufig existieren mehrere Parametersätze, die zu gleichguten Modellergebnissen führen, sich jedoch in der Zusammensetzung der Abflusskomponenten unterscheiden. Dies kann im Hinblick auf die Modellierung von Klimaszenarien zu Fehleinschätzungen des hydrologischen Systems führen. Während die meisten dieser Komponenten nur sehr schwer und aufwändig quantifizierbar sind, etwa mittels EMMA (EndMember Mixing Analysis), liegen für eine der wichtigsten Komponenten im alpinen Raum, die Schneebedeckung, Satellitendaten von MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) vor. Diese Informationen werden genutzt, um das Schneemodul zu kalibrieren. Die Anpassung hierbei erfolgt optisch.

## **Ergebnisse**

Das hydrologische Modell ist in der Lage, die bestehenden Verhältnisse im Einzugsgebiet der Isel gut wiederzugeben. Bei der Kalibrierung wurde ein Nash-Sutcliffe-Wert von 0.82, bei der Validierung 0.76 erzielt. Eine sehr gute Übereinstimmung wurde bei Betrachtung der Abflussdauerlinie erzielt. Hier wurden ein Bestimmtheitsmaß von 0.99 und ein RMSE (Root Mean Square Error) von 3.58 m<sup>3</sup>/s erreicht, allerdings unter der Einschränkung, dass Abflusswerte im jeweils höchsten und niedrigsten Bereich von einem Prozent nicht beachtet wurden. Diese Abflüsse sind im Hinblick auf die Fragestellung wenig von Bedeutung. Ebenso wurde eine gute Übereinstimmung der Schneeschmelzdynamik erzielt, wobei die modellierte Ausaperung der Schneedecke leicht zu spät eintritt.

## **Literatur**

- BMLFUW (Hrsg.) (2005): Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Holzmann, H., T. Lehmann, H. Formayer und P. Haas (2010): Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, 7-14.

# **Einfluss des Klimawandels auf die hydrologischen Prozesse küstennaher Einzugsgebiete, eine Modellstudie**

Thomas Graeff, Sascha Oswald, Axel Bronstert und Gabriele Baroni

Institut für Erd- & Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Deutschland

## **Zusammenfassung**

In Küstenregionen ist eine erhebliche Beeinträchtigung durch den Klimawandel zu erwarten. Neben steigendem Meeresspiegel sind erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmflut-, Starkregenereignissen und Trockenperioden zu erwarten. Daraus resultierende Folgen sind, die verstärkende Versalzung durch Grundwasserintrusionen und oberflächlich eindringendes Meerwasser. Dies wird sich auf die natürliche Vegetationsverteilung und landwirtschaftliche Nutzung auswirken. Das Landmanagement wird sich in diesen Regionen dementsprechend anpassen müssen, entweder durch Ausbau des Küstenschutzes und Drainagenetzes, durch Extensivierung und Umstellung der Landnutzung oder aus einer Kombination der zwei vorhergenannten Maßnahmen.

Um die Entwicklung der Küstenregionen auf Abflussverhalten, Versalzung und Wasserbilanz zu untersuchen, wurden in zwei Gebieten der deutschen Nord- (Leybucht/Greetsiel) und Ostseeküste (Hüttelmoor/Markgrafenheide) in Modellstudien realisiert und Unsicherheitsanalysen durchgeführt. Dabei wurde das physikalisch basierte Modell HydroGeospher genutzt. Die Modellläufe wurden unter der gegenwertigen Landnutzung und den vorhandenen meteorologischen Zeitreihen kalibriert. Mit Klimasimulationen basierend auf RCM-Analysen aus dem ECHAM5 Modelllauf wurden Prognosen für zukünftige Zeiträume ermittelt unter Verwendung von vier unterschiedliche Landnutzungsszenarien. Dabei wurden die folgenden Szenarien aufgestellt: neben der unveränderten aktuellen Landnutzung, Ausbau des Küstenschutzes, Extensivierung der Landnutzung und eine Kombination aus beiden.

Im Detail werden Salzwasserströme, Überstauungen von Süßwasser, Aussüßungsprozesse und Grundwasserintrusionen angetrieben durch Meeresspiegelanstieg und Trockenperioden betrachtet.

Die Modellrechnungen stellen die Grundlage für ökologische und ökonomische Studien dar um Prognosen über Vegetationsentwicklung und wirtschaftliche Entwicklungen in den Küstengebieten durchzuführen.

# Geohydraulische Modellierung eines küstennahen Moorstandortes unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels

Anne Hohlbein und Konrad Miegel

Fachgruppe Hydrologie und Meteorologie, Universität Rostock, Deutschland

## Zusammenfassung

Meeresspiegelanstieg und eine Zunahme der Sturmfluthäufigkeit sind nur zwei von vielen erwarteten Auswirkungen des globalen Klimawandels, die vor allem küstennahe Gebiete betreffen werden. Die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewirtschaftung und zukünftige Entwicklung von Küstenräumen gewinnt immer mehr an Bedeutung.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes COMTESS (Sustainable Coastal Land Management: Trade Offs in Ecosystem Services) soll für verschiedene Untersuchungsgebiete entlang der Ost- und Nordseeküste eine modellhafte Abschätzung der Auswirkungen erfolgen.

Das Einzugsgebiet des Niedermoors „Heiligensee und Hütelmoor“ liegt direkt an der Ostseeküste in der Nähe der Hansestadt Rostock und bildet das Hauptuntersuchungsgebiet für die aktuelle Projektierung der FG Hydrologie und Meteorologie der Universität Rostock. Das vorhandene langjährige Messnetz aus Grundwasserständen, Versalzungsgraden, Meteorologie, Bodenphysik, Vegetation und Abfluss wurde um weitere Messpunkte erweitert und liefert dabei die tiefgründige Grundlage für die anschließende geohydraulische Modellierung.

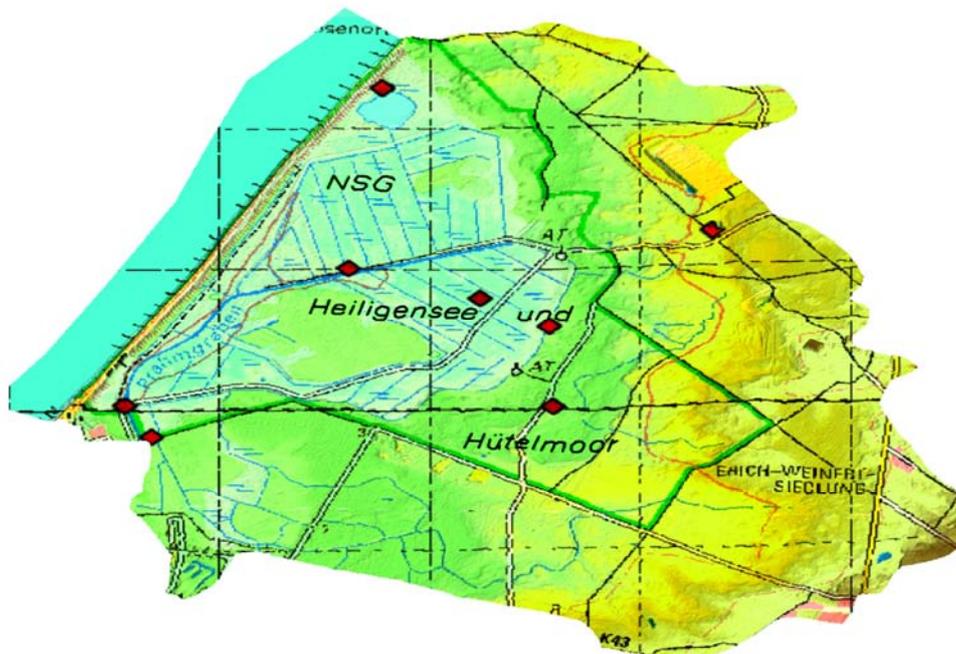


Abb. 1: Einzugsgebiet des Niedermoors Hütelmoor im Naturschutzgebiet „NSG Heiligensee und Hütelmoor, rot gekennzeichnet: Lage der Messstellen

Die Modellierung erfolgt u.a. mit dem Grundwassermodell FEFLOW und wird neben Aussagen über die Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes auch über die hydrologische Interaktion von Salz- und Süßwasser in direkter Küstennähe (Diersch 1994) sowie über die Entwicklung dieser unter dem Einfluss des Klimawandels ermöglichen.

Grundlage für das Modellierung bilden neben den aufgenommenen Messwerten verschiedene Klimaszenarien auf Grundlage des IPCC, anhand derer die wahrscheinliche zukünftige Entwicklung abgeschätzt wird. Ein erster Schritt ist dabei die Wiedergabe des hydrologischen Prozessgeschehens für den Ist-Zustand. Im weiteren Vorgehen wird das Modell jeweils um ein Klimaszenario erweitert und die so gewonnenen Ergebnisse auf weitere Untersuchungsgebiete übertragen. Zusätzlich werden verschiedene Landnutzungsszenarien und deren Einfluss auf das Abflussgeschehen untersucht.

## **Literatur**

- Diersch, HJG. (1994): Interactive, graphics-based finite-element simulation system - FEFLOW - for modeling groundwater flow and contaminant transport processes. WASY - Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Berlin.
- Kolp, O. (1957): Die nordöstliche Heide Mecklenburgs. Rostocker Heide, Gelbensander Forst, Forst Alte Heide, Ribnitzer Forst. Geographische Gesellschaft in der Deutschen Demokratischen Republik. Abhandlungen Nr.1 . Berlin, Deutscher Verlag der Wissenschaften.

## **Skalierung von ERA-Interim Daten in komplexem Terrain**

Lu Gao, Stefan Härer, Matthias Bernhardt und Karsten Schulz

Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland

### **Zusammenfassung**

Die Lufttemperatur ist eine dominierende Steuergröße für viele ökologische Prozesse und gehört damit zu den wichtigsten Eingangsgrößen für viele hydrologische Modelle. Temperaturmessungen in komplexem Gelände sind allerdings selten, insbesondere gilt dies für Alpine Hochlagen.

In dieser Studie zeigen wir wie gemessene, und ERA-Interim interne Temperaturgradienten genutzt werden können, um die vorliegenden  $0.25^\circ$  Re-Analyse Daten räumlich auf lokale Standorte/Stationen zu skalieren. Das vorgestellte Verfahren wird anhand von zwei meteorologischen Stationen für den Zeitraum 1979 bis 2000 überprüft. Eine der beiden Stationen (Garmisch-Patenkirchen) liegt im Tal auf 719 m die andere auf der Zugspitze auf 2964 m. Die beiden Stationen decken somit das komplette Höhenspektrum der Deutschen Alpen ab. Erste Analysen zeigen, dass durch das angewandte Skalierungsverfahren die Stationswerte mit hoher Genauigkeit (Nash-Sutcliffe-Koeffizient für Zugspitze und Garmisch von 0.96 bzw. 0.93) wiedergegeben werden konnten.

# Modellierung von dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen – die Quadratur des Kreises?

Markus Disse und Wolfgang Rieger

Universität der Bundeswehr, München, Deutschland

Sowohl in der wissenschaftlichen Community als auch in der (politischen) Öffentlichkeit wird seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert, wie wirksam dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind. Modelle, die die Verringerung der Hochwasserscheitel und des Abflussvolumens berechnen, sind unterschiedlich parametrisiert und simulieren die hydrologischen Prozesse mit verschiedenen komplexen Ansätzen. Daher ist es nicht erstaunlich, dass sich die Ergebnisse zum Teil um Größenordnungen unterscheiden. In diesem Beitrag wird dargestellt, dass sich das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH 8.4.2 zusammen mit dem gekoppelten zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell HYDRO\_AS-2D als geeignetes Hilfsmittel zur Simulation verschiedener dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen erweist. Die Stärken der Modelle liegen vor allem in der exakten Modellierung des Bodenwasserhaushalts durch die Verwendung der RICHARDS-Gleichung, was bei infiltrationsbeeinflussenden Maßnahmen eine Rolle spielt, sowie in der realitätsnahen Simulation der Gewässerstruktur und des Wellenablaufs mit Hilfe einer zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung. Allerdings werden auch konzeptionelle Modellansätze wie die Verwendung des Isochronenmodells mit nachgeschaltetem Einzellinearspeicher für den Zwischenabfluss und für den Oberflächenabfluss verwendet.

Während die Modellerstellung von WaSiM-ETH aufgrund ausreichender Datengrundlage im Untersuchungsgebiet (Einzugsgebiet der Windach) und entsprechender Analysetools (TANALYS) mit vertretbarem Aufwand erfolgte, gestaltete sich dies bei HYDRO\_AS-2D deutlich aufwändiger, da hier vielfach händisch Berechnungsnetze verknüpft, Netzfehler bereinigt und zahlreiche Randbedingungen zugewiesen werden mussten. Weiterhin übertrafen die Berechnungsläufe von HYDRO\_AS-2D mit einer Dauer von mehreren Tagen die bereits sehr langen Rechenzeiten des komplexen WaSiM-ETH-Modells um ein Vielfaches. In der vorliegenden Untersuchung entfiel allerdings der größte Zeitaufwand auf die Parametrisierung und Kalibrierung von WaSiM-ETH. Um die Nachvollziehbarkeit verschiedener Szenarienrechnungen zu gewährleisten wurden für die Kalibrierung ausschließlich konzeptionelle Parameter angepasst. Physikalisch begründete Parameter, wie beispielsweise der Sättigungswassergehalt bei Bodenverdichtungen, wurden ausschließlich für die Landnutzungsparametrisierung und die zu simulierenden Maßnahmen verändert. Dadurch war gewährleistet, dass die Szenarien eine sinnvolle Parametrisierung erhielten.

Die Kalibrierung und Validierung von WaSiM-ETH kann als sehr gut bewertet werden, da jeweils ein NASH-SUTCLIFFE-Koeffizient von deutlich über 0,9 erzielt wurde. Weiterhin wurde die Kalibrierung mittels vorhandener Grundwasserdaten und gemessener Bodenfeuchteverläufe bzw. Abflussganglinien des Messgebiets überprüft. Die Teilgebietsabflüsse aus WaSiM-ETH dienen als Modellinput für HYDRO\_AS-2D, wodurch sich auf Grund der großen Anzahl an Teilgebieten ein quasi diffuser Zufluss ergab. Die Überprüfung der modellierten Abflüsse am Gebietsauslass ergab eine sehr gute Übereinstimmung beider Modelle und bestätigte die Eignung des gewählten Ansatzes für die

Zielsetzung der Untersuchung. Mit dem gewählten Modellansatz ließen sich verschiedene dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen anhand physikalisch begründbarer Parameter modellieren, weshalb der gewählte Ansatz – abgesehen vom Zeit- und Datenaufwand – für die Simulation dieser Maßnahmen als sehr gut geeignet angesehen werden kann. Die Szenarienrechnungen waren nachvollziehbar und zeigten die Möglichkeiten und Grenzen dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen deutlich auf. Unsicherheiten sind vor allem bei den Maßnahmen, bei denen das Abflussgeschehen primär durch veränderte Zwischenabflüsse beeinflusst wird, einzukalkulieren, da der Ansatz zur Konzentration des Zwischenabflusses in WaSiM-ETH vereinfacht ist (Isochronen, verknüpft mit Einzellinearspeicher). Eine Übertragbarkeit der Modellierungsergebnisse in andere Einzugsgebiete ist vor allem bei dezentralen Kleinrückhalten und Gewässerrenaturierungen gewährleistet, da hierbei die Wirksamkeit der Maßnahmen vor allem durch topographische Aspekte wie das spezifische Volumen der Becken, das durch Renaturierung reduzierte Längsgefälle oder die aufgeforstete Auwaldfläche bestimmt wird. Dagegen hängt die Wirksamkeit der Maßnahmen, die vor allem die bodenhydraulischen Eigenschaften beeinflussen, primär von den vorliegenden Bodenverhältnissen und der Landnutzung ab, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse ohne eingehende Voruntersuchung des Gebiets erschwert. Durch Extremszenarien mit 100 % Sand- oder Tonboden im Einzugsgebiet konnten in diesem Zusammenhang allerdings Tendenzen aufgezeigt werden. Die Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet der Windach westlich von München werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst (Größe des Gebiets: 65 km<sup>2</sup>).

Tab. 1: Scheiteländerung der betrachteten Maßnahmen im nördlichen Teileinzugsgebiet der Windach (65 km<sup>2</sup>) (Index a = advektiver Niederschlag; Index k = konvektiver Niederschlag)

Maßnahme	HQ <sub>10_a</sub>	HQ <sub>100_a</sub>	HQ <sub>50_k</sub>	HQ <sub>60_k</sub>
100 % Acker	+ 15,0	+ 6,1	+ 6,1	+ 8,0
Konservierende Bodenbearbeitung	- 0,5	- 0,3	+ 0,3	- 0,8
Rückbau Dränmaßnahmen	-0,1	0	0	0
Dräntiefe und –abstand halbiert	+ 0,4	+ 0,1	+ 0,2	0
erhöhte Belastung auf Grünland	0	+ 0,1	+ 0,4	+ 0,3
Renaturierung von Mooren	- 4,6	- 4,0	- 4,2	- 6,9
Ökologischer Waldumbau	- 1,5	- 0,1	- 0,8	- 1,9
Aufforstung um 10 %	- 1,0	- 0,5	- 0,4	- 0,6
Aufforstung um 10 % +	- 3,6	- 1,0	- 3,0	- 5,0
Ökolog. Waldumbau				
Aufforstung auf 100 %	- 17,0	- 12,2	- 19,8	- 13,5
Aufforstung auf 100 % +	- 32,4	- 16,2	- 34,1	- 30,5
Ökolog. Waldumbau				
Dezentrale Kleinrückhalte	- 13,8	- 9,5	- 15,0	- 22,2
Renaturierung Windachzuflüsse	- 5,9	- 0,9	- 3,5	- 2,4
Renat. Windachzuflüsse mit Auwald	- 6,4	- 5,0	- 11,1	- 11,0
Maßnahmenkonzept	- 17,9	- 11,1	- 19,8	- 26,8

# **Neue Fernerkundungsmethoden in der Hydrologie – Flächenhafte Abschätzung der Evapotranspiration mittels eines UAV**

Philipp Rauneker und Gunnar Lischeid

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die flächenhafte Abschätzung aktueller Evapotranspirationraten stellt eine besondere Herausforderung in der quantitativen Hydrologie dar. Herkömmliche Methoden stellen punktuelle Messgrößen zur Verfügung, welche durch Extrapolation oder die Anwendung empirischer Verfahren integrierte Flächenwerte liefern. Der Einfluss räumlicher Strukturen (Heterogenität der Landschaft) in den relevanten kleinräumigen Betrachtungsskalen kann von diesen Methoden nur unzureichend erfasst werden.

Moderne optische Messsysteme an Bord eines ferngesteuerten unbemannten Flugzeugs (UAV) bieten die Möglichkeit, räumlich hoch aufgelöste Bild-Daten zu erzeugen. Szenen im optischen, nahen infraroten und thermalen infraroten Spektralbereich werden - eingebettet in ein Energiebilanzmodell - für die Erstellung von Verdunstungskarten genutzt. Hierbei dienen vor allem die spektralen Eigenschaften der Vegetation, welche als Bindeglied zwischen Boden und Atmosphäre den größten Einfluss auf die Evapotranspiration von Landoberflächen hat, als Grundlage der Berechnungen. Im Gegensatz zu Satellitendaten können sowohl die räumliche Auflösung (Überflugshöhe) als auch die zeitliche Auflösung (Überflugsintervalle) selbst bestimmt werden und somit eigene Zeitreihen erzeugt werden. Dadurch lassen sich sowohl der Einfluss der Landschaftsstruktur, als auch die zeitliche Entwicklung der beobachteten Parameter bestimmen.

Ziel der Arbeit ist die Bestimmung der räumlichen Verteilung der Verdunstung unter dem Einfluss ausgewählter Umgebungsvariablen. Dafür ist die Entwicklung einer robusten Datenverarbeitungskette vonnöten, welche alle nötigen Verarbeitungsschritte der Spektraldaten beinhaltet. Dazu gehören die Kalibrierung der Kamerasysteme, geometrische, radiometrische und thermische Korrekturen, sowie die Mosaikierung einzelner Bilder zu einer Szene. Für eine erste Abschätzung des Transpirationsverhaltens werden Wasser-Stress-Parameter ausgewählter Pflanzenbestände ermittelt bzw. kombiniert. Die Datenerhebung wird auf mehreren ZALF-Versuchsflächen in Brandenburg durchgeführt. Besondere Beachtung erfährt die Analyse von Übergangsbereichen zwischen unterschiedlich gut wasserversorgten Landschaftsausschnitten.

# **Einordnung der extremen Niederschläge in Nordostdeutschland im Juli und August 2011**

Konrad Miegel und Stefanie Kliesch

Professur für Hydrologie, Universität Rostock, Deutschland

Nach dem ungewöhnlich trockenen Frühjahr von März bis Mai 2011, das in Deutschland das trockenste Frühjahr seit 1893 gewesen ist, folgte insbesondere in Nordostdeutschland im Juli und August ein extrem niederschlagsreicher Sommer. Räumlich ragte dabei noch Rostock-Warnemünde (Station des Deutschen Wetterdienstes) aus dem Geschehen heraus. Der bisher größte Monatsniederschlag in Warnemünde seit 1901 wurde im August 1946 mit 189 mm gemessen und im Juli 2011 mit 343,9 mm weit überboten. Dass der bisherige Rekord im August 2011 mit 192,9 mm gleich noch einmal übertroffen worden ist, fand in den Medien weit weniger Beachtung als die dramatischen Folgen, die zu beklagen waren. Die umfangreichen und phasenweise intensiven Niederschläge führten nicht nur zur Ausuferung von Fließgewässern, sondern auch zur Überlastung von urbanen und ländlichen Entwässerungssystemen sowie zum Rückstau in küstennahen Niederungsgebieten, weil dort die Kapazitäten der Schöpfwerke nicht ausreichten. Entsprechend vielfältig waren die Folgen. Allein die Schäden in der Landwirtschaft Mecklenburg-Vorpommerns (M-V) beliefen sich nach Schätzungen des zuständigen Ministeriums bis Ende August auf ca. 380 Millionen EURO.

Die Niederschlagsmengen der Monate Juli und August waren vor allem auf eine Häufung regenreicher Einzelereignisse zurückzuführen. Tagessummen des Niederschlags größer als 17 mm pro Tag ( 33% des Monatsmittelwertes aller Monate, 1981-2010) wurden in beiden Monaten gleich 11 mal beobachtet. Hauptursache war die Dominanz zyklonaler Wetterlagen und der Wetterlage Trog über Mitteleuropa mit der Ausbildung kräftiger Bodentiefs, deren Einflussbereich weit nach Süden reichte. So wurden einige Bodentiefs nicht wie meist üblich mit ihren Fronten über dem nordostdeutschen Raum wetterwirksam, sondern unmittelbar mit ihrem Kern. Hinzu kam die sehr langsame Verlagerung der Tiefs „Otto“ und „Quentin“ um den 22. Juli bzw. 29. Juli herum, die lang anhaltende Niederschläge mit konvektiven Verstärkungen mit sich brachten.

Die detaillierten Analysen zeigen, dass unter den zahlreichen Einzelereignissen die Niederschläge um den 22. Juli und 29. Juli noch herausragen, die vor allem mit Zunahme der Dauer immer extremer geworden sind (siehe Abb. 1). Nach den Auswertungen von PEN-LAWA (2005) ordnen sich die größten 24-h-Summen jeweils in den Bereich des 1000-jährlichen 24-h-Niederschlags ein, d.h. gemessen an den statistischen Auswertungen des Zeitraums 1951 bis 2000 sind innerhalb von 10 Tagen gleich zwei 1000-jährliche Ereignisse aufgetreten. Die detaillierte Auswertung der Niederschlagsereignisse im Juli und August 2011, ebenso wie die statistische Analyse der Niederschlagssummen unterschiedlicher Dauer liefert eine ganze Reihe weiterer, interessanter Ergebnisse.

Aufschlussreich sind auch Ergebnisse hydrologischer Analysen, insbesondere zu den Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz. Die durchschnittliche Sickerwassermenge der 6 Lysimeter betrug vom 23. Juli bis 21. August 136,3 mm, ein für Sommermonate nahezu unglaublicher Wert, denn die seit 1972 bisher größte 30-Tage-Summe (96,9 mm) war wie fast

alle extremen Sickerwasserereignisse auf winterliche Abflussbildungsbedingungen zurückzuführen. Nicht zuletzt sind die in den Medien aufgeworfenen Fragen nach den Ursachen und dem möglichen Einfluss von Klimaänderungen Anlass für weiterführende Untersuchungen zur Überprüfung der Beobachtungsergebnisse der jüngeren Vergangenheit auf eine mögliche Zunahme von Starkniederschlägen. Erste Auswertungen zu kurzen Niederschlagsdauern  $D = 15$  min und 30 min mittels eines gleitenden Fensters der Länge 30 Jahre (Untersuchungszeitraum 1951 bis 2010) deuten darauf hin, dass die Anzahl der Überschreitungen der  $P(D, T = 0,5 \text{ a})$  in den letzten 15 Jahren deutlich zugenommen hat.

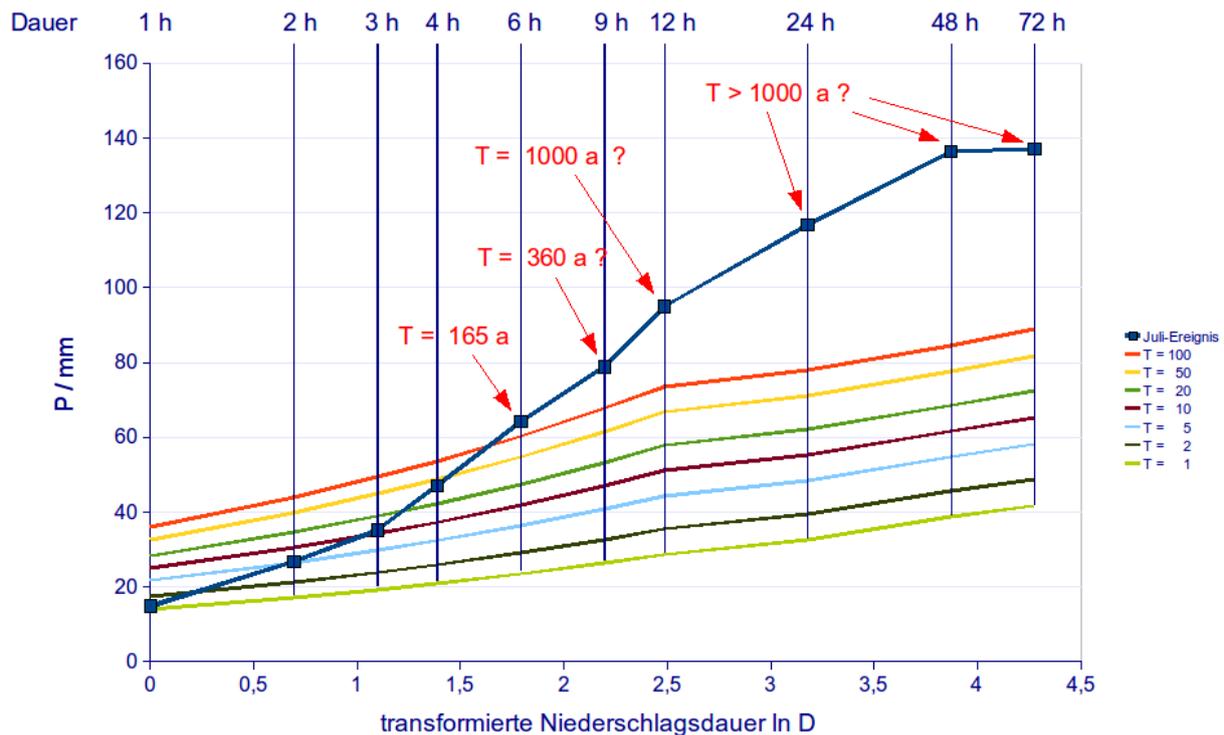


Abb. 1: Zunahme der Niederschlagssumme  $P$  mit der Regendauer  $D$  in Stunden während des Ereignisses um den 22. Juli 2012 im Vergleich zu den  $P(T, D)$  in Warnemünde nach KOSTRA-2000 (Autorenkollektiv, 2005), Zeitraum der statistischen Analyse 1951 bis 2000, Monate Januar bis Dezember,  $T$  = Wiederkehrintervall.

## Literatur

- Autorenkollektiv (2005): Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Selbstverlag, Offenbach am Main. Software/Vertrieb: itwh Hannover.
- Bartels, H., G. Malitz, S. Asmus, F. M. Albrecht, B. Dietzer, T. Günther, und H. Ertel (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland KOSTRA (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen). Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie, Selbstverlag, Offenbach am Main.
- PEN-LAWA (2005): Ergebnisse des Projektes PEN des Instituts der Wasserwirtschaft der Leibniz Universität im Auftrag der LAWA. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).

# **Evaluierung von meteorologischen Eingangsdaten für die lokale und großskalige hydrologische Modellierung von Moorstandorten**

Enrico Frahm<sup>1,2</sup>, Ullrich Dettmann<sup>1,2</sup>, Roland Fuß<sup>1,2</sup> und Annette Freibauer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, Deutschland

Die vorgestellte Untersuchung ist in das Verbundprojekt „Organische Böden“ eingegliedert ([www.organische-boeden.de](http://www.organische-boeden.de)). Das Projekt verfolgt das Ziel, die Klimaberichterstattung für die „Organischen Böden Deutschlands“ gemäß IPCC-Guidelines zu verbessern. Im Zentrum der Untersuchungen steht die Ermittlung standortbezogener Emissionsfaktoren für CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. Darauf aufbauend werden im Teilprojekt Hydrologie Modulansätze entwickelt, mit denen eine hydrologische Modellierung auf Einzugsgebietsebene bzw. eine großskalige Modellierung von Moorwasserständen durchgeführt werden kann.

In die zu erstellenden hydrologischen Modellen geht die Verdunstung als eine der wichtigsten Steuergrößen ein, was u.a. die Kenntnis der vorherrschenden meteorologischen Randbedingungen voraussetzt. An dieser Stelle werden für die lokalen Modelle Daten von meteorologischen Stationen verwendet, die direkt in den zu modellierenden Mooren installiert wurden. Dagegen wird in der großskaligen Modellierung auf Stations- bzw. Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen. Die DWD-Daten sind dadurch gekennzeichnet, dass diese zu einem Großteil nicht auf Moorstandorten gemessen bzw. hierfür generiert worden sind. So zeigt eine Gegenüberstellung der Lage von DWD-Stationen („KL-Stationen“), mit der Karte von organischen Böden (basierend auf der GÜK 200), dass sich lediglich 3.3 % der DWD Stationen auf Standorten mit Hochmoor, Niedermoor bzw. Anmoor befinden.

Daraus leitet sich die Arbeitshypothese für die vorgestellte Untersuchung ab. Es wird davon ausgegangen, dass die Verwendung der DWD-Daten für eine hydrologische Modellierung von Moorstandorten mit einem systematischen Fehler belegt ist. Diese Hypothese wird durch die moorspezifischen Eigenheiten des Standortklima im Vergleich zu mineralischen Standorten gestützt. So ist das Moorklima u.a. geprägt durch eine höhere Luftfeuchte, stärkere tägliche Temperaturschwankungen und einer höheren Nebelwahrscheinlichkeit.

Das Ziel der Untersuchung ist es, die zur Verfügung stehenden Raster- und Stationsdaten des DWD auf Ihre Anwendbarkeit zur Verdunstungsmodellierung auf Moorstandorten hin zu überprüfen und Unsicherheiten zu quantifizieren. Als Grundlage hierfür dient ein Vergleich von meteorologischen Daten aus deutschlandweit 18 Mooren mit den jeweils umliegenden DWD-Stationen. In dieser Präsentation werden die ersten Ergebnisse des Datenvergleiches für zwei ausgewählte Moorstandorte vorgestellt, für ein teilweise landwirtschaftlich genutztes Hochmoor in Nordwestdeutschland („Ahlen-Falkenberger Moor“) und für ein intensiv genutztes Niedermoor in der Oberrheinischen Tiefebene („Graben-Neudorf“).

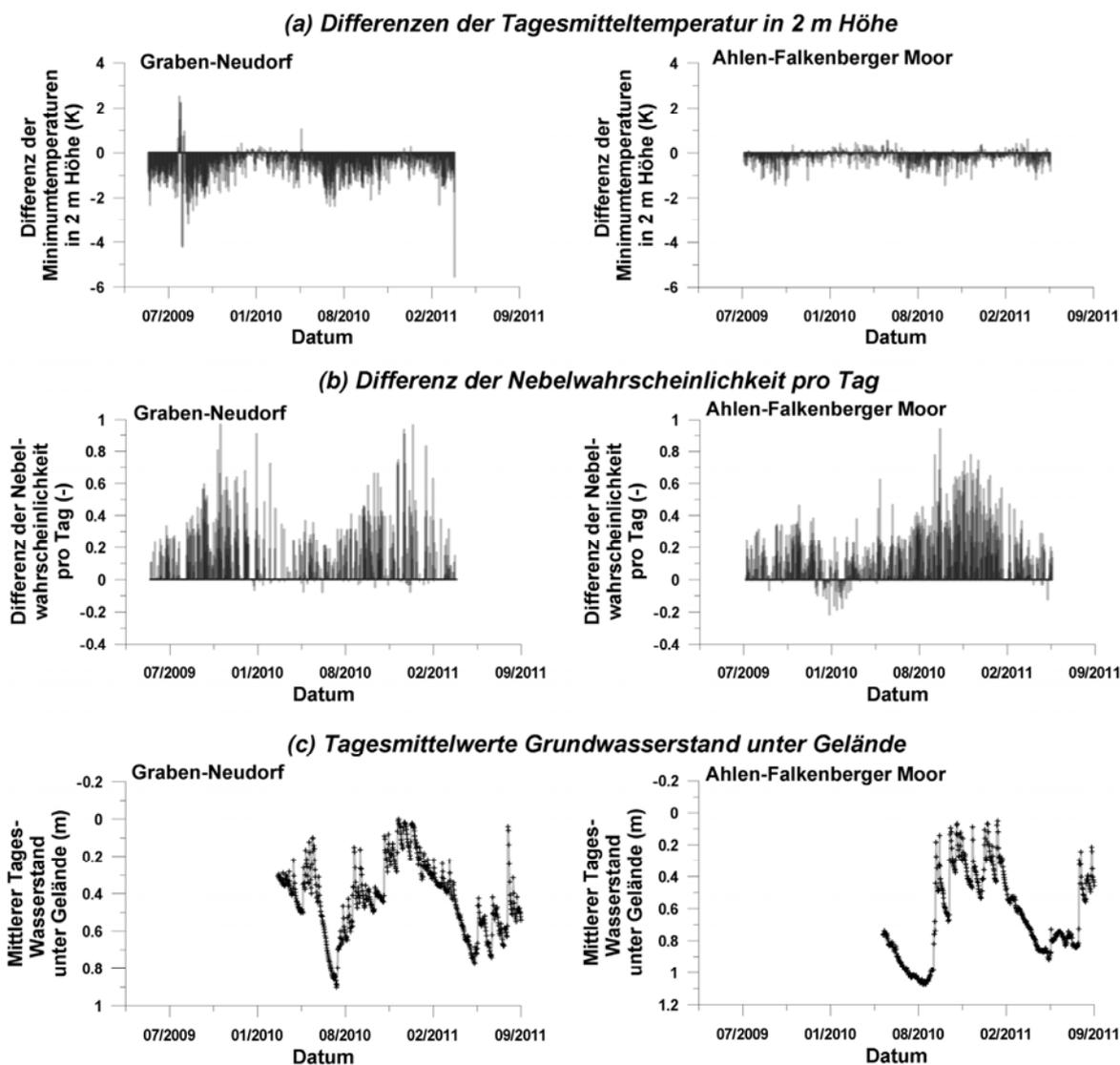


Abb. 1: (a) Differenz der Tagesmitteltemperaturen in 2 m Höhe zwischen Wetterstation im Moor und dem Mittel aus den umliegenden DWD-Stationen. (b) Differenz der Nebelwahrscheinlichkeiten pro Tag zwischen Wetterstation im Moor und dem Mittel aus den umliegenden DWD-Stationen. (c) Tagesmittelwerte des Grundwasserstandes an den beiden untersuchten Moorstandorten.

Für den Datenvergleich sind für jeden Moorstandort die jeweils umliegenden DWD-Stationen ausgewählt worden. Von diesen Stationen wurden dann stündliche Werte der Lufttemperatur in 2 m Höhe bzw. direkt über Gelände, der Luftfeuchte, des Sättigungsdefizites, des Taupunktes und die Nebelwahrscheinlichkeit verwendet bzw. berechnet. Die gemittelten Tageswerte der einzelnen Stationen wurden anschließend abstandsgewichtet zusammengefasst und mit den entsprechenden Daten der Moorwetterstationen verglichen. Für die Berechnung der Nebelwahrscheinlichkeit wurde die Differenz aus der Lufttemperatur in 2 m Höhe und der Taupunkttemperatur verwendet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass bei einer Differenz dieser Größen von  $< 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Nebel am größten ist.

Als Beispiel für die Ergebnisse ist in Abb. 1a die Differenz der Tagesmitteltemperaturen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Tageswerte der Moortemperaturen an beiden Standorten z.T. erheblich von den umliegenden DWD-Stationen abweichen. So sind an beiden Standorten nahezu über das ganze Jahr hinweg die Tagesmittel- und Minimumtemperaturen niedriger und die Tagesmaximumtemperaturen höher. Beispielsweise liegen die Tagesmitteltemperaturen im „Ahlen-Falkenberger Moor“ im Mittel 0.256 K signifikant unter den DWD-Werten (Standardabweichung = 0.298 K, n = 902), die am Standort „Graben-Neudorf“ sogar 0.711 K (Standardabweichung = 0.650 K, n = 699). Dieser Trend kann, in Verbindung mit den beobachteten größeren Tagesamplituden der Lufttemperatur und den festgestellten höheren Nebelwahrscheinlichkeiten (Abb. 1b), mit denen bei Eggelsmann (1990) oder auch bei Dierssen & Dierssen (2001) aufgeführten Besonderheiten des Moorklimas bestätigt werden.

Als weiterer Schritt gilt es nun, die Daten der verbleibenden Moorstandorte aufzuarbeiten und in Bezug zu Wasserständen, Nutzung und Moorbodendegradierungsstufe auszuwerten.

## **Literatur**

Dierssen, K. and Dierssen, B. (2001): Moore. Ulmer, Stuttgart, Stuttgart

Eggelsmann, E. (1990): Mikroklima der Moore. In Göttlich, K. (eds.), Moor- und Torfkunde. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

## **Aufbereitung und Verifizierung von regionalen Klimaprojektionsdaten für das Ressortforschungsprogramm KLIWAS**

Florian Imbery, Sabrina Plagemann und Joachim Namyslo

Deutscher Wetterdienst – Zentrales Klimabüro, Offenbach, Deutschland

Um mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft und Schifffahrt bewerten zu können, verfolgt das BMBVS-Ressortforschungsprogramm *KLIWAS* konsequent eine Modellkette mit Ensembleansatz. Das Projekt 1.02 stellt Wirkmodellierern verschiedener Fachrichtungen aufbereitete und korrigierte Klimaprojektionen zur Verfügung und quantifiziert Unsicherheiten insbesondere hydrometeorologisch relevanter Parameter. Datengrundlage ist ein Klimaprojektionsensemble von momentan ca. 35 Projektionen verschiedener Kombinationen aus Emissionsszenarien, Global- und Regionalmodellen, die zum größten Teil aus dem EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES (FP 6) stammen.

Um Klimaprojektionsdaten als Input für Wirkmodelle nutzen zu können, werden die Tageswerte der wichtigsten hydrometeorologischen Variablen auf ein einheitliches hochaufgelöstes 5-5 km<sup>2</sup>-Gitter für das *KLIWAS*-Zielgebiet regionalisiert. Hierfür wurden verschiedene statistische und deterministische Verfahren, die im DWD vorliegen, modifiziert bzw. neu entwickelt.

Zusätzlich müssen modellinterne Fehler (Bias) quantifiziert und korrigiert werden. Momentan werden Lufttemperatur und Globalstrahlung mit einem linearen Verfahren korrigiert. Auf die Niederschlagsdaten wird zusätzlich das Quantile Mapping Verfahren angewandt.

Die Ergebnisse aus unterschiedlichen Klimamodellrechnungen sind allerdings nach wie vor einzeln nicht vollends belastbar. Dies resultiert aus Unsicherheiten in

- den zugrundeliegenden Emissionsszenarien,
- den Start- und Randbedingungen der Modellläufe,
- der Modellparametrisierung,
- den zugrundeliegenden Beobachtungswerten,
- technischen Grenzen der Rechnerleistung und Speicherkapazität,
- der Kopplung verschiedener Modelle,
- dem Problem, dass es Prozesse und Kopplungen im Klimasystem gibt, die bis heute nicht vollständig verstanden sind bzw. nicht ausreichend gut in Modellen abgebildet werden können.

Mit einem ausreichend großen Ensemble aus Klimaprojektionen ist es allerdings möglich, statistische Aussagen über zukünftige Klimazustände zu treffen. Auf der Grundlage eines Ensembles aus 19 Klimaprojektionen, basierend auf dem A1B-Szenario, wurden für verschiedene Parameter und Indizes (z. B. Lufttemperatur, Niederschlag, Heiße Tage, Frosttage etc.) durch die Bestimmung von Perzentilen Bandbreiten möglicher zukünftiger Klimazustände berechnet. Innerhalb dieser kann ein bestimmtes Änderungssignal erwartet werden. Mit diesen Bandbreiten ist es möglich, robuste Aussagen zu Änderungskorridoren des zukünftigen Klimas abzuleiten.

Für die Auswertung des definierten Ensembles von Klimaprojektionen wurden die Änderungssignale für eine "nahe" (2021-2050) und eine "ferne" (2071-2100) Zukunft, jeweils relativ zu der Referenzperiode 1961 - 1990, analysiert.

Die projizierten relativen prozentualen Änderungen des mittleren Sommerniederschlags zeigen zum Beispiel für die nahe Zukunft eher keine oder eine nur leichte Abnahme bis maximal 10%. Mit Werten bis -20% kann im späten Zeitraum mit einer weiteren Abnahme der Sommerniederschläge gerechnet werden. Für die Änderung des mittleren Winterniederschlags wird demgegenüber eine Zunahme von 5 bis 10% (2021 bis 2050) bzw. auch über 10% (2071 bis 2100) projiziert.

# **Länderübergreifender Binnenhochwasserschutz – ein Leitprojekt für die Metropolregion Hamburg**

Dieter Ackermann, Hanke Lüdemann und Clemens Gantert  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Hamburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Stadt Hamburg wird von einigen Fließgewässern durchflossen, deren Quellen in Schleswig-Holstein liegen. Durch die Lage am Unterlauf dieser Gewässer kommt es in Hamburg zu Hochwasserproblemen, deren Ursachen zumeist im schleswig-holsteinischen Teil der Einzugsgebiete liegen.

Für das Einzugsgebiet der Brookwetterung, wurde 2003 von Hamburg und dem Landkreis Herzogtum Lauenburg ein Projekt initiiert, das die gemeinsame Lösung der Hochwasserproblematik zum Ziel hat. Das Projekt wurde bereits zu Beginn als Leitprojekt für die Metropolregion Hamburg ausgezeichnet und wird aus einem gemeinsamen Förderfonds von Hamburg und Schleswig-Holstein gefördert.

Das Einzugsgebiet der Brookwetterung hat eine Größe von ca. 30 qkm, davon liegen 92% in Schleswig-Holstein, die restlichen 8% in Hamburg. Das in Schleswig-Holstein anfallende Niederschlagswasser wird nur lokal zurückgehalten, die Notwendigkeit wurde bisher in der Bauleitplanung nicht berücksichtigt. In Kombination mit den Geländebeziehungen entstehen hohe Fließgeschwindigkeiten mit Erosion im Oberlauf und erheblicher Sedimentation im Unterlauf der Gewässer. Die dadurch verengten Fließquerschnitte und hohe Abflussmengen führen hier oft zu Überschwemmungen.

Als Grundlage für ein Maßnahmenkonzept wurde eine Bestandsaufnahme für das Einzugsgebiet erstellt, die Vorschläge für Maßnahmen des Hochwasserrückhaltes und zur Reduzierung der Sedimentfrachten enthielt. Seit 2004 wurden zahlreiche der vorgeschlagenen Maßnahmen umgesetzt, weitere befinden sich in der Umsetzung. Die naturnahe Umgestaltung der Brookwetterung soll das Projekt 2013 abschließen.

Im Herbst 2010 diskutierten über 50 Teilnehmer aus der Region über die Ergebnisse. Deutlich wurde, dass das Projekt die Kommunikation zwischen den Akteuren verbessert hat. Als schwierig wird angesehen, dass unterschiedliche, länderspezifische Ansätze bei Gewässerplanung und -unterhaltung bestehen. Die Teilnehmer entwarfen Grundsätze einer länderübergreifenden Bewirtschaftung Gewässersystems. Diese reichen von der Einrichtung eines "Planungsrates", dem Aufstellen eines länderübergreifenden Hochwasserrisikoplanes, gemeinsamen Gewässerschauen bis zur Entwicklung von gemeinsamen Standards bei Gewässerplanung und -unterhaltung. Insgesamt wird das Projekt als erfolgreich angesehen und die gemachten Erfahrungen sollen auf andere Einzugsgebiete in der Metropolregion Hamburg angewendet werden.

# AMICE: erste internationale Modellrechnung der Maas

Bernhard P. J. Becker<sup>1</sup>, Simone Patzke<sup>1</sup>, Sylvain Detrembleur<sup>2</sup>, Benjamin Dewals<sup>2</sup>,  
Matthias Kufeld<sup>3</sup>, Stoffel Moeskops<sup>4</sup>, Otto de Keizer<sup>1</sup>, Maïté Fournier<sup>5</sup>, Wouter Vanneuville<sup>6</sup>,  
Hendrik Buiteveld<sup>7</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>3</sup>, Michel Pirotton<sup>2</sup> und Paolo Reggiani<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup> Deltares, Delft, Niederlande

<sup>2</sup> Université de Liège, Hydraulics in environmental and civil engineering, Belgien

<sup>3</sup> Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Techn. Hochschule (RWTH) Aachen, Deutschland

<sup>4</sup> International Marine & Dredging Consultants (IMDC), Antwerpen, Belgien

<sup>5</sup> Etablissement Public d'Aménagement de la Meuse et de ses Affluents (EPAMA), Charleville-Mezieres, Frankreich

<sup>6</sup> Flanders Hydraulics Research, Antwerpen, Belgien

<sup>7</sup> Rijkswaterstaat, Lelystad, Niederlande

<sup>8</sup> Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie, RWTH Aachen, Deutschland

## Einleitung

Ein Ziel des Projektes AMICE (Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions) ist es, für die im Einzugsgebiet der Maas liegenden Länder Frankreich, Deutschland, Belgien und die Niederlande den Einfluss des Klimawandels auf die Hochwassergefährdung über die Landesgrenzen hinaus einheitlich zu erfassen. Ein wesentliches Instrument dazu sind hydraulische Modelle für Flussabschnitte der Maas. Jeder Anrainerstaat hat ein oder mehrere hydraulische Modelle für den in seinem Hoheitsgebiet liegenden Teil der Maas. Die verschiedenen Modelle basieren jedoch auf jeweils unterschiedlichen Programmpaketen und weisen jeweils unterschiedliche Dimensionalität, Modellansätze und räumlichen Auflösungen auf.

## Szenarien

Für AMICE wurden drei Szenarien anhand von Maximaldurchflüssen definiert. Das Basisszenario beschreibt eine Durchflusssituation mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren ( $Q_{100}$ ). Das  $Q_{100}$  ist in allen Anrainerstaaten der Maas ein wichtiger Bemessungswert. Ausgehend davon ergeben sich zwei mögliche Klimawandel-Szenarien unter der einfachen Annahme, dass der dem Wiederkehrintervall von 100 Jahren zugeordnete Durchfluss sich im Lauf des gegenwärtigen Jahrhunderts um 15 beziehungsweise 30 Prozent erhöht.

## Randabgleich

An einer gemeinsamen Modellgrenze wird im Modell des Oberliegers eine Wasserstandsrandbedingung angesetzt. Das korrespondierende Modellergebnis ist eine Durchflusskurve. Das Unterliegermodell erhält dagegen eine Durchflussrandbedingung und berechnet den dazugehörigen Wasserstand. Für eine konsistente hydraulische Modellrechnung des gesamten Flusslaufs der Maas mit den nationalen Teilmodellen müssen die Randbedingungen so aufeinander abgestimmt werden, dass Durchfluss und Wasserstand an den Modellgrenzen (Landesgrenzen) ausreichend genau übereinstimmen. Ausgangspunkt für diesen sogenannten Randabgleich sind die mit der Szenariendefinition gegebenen Spitzendurchflüsse. Für die instationären Modelle wird daraus eine Standard-Hochwasserwelle abgeleitet (siehe z. B. Becker et al. 2011). Mit der entsprechenden Schlüsselkurve stehen damit auch die Wasserstände zur Verfügung, die als untere Randbedingung des Oberliegermodells benötigt werden. Während der erste Rechenlauf an den Modellgrenzen noch inkon-

sistente Ergebnisse lieferte, konnten die Modellergebnisse nach Anpassung der Schlüsselkurven schon in der zweiten Simulationsrunde in ausreichende Übereinstimmung gebracht werden (Detrembleur et al. 2011).

### **Ergebnisse der grenzüberschreitenden Modellrechnung**

Zunächst trägt die zusammenhängende Darstellung von Spitzendurchflüssen für den gesamten Flusslauf der Maas bei den Projektbeteiligten zur Verbesserung des Systemverständnisses bei. So spielen in Frankreich die Nebenflüsse eine größere Rolle bei der Abflussbildung als beispielsweise in der Grenzregion zwischen Flandern und den Niederlanden. Im durch steile Felshänge geprägten Flusslauf im wallonischen Teil Belgiens wird eine Hochwasserwelle kaum gedämpft, in den Niederlanden dagegen zeigen sich sehr starke Dämpfungseffekte aufgrund der großen Speicherkapazität des Flachlandes. Die vergleichende Auswertung der Modellrechnungen zeigt, dass der Einfluss eines höheren Bemessungsdurchflusses auf die überflutete Fläche und die Überflutungstiefe in verschiedene Regionen sehr unterschiedlich ist. So wirkt sich im engen Mittellauf der Maas ein höherer Durchfluss zweimal stärker auf die Wassertiefe aus als im durch weite Vorlandbereiche geprägten Ober- und Unterlauf (Detrembleur et al. 2011). Am Beispiel der Überflutungskarte für die Region Lüttich wird die Auswirkung einer Durchflusserhöhung beispielhaft deutlich: Gegenwärtig ist das Ausmaß der Überschwemmung bei einem Durchfluss mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren sehr überschaubar. Schon bei einer Erhöhung des Bemessungsdurchflusses um 15 % vergrößert sich die Überflutungsfläche. Bei einer Erhöhung des  $Q_{100}$  um 30 % ist mit einer signifikanten Erhöhung der Überflutungsfläche zu rechnen.

### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Im Rahmen des AMICE-Projektes wurde die erste zusammenhängende hydraulische Modellrechnung der Maas durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt für einige Bereiche entlang der Maas auf, dass noch Anpassungsbedarf an die zu erwartenden größeren Bemessungswerte besteht. Die Simulationsergebnisse werden deshalb im weiteren Verlauf des Projektes zur Schadensberechnung im Rahmen einer Risikobetrachtung und zur Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserschadenspotentials herangezogen. Darüber hinaus hat die internationale Modellrechnung bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zum Wissensaustausch über die Landesgrenzen hinweg geleistet. Ein Beispiel ist die Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden zur Erstellung von synthetischen Bemessungsdurchflusskurven, die in den Niederlanden, im wallonischen und im flämischen Teil Belgiens angewendet werden (Dewals et al. 2012).

### **Literatur**

- Becker B.; Sprengers C.; Ochterbeck T. (2011): AMICE: Action 6. Hydraulic Sobek-model for the Dutch part of the Meuse. Deltares: Delft. Memo Nr. 1201007-000-ZWS-0014.
- Detrembleur S., Dewals B., Fournier M., Becker B., Guilmin E., Moeskops S., Kufeld M., Archambeau P., de Keizer O., Pontegnie D., Huber N.P., Vanneville W., Buiteveld H., Schüttrumpf H. und Piroton M. (2011): Effects of climate change on river Meuse / Hydraulic modelling from spring to mouth. WP1 report - Action 6. Eine Zusammenfassung des Berichts ist abrufbar unter [http://www.amice-project.eu/docs/pa1\\_pr4\\_1326132512\\_Summary\\_WP1\\_Action6\\_VF\\_en.pdf](http://www.amice-project.eu/docs/pa1_pr4_1326132512_Summary_WP1_Action6_VF_en.pdf).
- Dewals B., Detrembleur S., Becker, B., Moeskops S., Ercicum S., de Keizer O., Vanneville W., Buiteveld H., Piroton M., Archambeau P. (2012): Transboundary assessment of the effect of climate change on river Meuse: flood wave selection for hydraulic modelling from Ampsin (B) to Maaseik (NL). Beitrag Nr. 42621, 2nd IAHR Europe Congress, München, 27.-29. Juni 2012.

# Hochwasservorhersage mit Delft-FEWS in Kopplung mit dem N-A-Modell NASIM

O. Buchholz<sup>1</sup>, D. Schwanenberg<sup>2</sup> und B. Sommer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen, Deutschland

<sup>2</sup>Deltares, Abt. Operational Water Management, Delft, The Netherlands

Operationell betriebene Hochwasservorhersagesysteme leisten einen wirkungsvollen Beitrag zur Verminderung von Hochwasserschäden. Meist handelt es sich um spezifisch entwickelte Anwendungen, die auf bestimmte Orte, Regionen oder Betreiber und deren Erfordernisse zugeschnitten sind. Dies hat dazu geführt, dass z. B. an großen Flusssystemen verschiedene Organisationen auf unterschiedliche Art und Weise Hochwasservorhersage- und -frühwarnung durchführen. Aufgrund der Diversität der Systeme bestehen kaum Synergien zwischen ihnen, eine effiziente Zusammenführung mehrerer Systeme oder die Übertragung eines Systems auf ein anderes Gewässer ist nur mit hohem Aufwand möglich.

## Delft-FEWS in Kürze

Mit Delft-FEWS (Flood-Early-Warning-System) hat das Institut Deltares ein generisch anwendbares Vorhersagesystem entwickelt, das flexibel skalierbar sowohl für kleine, regionale Bereiche als auch für große flussgebietsübergreifende Gebiete einsetzbar ist.

Delft-FEWS ermöglicht die Integration unterschiedlicher Datenquellen und Modelle. Die qualitativ hochwertigen Vorhersagen unterliegen einer konsistenten Gütekontrolle und lassen sich nachträglich reproduzieren.

## Trennung der operationellen Hochwasservorhersage vom Modell

Bestehende Vorhersagesysteme sind meist auf Basis eines bestimmten Simulationsmodells entwickelt worden. Der hydrologische Rechenlauf ist häufig mit den spezifischen Schritten der Vorhersage verzahnt. Delft-FEWS sieht dagegen eine Trennung des operationellen Overheads vom eigentlichen Modell vor. Es verfügt über eine offene, konfigurierbare Modellschnittstelle, die den Einsatz der vollen Bandbreite der in der Wasserwirtschaft vorhandenen Modelle ermöglicht.

Die Durchführung einer Vorhersage kann durch diese Entkopplung standardisiert werden, sodass sie nicht von der spezifischen Modellkenntnis eines Anwenders abhängt. Vorkonfigurierte, wiederkehrende Hauptarbeitsschritte ermöglichen es dem Anwender, sich auf die Erstellung belastbarer Vorhersagen zu konzentrieren.

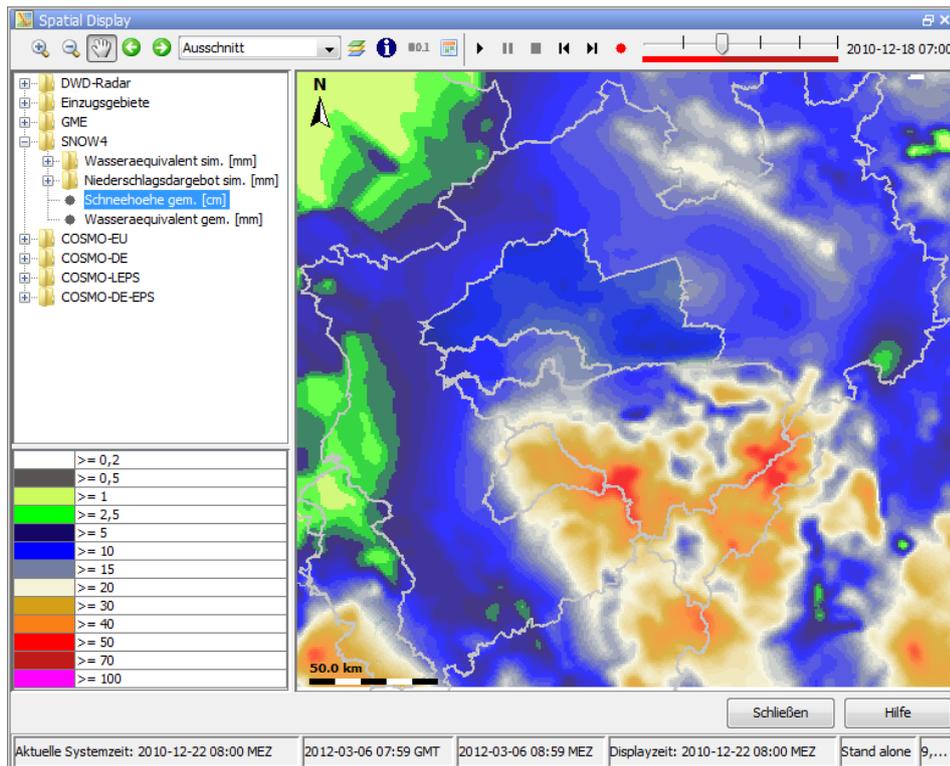


Abb. 1: Gemessene Schneehöhe [cm] des DWD SNOW4 Produkts vom 22.12.2010 in NRW

## Kopplung mit NASIM

In Kooperation zwischen Deltares und Hydrotec wurde eine Kopplung von Delft-FEWS mit dem N-A-Modell NASIM realisiert. Ein dazu entwickeltes Adapter übergibt die für die Simulation benötigten, aufbereiteten Niederschlags- und Klimadaten sowie die Modellanfangszustände an NASIM, initiiert die Berechnung und gibt die Modellergebnisse und Endzustände an das Vorhersagesystem weiter.

## Projekte

Aus der Kopplung von Delft-FEWS mit NASIM ist eine Reihe von Anwendungen entstanden, wie das Vorhersagesystem für die Stepenitz in Brandenburg, im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Brandenburg, das Vorhersagesystem für die obere Lippe, im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, NRW sowie die Vorhersageplattform Verbände NRW im Auftrag von fünf nordrhein-westfälischen Wasserverbänden (Buchholz et al. 2011).

## Literatur

Buchholz, O., D. Schwanenberg, B. Sommer, (2011): Anforderungen an Hochwasservorhersagesysteme. Erfahrungen mit dem Softwaresystem DELFT-FEWS. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (2011), Nr. 10, S. 564 - 568

# **Kopplung hydrologischer und hydrodynamischer Modelle zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten**

Alpaslan Yörük und Lisa Friedeheim

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen, Deutschland

## **Einleitung**

Im Rahmen des EU-INTERREG III B Projekts SAFER wurden Hochwassergefahrenkarten (HWGK) für das Einzugsgebiet des Neckars erstellt.

Dies war Teil der Entwicklung von Hochwassergefahrenkarten für alle relevanten Gewässer bzw. Gewässerabschnitte des Landes Baden-Württemberg im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts der Landesverwaltung mit den kommunalen Spitzenverbänden.

Die HWGK basieren auf hydrologischen und hydrodynamisch-numerischen bzw. hydraulischen Berechnungen an den betroffenen Gewässern.

## **Gebietskomplexität**

Besondere modelltechnische Herausforderungen bestehen in der Größe des Modellgebietes mit ca. 400 km modellierter Gewässerlänge, der heterogenen Gebietstopografie mit einem Kerbtal im Kopfgebiet bis hin zum Flachland in der Rheinebene und Gewässern in Hanglage sowie in der uneinheitlichen Datengrundlage bezüglich der hydrologischen Modellierung.

## **Hydraulische und hydrologische Modelle**

Für die hydraulische Modellierung kommen ein 1D-Modell mit stationären Randbedingungen sowie ein 2D-hydrodynamisch-numerisches Modell zum Einsatz. Aufgrund der komplexen Gebietstopografie war für ca. 280 km Gewässerlänge eine 2D-Modellierung erforderlich.

Das 1D-Modell rechnet mit stationären Durchflüssen, während bei der 2D-Modellierung bei Bedarf auch instationäre Durchflüsse angesetzt werden. Dies ist z. B. im Flachland oder bei Gewässern in Hanglagen der Fall, wenn stationäre Fließzustände zu einer deutlichen Überschätzung der Überflutungsflächen führen.

Im Untersuchungsgebiet liegen in den Kopfgebieten Regionalisierungswerte als hydrologische Bemessungsgrößen aus vergangenen Untersuchungen vor, aus denen hydrologische Längsschnitte abgeleitet werden. Insbesondere im Flachland hingegen fehlen Angaben zur Hydrologie. Diese werden durch eine hydrologische Modellierung ermittelt. Infolge der teilweise lückenhaften Grundlagendaten erfolgt die Kalibrierung bzw. Validierung des N-A-Modells an Regionalisierungsknoten die tendenziell im Kopfgebiet zur Verfügung stehen.

## Kopplung des N-A-Modells mit dem 2D-Modell

Während stationäre Zustände durch hydrologische Längsschnitte eindeutig in 1D- und 2D-Modelle übernommen werden können, erfolgt für instationäre Zustände in komplexen Modellabschnitten eine Kopplung des N-A-Modells mit dem 2D-Modell. Im Flachland wird das N-A-Modell zur Modellierung der Abflussbildung sowie der Abflusskonzentration genutzt.

Die Abbildung des Abflussroutings im hydrologischen Modell durch hydrologische Verfahren (beispielsweise nach Kalinin-Miljukov- oder Muskingum) stößt zudem in solchen Gebieten an seine Grenzen.

Zur Verbesserung der Prozessabbildung sowie zur erleichterten Handhabung der zahlreichen Übergabepunkte vom N-A-Modell in das 2D-Modell wurden beide Modelle softwaretechnisch miteinander gekoppelt.

Dadurch erfolgt die Abbildung des Abflusstransportprozesses im 2D-Modell und die Zuweisung der Zuflussrandbedingungen automatisiert. Ein Informationsfluss vom 2D-Modell zurück in das N-A-Modell ist nicht gegeben. (offline-Kopplung).

## Betrachtung besonders gefährdeter Gebiete

In Einzelfällen bedarf es im Rahmen von Sonderuntersuchungen der Abbildung des Abflusskonzentrationsprozesses in besonders gefährdeten Gebieten durch das 2D-Modell. Hierzu werden die Ergebnisse des hydrologischen Modells (Abflussbildung) dem 2D-Modell übergeben, indem der Effektivniederschlag zeitabhängig und flächengenau als Randbedingung definiert wird. Versickerungsprozesse in definierten Teilgebieten wurden gleichermaßen berücksichtigt, indem die Infiltration zeit- und raumabhängig als Senkterm definiert wurde.

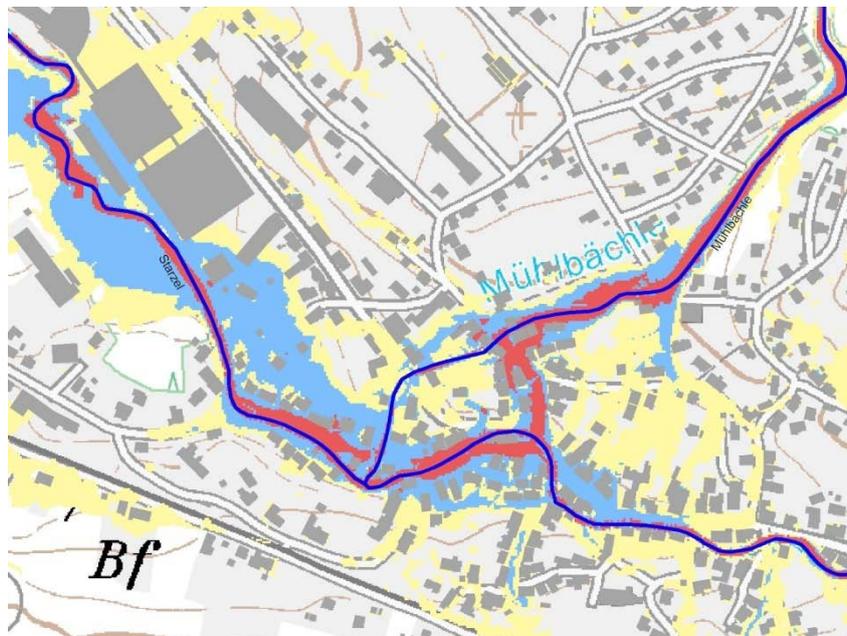


Abb.1: Gefahrenzonen (3 Klassen) auf Basis der Simulation des Abflusskonzentrationsprozesses im 2D-Modell

# **Hydrologische und hydraulische Ergebnisse eines integrierten Modellierungsansatzes in einem mesoskaligen chinesischen Einzugsgebiet**

Britta Schmalz, Alexander Strehmel, Song Song, Mathias Kuemmerlen, Qinghua Cai, Sonja Jähning  
und Nicola Fohrer

Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Einzugsgebieteigenschaften, Gerinneprozesse und ihre Auswirkung auf aquatische Organismen sind eng verknüpft. Zur Abschätzung von treibenden Kräften, Belastungen auf ein System, dem Zustand eines Habitats und Auswirkungen von Klima- oder Landnutzungsänderungen auf ein Habitat werden DPSI-Systeme (Driver-Pressure-State-Impact) zur Hilfe genommen. Das Ziel unseres DFG-/NSFC-Projektes ist die Entwicklung eines integrierten Modellansatzes zur Darstellung der Auswirkung von Umweltänderungen auf aquatische Ökosysteme am Einzugsgebiet des Changjiang im Poyang-Gebiet in China.

Wir erstellen ein dynamisches DPSI-System und integrieren dazu die Modelle SWAT (Einzugsgebietsprozesse), HECRAS (Gerinneprozesse) und BIOMOD (biologische Reaktionen). Mit SWAT wird der Landschaftswasser- und -stoffhaushalt des gesamten Einzugsgebietes abgebildet. Die SWAT-Ergebnisse wie Abfluss- und Sedimentzeitreihen werden an das hydraulische Modell HECRAS übergeben. Mit HECRAS werden Gerinneparameter wie Fließgeschwindigkeit, Wasserstände, Sohlschubspannung usw. für Querschnitte an ausgewählten Flussabschnitten berechnet. Beide Modelle wiederum übergeben ihre Ergebnisse an das Arealmodell BIOMOD, mit dessen Hilfe die Habitatfunktionen für jede der ausgewählten Arten (benthische Makroinvertebraten) berechnet werden.

Das entwickelte Konzept, das Vorgehen in den Mess- und Geländekampagnen und die ersten Schritte und Ergebnisse der ökohydrologischen und hydraulischen Modellierung werden präsentiert.

# **Konzept einer hydrologischen Systemanalyse als Grundlage eines nachhaltigen Wassermanagements kleiner Einzugsgebiete im Klimawandel**

Steven Boettcher, Christoph Merz und Ralf Dannowski

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg, Deutschland

Der Landschaftswasserhaushalt jungpleistozäner Einzugsgebiete Nordostdeutschlands hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend verändert. Intensive und strukturell veränderte Nutzung durch den Menschen und klimatische Veränderungen, damit verringerte Grundwasserneubildung, zählen zu den Hauptgründen für die überwiegend sinkenden Grundwasserstände in dieser Region. Insbesondere kleine Einzugsgebiete sind von diesen Entwicklungen deutlich betroffen, da hier bereits kleine Änderungen in der Wasserbilanz große Auswirkungen auf das Wasserdargebot haben. Klimaprojektionen der nächsten Jahrzehnte lassen weitere negative Folgen für den Landschaftswasserhaushalt wie z.B. erhöhte Evapotranspiration oder längere sommerliche Trockenphasen, aber auch steigendem Trinkwasser- und Bewässerungsbedarf vermuten. Die bisherigen Wassermanagementkonzepte kleiner Einzugsgebiete sind nicht an diese Entwicklungen angepasst. Es müssen neue, integrative Ansätze im Umgang mit der Ressource Wasser gefunden werden, welche eine Verstärkung der teilweise schon vorhandenen Nutzungskonflikte mildern bzw. vermeiden und stabilisierende Maßnahmen in Niedrig- und Hochwassersituationen bereitstellen können.

Dieser Beitrag stellt das Konzept einer hydrologischen Systemanalyse eines kleinen Einzugsgebiets in der jungpleistozänen Landschaft Norddeutschlands am Beispiel des Fredersdorfer Mühlenfließes vor. Seit den 1980er Jahren werden in diesem im nordöstlichen Berliner Umland gelegenen Fluss sinkende Abflüsse und wiederholt abflusslose Perioden beobachtet. Die Untersuchungen finden im Rahmen des Projektverbunds INKA BB (Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin) statt.

Ein hydrologisches Monitoring dient als Grundlage für Datenanalysemethoden der multivariaten Statistik (u.a. Hauptkomponentenanalyse). Die Analysen zielen auf die Identifikation dominierender hydrologischer Einzelprozesse und ihrer Gewichtung ab. Die erarbeiteten Prozesserkennnisse fließen in den Aufbau eines numerischen Grundwassermodells ein. Die Arbeiten dienen als Grundlage zur Beurteilung der Effektivität von möglichen Maßnahmen der Abflussstabilisierung als Teil eines nachhaltigen Wassermanagementkonzepts für dieses Einzugsgebiet.

# **Analyse der Bandbreiten von Modellketten am Beispiel von Klimaprojektionsstudien auf den Wasserhaushalt in einem Teileinzugsgebiet der Spree**

Anne Gädeke<sup>1</sup>, Herwig Hölzel<sup>1</sup>, Hagen Koch<sup>2</sup> und Uwe Grünewald<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserressourcenwirtschaft, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Deutschland

<sup>2</sup> Forschungsbereich II – Klimawirkung und Vulnerabilität, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung,  
Potsdam, Deutschland

## **Einleitung**

Für die Entwicklung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf der Einzugsgebietsebene müssen mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Gebietswasserhaushalt abgeschätzt werden. Hierfür werden in der Regel Modellketten (globales Emissionsszenario → globales Klimamodell (GCM) → regionales Klimamodell (RCM) → hydrologisches Modell) genutzt, bei denen jedoch jedes Kettenglied mit Unsicherheiten behaftet ist, die sich auf die nachfolgenden Kettenglieder übertragen und so kumulieren. In dieser Studie werden die Bandbreiten, die sich aus der Anwendung von Modellketten ergeben mit dem Ziel analysiert, Möglichkeiten zur Reduzierung von Unsicherheiten aufzuzeigen.

## **Methode**

Die Wirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt wurden mit zwei konzeptionell unterschiedlichen hydrologischen Modellen (HBV-light, WaSiM-ETH) in einem Teileinzugsgebiet der Spree (Weißer Schöps, 135 km<sup>2</sup>) untersucht. Das Untersuchungsgebiet wurde aufgrund der geringen anthropogenen und bergbaulichen Beeinflussung ausgewählt, um die Kalibrierung und Validierung der Modelle zu ermöglichen. Aufgrund des geringen Rechenaufwandes wurde HBV-light im Hinblick auf drei verschiedene Zielfunktionen kalibriert. Die resultierenden vier Modellkonfigurationen (WaSiM-ETH: 1, HBV-light: 3) geben Einblicke in die aus der Modellparametrisierung resultierenden Unsicherheitsbänder. Die hydrologischen Modelle wurden mit den Ergebnissen vier verschiedener RCMs, (STAR, 10 Realisierungen; WETTREG, 10 Realisierungen; CLM, 2 Realisierungen, Bias-korrigiert und REMO, 1 Realisierung, Bias-korrigiert) angetrieben, welche auf dem GCM ECHAM5, Emissionsszenario A1B basieren. Um Unterschiede bei der hydrologischen Modellierung bezüglich der Regionalisierung der Klimaeingangsdaten zu vermeiden, wurde für die räumliche Interpolation jeweils das gleiche Inverse Distanzwichtung-Verfahren verwendet. Die Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten wird durch den Vergleich zwischen der Klimanormalperiode als Referenzzeitraum (1961-1990, Klimaeingangsdaten beruhen auf Messungen) und der Szenarioperiode (2031-2060, Klimaeingangsdaten beruhen auf den Ergebnissen der RCMs) analysiert.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die RCMs zeigen deutliche Unterschiede in der Niederschlagsentwicklung. Im langjährigen Mittel weisen die statistisch-basierten RCMs eine Abnahme der Niederschläge (STAR und WETTREG: -15 %) auf, wohingegen die dynamischen RCMs eine leichte Zunahme (REMO: +6 %, CCLM: +0,5 %) simulieren. Die Variabilität der Änderungen ist bei den Niederschlägen höher als bei der Temperatur, für die alle RCMs im Jahresmittel eine Zunahme um ca. 2 °C berechnen. Die Änderungen

von Niederschlag und Temperatur wirken sich erwartungsgemäß auf die simulierten Wasserbilanzen in der Szenarioperiode aus. Die potenzielle Verdunstung nimmt bei allen Modellketten zu, wobei die Zunahme unter Verwendung der statistischen RCMs stärker ausfällt (+18 %) als bei den dynamischen (+12 %). Dies kann unter anderem mit einer stärkeren Temperaturzunahme bei den statischen RCMs begründet werden. Aufgrund des stärkeren Niederschlagsrückganges der statischen RCMs kommt es zu einer leichten Abnahme der tatsächlichen Verdunstung (ETR) um etwa 2 %. Im Gegensatz dazu nimmt die ETR beim Antrieb mit den dynamischen RCMs um ca. 7 % zu, was sich mit den erhöhten Niederschlägen begründen lässt. Unabhängig von dem jeweiligen RCM berechnen die hydrologischen Modelle eine Abnahme der Abflüsse in der Szenarioperiode gegenüber dem Referenzzeitraum. Werden HBV-light und WaSiM-ETH von den statistischen RCMs angetrieben, fällt die Abnahme des Abflusses mit -56 % aufgrund deutlich geringerer Niederschläge stärker aus im Vergleich zum Antrieb mit den dynamischen Modellen, wo sich der Abfluss aufgrund einer höheren tatsächlichen Verdunstung bei leicht ansteigenden Niederschlägen um 10 % verringert. Dabei sind die Unterschiede zwischen den hydrologischen Modellen in der Szenarioperiode vernachlässigbar, was darauf hindeutet, dass die Wahl des RCM, insbesondere zwischen den statistischen und dynamischen RCMs, den größten Einfluss auf die Ergebnisse nimmt.

Die Analyse des langjährigen mittleren monatlichen Durchflusses am Pegel Särichen zeigt, dass aufgrund der größeren Anzahl an Realisierungen die Bandbreite auf Basis der STAR Daten am größten ist, gefolgt von WETTREG und den dynamischen Modellen. Werden die hydrologischen Modelle von den statistischen RCMs angetrieben, werden ganzjährig geringere Durchflüsse simuliert. Insbesondere in den bereits trockenen Sommermonaten nehmen sie um bis zu 50 % ab. Wie auch bei den Wasserhaushaltskomponenten unterscheiden sich die Durchflüsse deutlich, wenn die dynamischen RCMs verwendet werden, denn die Abnahme des Durchflusses fällt ganzjährig geringer aus. In den Frühlingsmonaten kommt es zu einer Erhöhung des Durchflusses, wohingegen sie im Sommer leicht zurückgehen. Die Bandbreiten lassen sich kaum durch die Wahl der RCMs und der hydrologischen Modelle reduzieren, führen jedoch teilweise zu gegensätzlichen Aussagen z. B. in Bezug auf den Niederschlag oder der Verdunstung. Bei den Durchflüssen unterscheiden sich die Ergebnisse zwar in absoluten Zahlen, der Trend stimmt jedoch zwischen den Modellkonfigurationen überein. Die hohen Bandbreiten bei den simulierten Durchflüssen auf Basis der statistischen RCMs können erheblich durch die Betrachtung der 25 %- und 75 %-Perzentile reduziert werden. Dabei wird deutlich, dass die Unterschiede sowohl zwischen den statistischen RCMs und den hydrologischen Modellen für diese Studie vernachlässigbar sind. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Bandbreiten in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten ausfallen. Die Abnahme des Durchflusses während der Sommermonate scheint daher im Vergleich zum Rest des Jahres mit weniger Unsicherheiten behaftet zu sein.

### **Schlussfolgerung**

Die Bandbreiten können vor allem auf Basis der statistischen RCMs im Nachhinein durch die Betrachtung des 25 %- und 75 %-Perzentil reduziert werden, ohne dass ein starker Informationsverlust auftritt. Die teilweise hohe Variabilität der Simulationsergebnisse am Ende der Modellkette kann die Ableitung von Anpassungsoptionen an den Klimawandel für die Akteure erschweren. In dieser Studie nimmt die Wahl des RCMs, insbesondere ob statistisch oder dynamisch, den größten Einfluss auf die Ergebnisse der hydrologischen Modellierungen. Der Charakter (konzeptionell, prozessbasiert) und die Parametrisierung der hydrologischen Modelle spielt dagegen eine untergeordnete Rolle. Die prozessbasierte Modellierung ist mit einem höheren Aufwand verbunden, die Ergebnisse sind jedoch physikalisch fundierter und damit von Veränderungen der Systemeigenschaften unabhängiger.

# **Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen – Ergebnisse modelltechnischer und hochwasserstatistischer Auswertungen**

Marlene Gelleszun<sup>1</sup>, Kristian Förster<sup>1</sup>, Gerhard Riedel<sup>1</sup>, Günter Meon<sup>1</sup> und Uwe Petry<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Braunschweig, Deutschland

<sup>2</sup> Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Hildesheim, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sind Bestandteil des Verbundforschungsvorhabens KliBiW (Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgen für das Binnenland), in dem mögliche Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen quantifiziert werden.

Das Forschungsvorhaben wird vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz gefördert und vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz koordiniert. Weitere Projektpartner im Vorhaben sind die Leibniz-Universität Hannover sowie die Harzwasserwerke GmbH.

Der Wasserhaushalt des ca. 15.000 km<sup>2</sup> großen Aller-Leine-Oker Einzugsgebietes wird mit rund 60.000 Hydrotopen, 154 Pegeln, 6 Talsperren und zahlreichen Bauwerken, wie Dükern, Überleitungen und Hochwasserrückhaltebecken mit dem deterministischen Modellsystem PANTA RHEI nachgebildet.

Das an der TU Braunschweig entwickelte Modellsystem wird derzeit für die Berechnung von Bemessungsabflüssen, für die Abflussvorhersage in Niedersachsen sowie für Klimawandel bezogene Untersuchungen eingesetzt (Riedel et al., 2011). In diesem Forschungsprojekt wird mit einem Zeitschritt von einer Stunde gerechnet, um neben dem Wasserhaushalt auch Hochwasserereignisse, insbesondere für kleine Teileinzugsgebiete, zeitlich hochaufgelöst abzubilden.

Flächendeckend wurden Pegel im gesamten Untersuchungsgebiet über einen Zeitraum von 30 Jahren kalibriert, validiert und ausgewertet. Durch Vergleich der Modellergebnisse aus der Gegenwart und den Zukunftsszenarien erfolgt die Analyse der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse. Zu Grunde gelegt wurde das Szenario A1B aus dem statistischen Modell WETTREG (Version 2006). Ausgewertet wurden die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 unter Berücksichtigung von jeweils 20 Realisationen.

Bei der hochwasserstatistischen Auswertung wurde ein Schwerpunkt auf die Saisonalität gelegt, um den Einfluss des Klimawandels auf die Häufigkeiten von Hochwasserereignissen innerhalb bestimmter Zeiträume zu bewerten. Es konnte eine Zunahme von Hochwasserereignissen geringer Jährlichkeiten aus den Szenarien ermittelt werden.

Anhand langjähriger Tagesmittelwerte, ausgewertet für die drei unterschiedlichen Zeiträume, zeigte sich an zahlreichen Pegeln eine deutliche Zunahme des mittleren Abflusses im Winter (vgl. Abb.1).

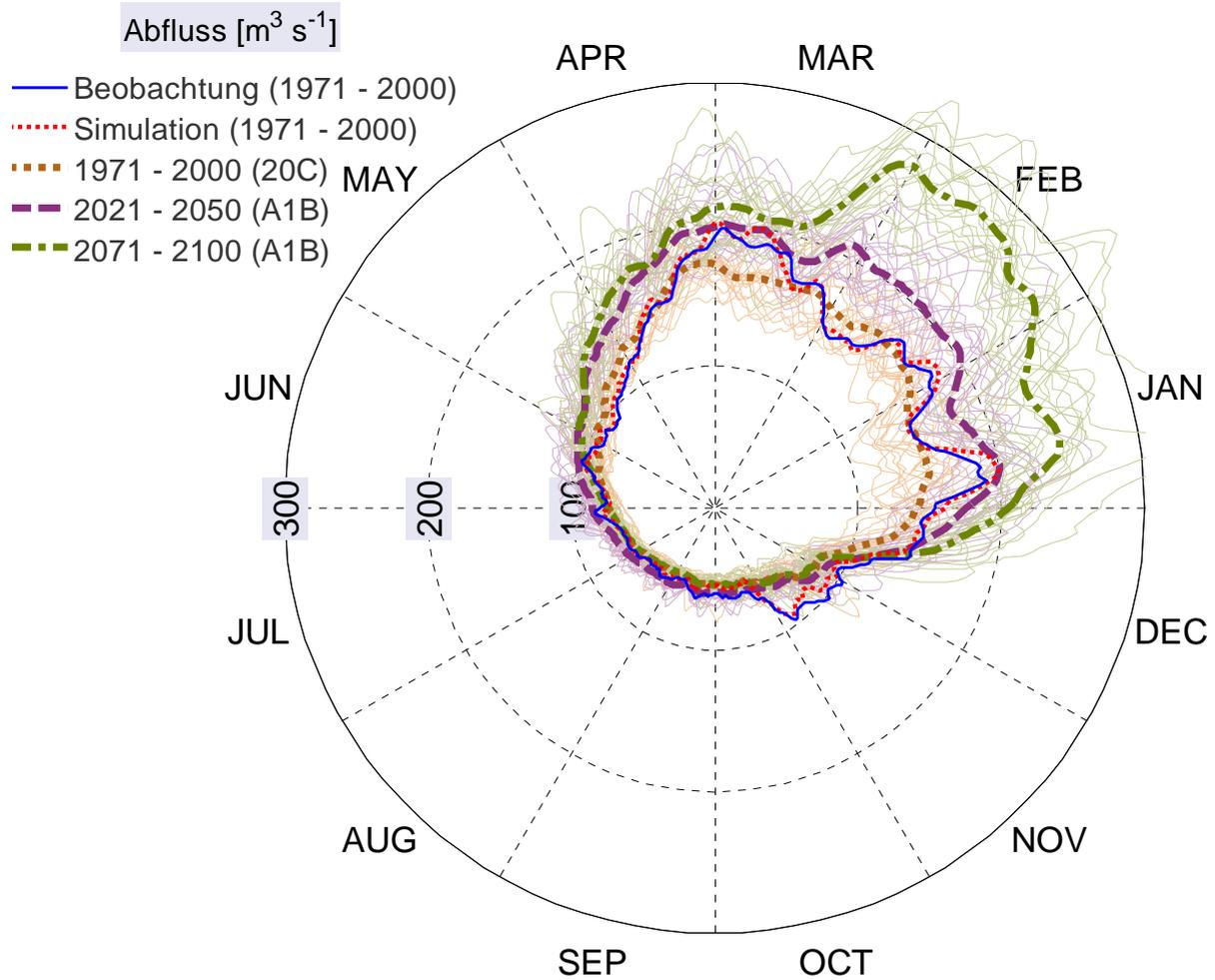


Abb. 1: Langjährige Tagesmittelwerte des Abflusses für die drei Zeiträume 1971-2000 (orange), 2021-2050 (violett) und 2071-2100 (grün) am Pegel Rethem (Aller), mit einer Einzugsgebietsgröße von 14.730 km<sup>2</sup>. Die feinen Linien stellen die Tagesmittelwerte über 30 Jahre für je eine der 20 WETTREG-Realisationen dar. Die fetten Linien repräsentieren für jeden der drei Zeiträume die Mittelwerte aus den 20 Realisationen. Die Tagesmittelwerte der Beobachtung über 30 Jahre (blau) decken sich sehr gut mit denen der Simulation auf Basis von beobachteten Klimadaten im gleichen Zeitraum (rot). Insbesondere in den Wintermonaten ergibt sich, basierend auf dem verwendeten Klimaszenario A1B, eine signifikante Zunahme der mittleren Abflüsse.

## Literatur

Riedel, G., K. Förster, G. Meon, S. Lange, T. Lichtenberg und M. Anhalt (2011): Panta Rhei – Modellsystem für Forschung und Praxis (Posterbeitrag), Tag der Hydrologie, Wien.

# **Wasserhaushaltsmodellierung der Lausitzer Neiße auf Basis von national unterschiedlichen Datengrundlagen**

Ina Pohle<sup>1</sup>, Hagen Koch<sup>2</sup> und Uwe Grünewald<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung, Brandenburgische Techn. Universität Cottbus, Deutschland

<sup>2</sup> Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Deutschland

## **Hintergrund und Zielstellung**

Das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße erstreckt sich über Teile der Tschechischen Republik, der Republik Polen und der Bundesrepublik Deutschland. Für ein Teilgebiet der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Zittau, welches im Wesentlichen tschechische und deutsche Gebietsanteile besitzt, wurde das ökohydrologische Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model (Krysanova, et al. 1998; 2000) aufgebaut und kalibriert. In diesen Ländern liegen die für die Wasserhaushaltsmodellierung notwendigen Gebietsdaten in sehr unterschiedlicher Qualität und Auflösung vor. Insbesondere trifft dies auf die Bodendaten zu. Für die deutschen und tschechischen Gebietsteile liegen sowohl die europaweit verfügbaren Karten von EUSIS vor, als auch nationale deutsche und tschechische Bodenkarten im Maßstab 1:1 000 000, welche den kleinen polnischen Gebietsanteil mit einschließen.

## **Modellkalibrierung auf Grundlage unterschiedlicher Diskretisierungen der Bodendaten**

Das Modell wurde auf Grundlage von Klimadaten, gemessenen Abflüssen, Topographie und Landnutzung aufgebaut, dabei wurden drei verschiedene Varianten der Bodendaten genutzt:

- A) Bodendaten aus EUSIS für das Gesamtgebiet
- B) Bodendaten aus EUSIS für Tschechien und deutsche Bodenkarte 1:1 000 000
- C) Tschechische und deutsche Bodenkarte 1:1 000 000.

Die Modellkalibrierung (1998, 2002 und 2003) und Validierung (2000 – 2002) erfolgte mit Variante A für alle Pegel. Dieses Modell wurde für Variante B übernommen, zur Verringerung des Volumenfehlers wurden bei Variante C die Korrekturfaktoren der potenziellen Verdunstung verringert und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei der Nachkalibrierung erhöht. Die Gütekriterien anhand der simulierten und gemessenen Abflüsse an den Pegeln sind für alle drei Varianten sowohl in der Kalibrierungs- als auch in der Validierungsperiode zufriedenstellend.

## **Ergebnisse und Ergebnisinterpretation**

Im Jahresmittel gibt es nur geringe Unterschiede in den Wasserhaushaltskomponenten (siehe Tab. 1.). Die in Variante C verringerte potenzielle Verdunstung ist durch geringere Verdunstungskorrektur zu erklären, wirkt sich aber ganzjährig nicht auf die aktuelle Verdunstung aus. Im Vergleich zu den Varianten A und B sinkt in Variante C der Abfluss zugunsten der Grundwasserneubildung. In der räumlichen Betrachtung der Abflussbildung (siehe Abb. 1) lassen sich insbesondere im östlichen,

tschechischen Gebietsteil deutliche Unterschiede erkennen: hier ist in den Varianten A und B, bei denen dieser Gebietsteil mit den Böden nach EUSIS angenommen wird, die Abflussbildung in der Flussebene größer als an den Gebietsrändern, in Variante C ist dies umgekehrt.

Tab. 1: Mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltskomponenten [mm] (1998 – 2003)

	Niederschlag	Potenzielle Verdunstung	Aktuelle Verdunstung	Abfluss	Grundwasserneubildung
A	949	866	542	390	193
B	949	866	541	391	194
C	949	798	547	386	204

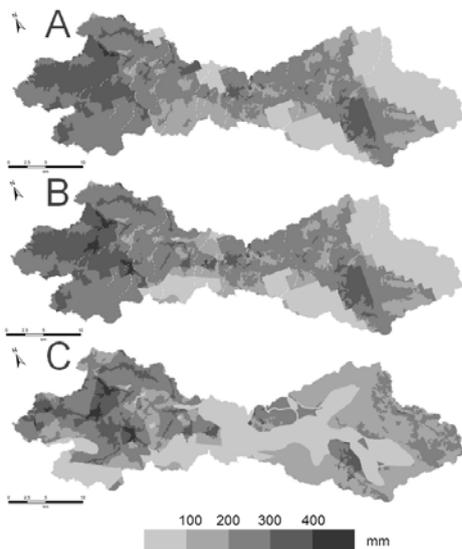


Abb. 1: Mittlere Jahressummen der Abflussbildung (1998 – 2003)

## Schlussfolgerung

Bei der Verwendung unterschiedlich diskretisierter Bodenkarten wurden durch unterschiedliche Werte der Korrekturfaktoren für die potenzielle Verdunstung und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit vergleichbar gute Gütekriterien an den Pegeln erreicht. Die Wasserhaushaltskomponenten werden räumlich deutlich unterschiedlich abgebildet, so dass man von einem Äquifinalitätsproblem ausgehen kann: gleichwertige Ergebnisse bei der Kalibrierung an den Pegeln werden durch unterschiedliche Prozessabbildungen erreicht. Für flächenhafte Betrachtungen, aber auch bei Fragestellungen, bei denen die genauen Prozessabbildungen von Bedeutung sind, wie beispielsweise in Szenariostudien zur Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen, ist es wichtig, die am besten aufgelöste Bodenkarte zu wählen und Vergleichskarten zu langjährigen Wasserhaushaltskomponenten heranzuziehen.

## Literatur

- Krysanova, V., D. I. Müller-Wohlfeil und A. Becker (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106:261-289.
- Krysanova, V., F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan und J. Williams (2000). SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual. PIK Report 69. Potsdam Institute for Climate Impact Research: 239.

# **Hydrologische und hydraulische Modellierung als erste Schritte in einem integrierten abiotisch-biotischem Modellkomplex zur Modellierung der Wirkungskette der Wasserrahmenrichtlinie**

Björn Guse, Dalibor Sulc und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Um das Ziel eines guten ökologischen Zustands der Gewässer gemäß der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) zu erreichen, ist es notwendig alle relevanten Prozesse auf Einzugsgebietsebene zu erfassen und das Zusammenspiel zwischen den hydrologischen Prozessen und dem Auftreten charakteristischer Zielarten der EG-WRRL zu quantifizieren. Das IMPACT-Projekt zielt daher darauf ab, die vollständige Wirkungskette der EG-WRRL von der hydrologischen und hydraulischen Modellierung bis zur Entwicklung von Habitatmodellen zu modellieren. Die Entwicklung und Anwendung erfolgt in drei Einzugsgebieten (Treene/Schleswig-Holstein, Célé/Frankreich, Quarteira/Portugal).

Dieser Beitrag präsentiert die hydrologische und hydraulische Modellierung im Treene-Einzugsgebiet als erste Schritte innerhalb des Modellverbunds. Hierzu erfolgt eine Modellierung der Wassermenge und Wasserqualität mit dem ökohydrologischen Modell SWAT. Die Wasserqualitätsmodellierung wird durch eine zweijährige Messkampagne unterstützt. Aufbauend auf der hydrologischen Modellierung erfolgte eine hydraulische Modellierung mit HEC RAS in einem 3 km-Abschnitt. Mit HEC RAS wurden die Wasserspiegellagen an ausgewählten Gewässerquerschnitten basierend auf verschiedenen hydrologischen Indices berechnet. Die ermittelten Wasserspiegellagen ermöglichen eine Anknüpfung an die hydro- und morphodynamischen Modellen der Projektpartner.

In zweiten Schritt werden dann Landnutzungs- und Klimawandelszenarien modelliert. Die Landnutzungsszenarien werden räumlich differenziert unter Berücksichtigung von verschiedenen Fruchtfolgen aufgestellt. Die Szenarien zielen darauf ab, den Einfluss einer Änderung auf der Einzugsgebietsebene auf das Auftreten der Zielarten mit Hilfe des Modellverbunds zu quantifizieren.

# **Strategien zur Abbildung diffuser Stoffquellen mit beschränkten Datenmengen für die räumlich verteilte ökohydrologische Modellierung in der West-Ukraine**

Filipa Tavares Wahren, Frederike Schumacher, Björn Helm, Andryi Mykhnovych,  
Qingfan Zhang, Thomas Pluntke, Kai Schwärzel und Karl-Heinz Feger

Institut für Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwasser als Folge unsachgemäßen Flächenmanagements ist an vielen Orten der Welt zu einem großen Problem geworden. Prognosen gehen davon aus, dass in vielen Ländern die Verdünnungs- und die Selbstreinigungspotentiale der Gewässer nicht ausreichen, um die zunehmenden Verunreinigungen zu puffern. Die Wasserqualität wird somit an vielen Stellen zum limitierenden Faktor eines nachhaltigen Wachstums werden. Deshalb ist die Entwicklung und erfolgreiche Umsetzung von angepassten Landnutzungsstrategien notwendig, um die Stoff- und vor allem Nährstoffausträge von Flächen in die Gewässer zu minimieren. Das Poster präsentiert Ergebnisse aus dem BMBF-Projektverbund IWAS (Internationale WasserforschungsAllianz Sachsen). Hauptziel dieser Untersuchung ist es, mittels räumlich verteilter Wasser- und Stoffhaushaltsmodellierung den Einfluss diffuser Stoffeinträge auf die Wasserqualität des Westlichen Bugs (Ukraine) abzuschätzen und zu bewerten. Für die Modellierung der Stoffeinträge in den Westlichen Bug wird das Modell SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al. 1999) eingesetzt. Dieses Modell berücksichtigt zum einen diffuse Stoffeinträge meist von landwirtschaftlich genutzten Flächen, zum anderen aber auch Punktquellen wie Klärwerksabläufe. Die Modellergebnisse aller Arbeitsgruppen des IWAS-Projektes werden zur integrierten Prozessbeschreibung der Hydrosphäre in einer Toolbox zusammengefasst und miteinander gekoppelt. Dabei fließen Resultate von Untersuchungen zu Klimafolgen bis hin zu Kanalisationsbewertungen mit ein. Die schlechte Datenlage im Einzugsgebiet erschwert die Modellierung aller Arbeitsgruppen. Deshalb zeigt diese Studie Konzepte zur Modellierung diffuser Stoffquellen mit einer beschränkten Datenmenge. Eine besondere Herausforderung war auch die Berücksichtigung vieler kleiner Punktquellen (meist Haushalte), von wo Abwässer ungeklärt in das Gewässersystem gelangen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen der Entwicklung von Handlungsoptionen dienen, mit denen diffuse Stoffeinträge durch ein angepasstes Landmanagement reduziert werden können.

## **Literatur**

Arnold J.G., J. R. Williams, R. Srinivasen, and K. W. King (1999): SWAT: Soil and Water Assessment Tool, Model Documentation. USDA: Texas.

# **Ökohydrologische Modellierung eines tidebeeinflussten Einzugsgebietes unter starker anthropogener Nutzung**

Malte Lorenz, T. T. Huyen Le und Günter Meon

Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des internationalen BMBF-Projektes: "Reinigung von Tapioka-Abwasser und nachhaltiges Gewässerschutzmanagement in der Hauptwirtschaftszone in Südvietnam" wird ein auf numerischen Modellen basierendes Expertensystem getestet und entwickelt. In dem Tay Ninh Einzugsgebiet (315 km<sup>2</sup>) sind zahlreiche industrielle Betriebe angesiedelt. Das Gebiet ist durch eine intensive landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet. Unter den industriellen Betrieben produzieren besonders die Tapioka-Firmen große Mengen an organisch belastetem Abwasser. Die Folge ist eine starke Belastung und Eutrophierung des Tay Ninh Flusses durch Nährstoffe und organische Stoffe. Die Landwirtschaft im Projektgebiet ist sehr bewässerungsintensiv. Das Bewässerungswasser wird über zwei Kanäle aus einem benachbarten Reservoir in das Einzugsgebiet transportiert. Besonders während der Niedrigwasserphase wird der Tay Ninh Fluss durch tidebedingte Rückstaueffekte beeinflusst, teilweise kommt es sogar zur vollständigen Fließumkehr. Über einen Zeitraum von einem Jahr wurde ein Monitoring des Wasserstandes und des Abflusses sowie der wichtigsten Gewässergüteparameter an verschiedenen Messstellen im Einzugsgebiet durchgeführt. Hydrologische Modelle alleine sind nicht in der Lage, tidebeeinflusste Rückstaueffekte und die damit verbundenen Einflüsse auf die Verweilzeiten der Nährstoffe im Fließgewässer abzubilden. Daher wurde ein gekoppeltes Modellsystem, bestehend aus dem ökohydrologischen Modell SWAT (Soil and Water Assessment Tool) und dem Hydraulikmodell HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) eingesetzt, um die Wasserbilanz und die Gewässergüte des Einzugsgebietes zu modellieren. Neben der Beeinflussung durch die Tide stellen besonders die geringe Datenverfügbarkeit und die unkontrollierten anthropogenen Eingriffe einen hohen Anspruch an die Modellierung dar. Die Ergebnisse zeigen eine gute Nachbildung der zeitlichen und räumlichen Dynamik der Abfluss- und Stofftransportprozesse. Anhand des Modellsystems kann die Effektivität von Maßnahmen zur Verbesserung der Wassermenge und der Gewässergüte bewertet und quantifiziert werden. Besonderer Fokus liegt hier auf der Auswirkung einer flächendeckenden Installation von Abwasserreinigungsanlagen und der zukünftigen Änderung der Landnutzung auf die Gewässergüte.

# Entwicklung einer gewässermorphologischen Methode zur Bewertung von Fließgewässern auf Teneriffa (Spanien)

Katharina Eller<sup>1</sup>, Volker Lüderitz<sup>2</sup>, Dorothea Gintz<sup>1</sup>, José Ramón Arévalo<sup>3</sup> und Robert Jüpner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland

<sup>2</sup> Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Hochschule Magdeburg-Stendal, Deutschland

<sup>3</sup> Departamento de Ecología, Facultad de Biología, Universidad La Laguna, Teneriffa, Spanien

## Zusammenfassung

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) verfolgt das Ziel, einen guten ökologischen Zustand aller Wasserkörper innerhalb Europas bis 2015 zu erreichen und dieser kann bei Fließgewässern besonders durch morphologische wie auch biologische Eigenschaften beschrieben werden. Bei intensiven Feldarbeiten an Fließgewässern auf Teneriffa wurden diese Eigenschaften ermittelt, um ein Referenzgewässer und eine Referenzbiozönose ermitteln zu können. Mit Hilfe dieser gewonnenen Daten wurde eine gewässermorphologische Bewertungsmethode entwickelt und zusammen mit einer biologischen Bewertungsmethode kann der ökologische Zustand weiterer Fließgewässer auf der Insel bewertet werden.

## Einleitung

Die gesammelten biologischen Daten sind im wesentlichen Abundanzen unterschiedlicher Makroinvertebraten, mit deren Hilfe eine Aussage über den aktuellen biologischen Zustand getroffen werden kann. Es ist davon auszugehen, dass der morphologische Zustand eines Gewässers den biologischen Zustand maßgeblich beeinflusst und dass eine Verbesserung der Morphologie im Allgemeinen auch zu einer Verbesserung der biologischen Eigenschaften führt.

## Methode

Als Referenzgewässer der Insel bezüglich der morphologischen Eigenschaften wurde der Barranco del Rio ermittelt. Der zur Bewertung anderer Gewässer entwickelte Kartierbogen umfasst im Wesentlichen die Einheiten des von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser entwickelten Bogens zur Gewässerstrukturgütekartierung (LAWA, 2000) und wurde unter anderem durch die Parameter Laufgabelung, Abstürze und Poolbildung an die Gegebenheiten der Fließgewässer auf Teneriffa angepasst.

Die Referenzbiozönose ist anhand von Beprobungen aus den Jahren 2009 bis 2011 ermittelt worden und das Bewertungsverfahren baut auf das Verfahren von Lüderitz et al. (2010) auf. Die folgenden 4 Module werden dabei ermittelt, um die gesammelten biologischen Daten bewerten zu können: Vielfalt, Natürlichkeit, Anzahl der endemischen Arten/Unterarten und Übereinstimmung mit der Referenzbiozönose.

Bei der gemeinsamen Bewertung der morphologischen und biologischen Daten werden diese jeweils gleich stark gewichtet und die Ergebnisse auf einer Skala von 1 (schlechter Zustand) bis 7 (sehr guter

Zustand) dargestellt. Der nach EU-WRRL geforderte ökologische Qualitätsquotient (EQR) wird ebenfalls ermittelt.

## Ergebnisse

Tab. 1: Ergebnisse der morphologischen und biologischen Bewertung der Fließgewässer auf Teneriffa

Gewässer	Ergebnis (Hydromorphologie)	Ergebnis (Biologie)	Gesamtergebnis	EQR	ökologischer Status
Barranco del Rio	7	6	7	1,00	sehr gut
Taganana (Fajaneta)	5	1	3	0,43	mäßig
Igüeste	5	5	5	0,71	gut
Masca	7	5	6	0,86	sehr gut
Afur	7	3	5	0,71	gut
Barranco del Infierno	6	7	7	0,86	sehr gut

Mit Hilfe der Methoden ist eine differenzierte Betrachtung des ökologischen Zustandes der Fließgewässer auf Teneriffa möglich. Es zeigt sich, dass fast alle Fließgewässer auf Teneriffa einen guten bzw. sehr guten Zustand aufweisen, lediglich ein Gewässer ist in einem mäßigen Zustand (Taganana).

## Schlussfolgerung

Die entwickelte Methode ermöglicht eine aussagekräftige Bewertung der Fließgewässer auf Teneriffa anhand vorhandener repräsentativer Gewässereigenschaften. Das Bewertungsverfahren ist leicht verständlich und die Methode kann auch an Gewässern in unzugänglicherem Terrain genutzt werden, da ohne aufwendige Hilfsmaterialien repräsentative Ergebnisse erzielt werden können. Um die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse zu erhöhen und um die Entwicklung der Fließgewässer auf Teneriffa längerfristig zu beobachten, ist eine fortgesetzte Durchführung der Bewertungen sinnvoll.

## Literatur

- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (2000): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland - Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. Schwerin. Kulturbuchverlag, Berlin
- Lüderitz, V., U. Langheinrich, J. Ramón Arévalo, R. Jüpner, A. Fernandez (2010): Ecological assessment of streams on La Gomera and Tenerife (Spain) – An approach for an evaluation and restoration tool based on the EU-Water Framework Directive. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*. Heft 10, S. 67-75.

# **Eintragsfunktion und Prognose von Pestiziden mit Umwelttracern**

Pablo Davila und Christoph Kuells

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Mit einer Reihe von Maßnahmen wird versucht, die im Oberrheingraben auftretenden Belastungen von Oberflächen- und Grundwasser mit Nitrat und Pestiziden zu reduzieren. Nicht immer führten die ergriffenen Maßnahmen zu der erwarteten Verringerung der Schadstoffkonzentration. Transport, Speicherung und Mobilisierung von Pestiziden in der ungesättigten und gesättigten Zone wurden an zwei Standorten in der Nähe von Strasbourg und Mulhouse tracerhydrologisch untersucht. Tiefenprofile der ungesättigten und der gesättigten Zone wurden über die gesamte Mächtigkeit des Bodens und Aquifers beprobt und auf die Altersindikatoren Tritium, FCKW und SF<sub>6</sub>, stabile Isotope des Wassers, Hauptelemente und 35 Pestizide analysiert. Der Datensatz ermöglicht die Rekonstruktion der Eintragungsgeschichte von Nitrat und Pestiziden für die ungesättigte Zone und das Grundwasser. Die Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf die Schadstoffkonzentration im Sicker- und Grundwasser konnte mit dem tracerhydrologischen Ansatz ermittelt und quantifiziert werden, obwohl diese in der Grundwasserüberwachung des geförderten Grundwasser nicht erkennbar war. Der Ansatz bietet sich zur Überprüfung der Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf den Schadstofftransport an, wenn die integrale Beprobung keine klaren Aussagen liefert, liefert Daten für die Überprüfung von Modellen und ermöglicht Prognosen auf der Basis geländehydrologischer Daten.

# Langfristige Veränderung von punktueller und diffuser Stickstoff- und Phosphorbelastung im Einzugsgebiet der oberen Stör

Christiano Andre Pott, Britta Schmalz, Georg Hörmann und Nicola Fohrer

Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Deutschland

## Zusammenfassung

Stickstoff (N) und Phosphor (P) spielen eine große Rolle bei der Verschmutzung von den Fließgewässern, wobei der Eintrag in oberirdische Gewässer über punktuelle oder diffuse Pfade erfolgt. Zum diffusen Nährstoffeintrag trägt überwiegend die Landwirtschaft bei, während Abflüsse von Kläranlagen und sonstige Einleitungen punktuelle Einträge sind. Die Ermittlung dieser Pfade und der Stoffgehalte im Gebiet der oberen Stör war Gegenstand von zwei Forschungsprojekten zwischen 1991 und 1995 und einer neueren Untersuchung von 2009 bis 2011. Das Einzugsgebiet der oberen Stör (462 km<sup>2</sup>) liegt in Schleswig-Holstein, gehört zur Flussgebietseinheit der Elbe und umfasst das Teileinzugsgebiet der tidefreien Stör bis zum Pegel Willenscharen. Die größten Nebenflüsse sind Schwale, Bünzener Au, Buckener Au und Aalbeck.

In der ersten Messungsphase wurde die Wasserqualität zwischen 1991 und 1995 im Stör-Projekt (Ripl et al., 1996) monatlich an 128 Punkten in den Fließgewässern gemessen. Etwa 20 Jahre später (2009-2011) hat die Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel dieses Einzugsgebiet erneut untersucht.

Das Ziel dieser Studie ist ein Vergleich der beiden Untersuchungszeiträume, um die Wirksamkeit von Umweltschutzmaßnahmen anhand der Entwicklung der Wasserqualität der letzten 20 Jahre zu überprüfen. Die untersuchten Wasserqualitätsparameter sind: Gesamt-P (P-ges), Phosphat-löslich-P (PO<sub>4</sub>-P), Gesamt-N (N-ges), Nitrat-N (NO<sub>3</sub>-N) und Ammonium-N (NH<sub>4</sub>-N). Der erste Datensatz von März 1991 bis März 1995 enthält 44 monatliche Wasserqualitätsmessungen von 21 Messpunkten. Die aktuellen Daten umfassen derzeit 24 monatliche Wasserqualitätsmessungen (August 2009 bis Juli 2011) an den gleichen Messpunkten.

Zur Abschätzung der Wasserqualität wurden die Daten im Rahmen der Vorgaben der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1998) eingeordnet. Die Klassengrenzen wurden durch die 90. Perzentile dargestellt. Güteklasse II (GK-II) repräsentiert dabei einen Wert, der als Zielvorgabe für die Wasserrahmenrichtlinien gilt.

Der Vergleich ergab eine Verbesserung der Wasserqualität für die Parameter P-ges, N-ges und NO<sub>3</sub>-N, die aber nicht zu einer Verbesserung der LAWA Klassifikation führte. Die Werte für N-ges und NO<sub>3</sub>-N lagen in GK III, für P-ges und NH<sub>4</sub>-N lagen in GK II-III, für PO<sub>4</sub> lag in GK II. Diese Wasserqualität unterliegt saisonalen Einflüssen, so sind in der Regel N und P-Belastungen im Winter höher als im Sommer.

# Entwicklung und Erprobung eines Phytoplankton-Indexes der biotischen Integrität (P-IBI) für einen deutschen Tieflandbach

Naicheng Wu, Britta Schmalz und Nicola Fohrer

Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

## Zusammenfassung

Wir haben einen Phytoplankton-Index der biotischen Integrität (P-IBI) für einen deutschen Tieflandbach (Kielstau-Einzugsgebiet) entwickelt, um die Auswirkungen von anthropogenen Beeinträchtigungen auf den biotischen Zustand von Phytoplankton-Gemeinschaften im Fließgewässer zu bewerten. Sechs Kenngrößen (von 36 Ursprungskenngrößen) wurden aus einem Trainingsdatensatz ausgewählt, basierend auf  $kumulativ\_R^2$  und einem Korrelationsindex (COI) zwischen biotischen Kenngrößen und Umweltvariablen. Die endgültigen P-IBI-Werte wurden durch Mittelung der Kenngrößen für einen Standort berechnet, nach Transformation in eine diskrete Skala in 1 (schlecht), 2 (gering), 3 (moderat), 4 (gut), 5 (hoch) entsprechend den Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Wir haben dann die Robustheit des P-IBI getestet. Der P-IBI und seine sechs Kenngrößen sind ein Hinweis auf ökologische Integrität und die Wasserqualität. Dieses wurde durch eine kanonische Korrespondenzanalyse und Vergleiche mit anderen einzelnen Kenngrößen gezeigt, obwohl  $kumulativ\_R^2$  und CoI-Werte in dem Test-Datensatz abnahmen. Durch die Implementierung des entwickelten P-IBI im Untersuchungsgebiet fanden wir heraus, dass der ökologische Zustand saisonal variierte. Der generelle ökologische Zustand des Untersuchungsgebietes war "moderat", ungeachtet der saisonalen Schwankungen, die niedriger als die Anforderung ("guter"-Zustand) der WRRL bis 2015 waren. Der relativ niedrige ökologische Zustand wurde vermutlich durch Punktquellen, Emissionen diffuser Quellen und künstliche Entwässerungssysteme des Untersuchungsgebietes verursacht. Unsere Studie war ein wichtiger Versuch zur Entwicklung des IBI in einem Einzugsgebiet ohne Referenz-Standorte, und der erstellte P-IBI könnte ein nützliches Werkzeug sein, um den langfristigen Zustand des Baches und die Wirksamkeit verschiedenen Einzugsgebietsmanagements zu messen. Außerdem wird für eine weitere Einzugsgebietsbewirtschaftung vorgeschlagen, sich mit den Punktquellen, diffusen Quellen sowie künstlichen Entwässerungssystemen zu befassen, um eine bessere Wasserqualität im Untersuchungsgebiet zu erzielen.

# **Nutzung bestehender Webcam-Infrastruktur zur Messung der mesoskaligen Schneeverteilung in hochalpinen Gebieten – Beispiel Zugspitze**

Stefan Härer, Matthias Bernhardt, Thomas Werz und Karsten Schulz

Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die terrestrische Fernerkundung von Gegenhängen mit Hilfe von hochauflösenden Digitalkameras ist ein sehr junges Verfahren zur Bestimmung der lokalen Schneeverteilung im Hochgebirge und erlaubt heutige, zumeist flächenverteilte und prozessbasierte schneehydrologische Modelle räumlich wie zeitlich hochauflösend zu validieren. Insbesondere unter Berücksichtigung der extremen klimatischen und topographischen Bedingungen im Hochgebirge werden die Vorteile der automatischen, flächenhaften Messung der Schneeverteilung deutlich. Jedoch führen die hohen Kosten für Anschaffung, Installation und Wartung der Kameras, sowie die Widerstände gegen den Aufbau an landschaftlich reizvollen Standorten dazu, dass nur sehr wenige Gebiete mit einem derartigen Kamerasystem ausgestattet sind. Eine mögliche Lösung in vielen, insbesondere touristisch genutzten Gebieten bietet die Nutzung von Webcams, deren Vorteile die hohe zeitliche Auflösung, eine bereits weltweit verbreitete und häufig auch mehrmalig in einem Gebiet bestehende Infrastruktur, sowie ein günstiger Preis sind. Am Beispiel der Zugspitze (Nordosthang Schneefernerkopf) werden die gleichzeitigen und dabei räumlich überlagerten Aufnahmen von drei Webcams und einer hochauflösenden Digitalkamera verglichen. Die Messung der Schneeverteilung mit Hilfe der Webcams verschiedener Standorte und unterschiedlicher Auflösung im Vergleich zu den Aufnahmen der hochauflösenden Kamera ermöglicht eine Güteabschätzung, die Webcams als mögliche Alternative, wie auch sinnvolle Ergänzung zu den kostenintensiven und speziell für diesen Zweck installierten Digitalkameras bestätigen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die terrestrische Fernerkundung von Gegenhängen, ob mit hochauflösenden Digitalkamerasystemen oder mit, eventuell in hohen Auflösungsmodi, betriebenen Webcams die Validierungsmöglichkeiten schneehydrologischer Modelle in räumlicher wie zeitlicher Hinsicht signifikant verbessert.

# Potential der Zeitraffer-Fotografie zur Beobachtung der räumlichen Verteilung von Schneedeckeneigenschaften

Jakob Garvelmann, Stefan Pohl und Markus Weiler

Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

Die Vorhersage von Hochwasser aus so genannten "Regen-auf-Schnee"-Ereignissen ist bisher wenig zufriedenstellend. Eine zuverlässige Prognose dieser Hochwasserereignisse benötigt genaue Informationen über die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der Schneedecke im Einzugsgebiet vor einem Ereignis. Der Einsatz von Zeitraffer-Fotografie wurde bereits erfolgreich von Floyd und Weiler (2008) und Parajka et al. (2012) zur kontinuierlichen Beobachtung der Schneedecke getestet. In der vorgestellten Studie wurden 45 Digitalkameras die in regelmäßigen Intervallen (1h) Aufnahmen der Schneedecke machen räumlich verteilt in drei Einzugsgebieten installiert, um eine kontinuierliche Beobachtung der Schneedecke zu realisieren. Es wurde darauf geachtet möglichst alle Höhenlagen und Expositionen abzudecken. Um die Einflüsse der Vegetation auf die Schneedecke zu untersuchen, wurden außerdem Kameras in Waldflächen mit unterschiedlichen Vegetationstypen und Vegetationsdichten sowie auf angrenzenden Freiflächen eingesetzt. Im Blickfeld der Kameras wurden jeweils eine Messlatte sowie eine Schwarz-Weiß Fläche installiert, um eine Abschätzung der Schneehöhe, der Schneeinterzeption in den Baumkronen und der Schneeealbedo zu ermöglichen.

Ein "Regen-auf-Schnee"-Ereignis im Brugga-Einzugsgebiet konnte mit Hilfe der Zeitraffer-Bilder analysiert werden (Abb. 1). Dargestellt sind die Abflussganglinie der Brugga, der gefallene Niederschlag sowie die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur und der Schneedecke (Schneehöhe und Albedo) an einem Kamerastandort. Über eine einfache Höhenregression aller Standorte im Einzugsgebiet konnte außerdem die räumliche Verteilung der Schneehöhe im Brugga-Einzugsgebiet vor und nach dem Ereignis dargestellt werden. Es ist eine deutliche Abnahme der Schneehöhe in allen Höhenlagen zu erkennen. Über einen Weißabgleich innerhalb einer Bildanalysesoftware konnte außerdem die zeitliche Entwicklung der Albedo der Schneedecke bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Bildanalyse wurden mit den Albedo-Messdaten einer Klimastation am gleichen Standort verglichen und zeigten eine sehr gute Übereinstimmung ( $R^2 = 0,91$ ,  $RMSE = 0,08$ ).

Die Höhenregression der aus den Bildern abgelesenen Schneehöhen an einem Stichtag (20.02.2012) in zwei Einzugsgebieten (insgesamt 31 Standorte, 18 davon Kameras auf Freiflächen) zeigt eine positive Korrelation ( $R^2 = 0,6$ ) von Wiesenstandorten mit der Geländehöhe. Der Zusammenhang zwischen Geländehöhe und der Schneehöhe an Waldstandorten ist nicht sehr stark ( $R^2 = 0,3$ ). Es zeigte sich dass der Vergleich von Schneehöhen zu „Leaf Area Index“ (LAI) eine wesentliche stärkere Korrelation ( $R^2 = 0,5$ ) für Waldstandorte ergibt.

Durch den Einsatz von Wald-Wiese-Kamera-Paaren konnte mit Hilfe der Messlatten im Blickfeld der Kameras der Einfluss des Kronendaches auf die Schneedecke unterhalb beobachtet werden. Während des beobachteten Zeitraumes war die Schneehöhe im Nadelwald (LAI = 1,9) im Mittel um 50% und im Laubwald im Mittel um 40% geringer als auf der angrenzenden Wiesenfläche.

Mit Hilfe von Bildanalysesoftware konnte die zeitliche Entwicklung der Schneeeinterzeption von Bäumen analysiert werden. Der Vergleich der Bilder von einem Südhang-Wald und einem Nordhang-Wald zeigt deutlich den Einfluss der Exposition auf die Schneeeinterzeption, da die Baumkronen des Südhang-Waldes nach einem Schneefallereignis und darauffolgenden Schönwettertagen mit milden Temperaturen zwei Tage früher schneefrei waren als am Nordhang-Wald.

Eine Analyse der Zeitraffer-Bilder eignet sich auch um den Schneebedeckungsgrad größerer Flächen zu ermitteln und der Zustand des Niederschlags (Regen oder Schnee) kann erkannt werden.

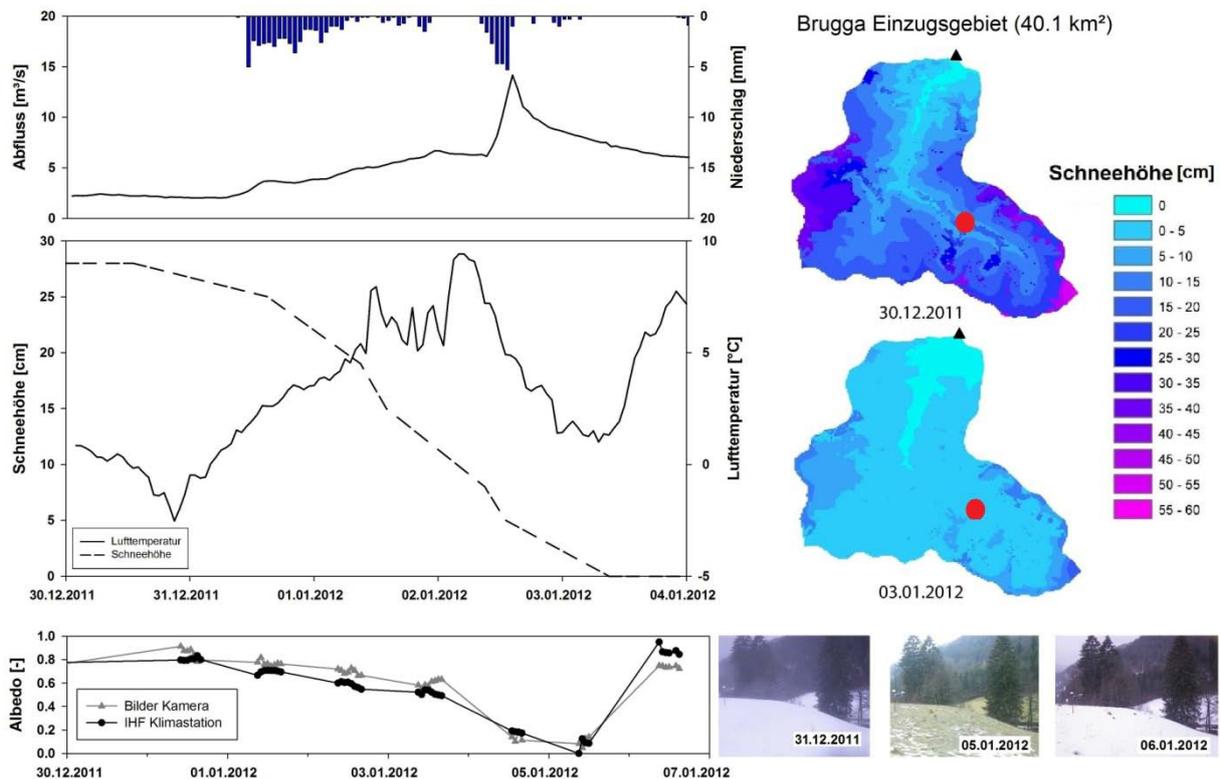


Abbildung 1: Analyse eines “Regen-auf-Schnee”-Ereignis im Brugga-Einzugsgebiet im Winter 11/12.

Die ersten Ergebnisse der Studie in drei Mittelgebirgseinzugsgebieten mit unterschiedlicher topographischer Charakteristik und räumlicher Ausdehnung deuten darauf hin, dass sich der Einsatz von digitaler Zeitraffer-Fotografie zur Beobachtung der räumlichen Verteilung von Schneedeckeneigenschaften auf Einzugsgebietskala eignet. Die Methode liefert relativ einfach und kostengünstig Daten über die räumliche Verteilung von Schneehöhe, Schneebedeckungsgrad und Albedo sowie über wichtige Schneeprozesse wie Schneeeinterzeption in den Baumkronen und Niederschlagsart. Zeitlich beschränkte Einschränkungen können sich aus schlechten Sichtverhältnissen wie Nebel, starkem Schneefall oder einem Zuschneien der Kameralinse ergeben.

## Literatur

- Floyd, W. und M. Weiler (2008): Measuring snow accumulation and ablation dynamics during rain-on-snow events: innovative measurement techniques. *Hydrological Processes* 22, 4805-2097.
- Parajka, J., P. Haas, R. Kirnbauer, J. Jansa und G. Blöschl (2012): Potential of time-lapse photography of snow for hydrological purposes at the small catchment scale. *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp8389.

# Adaptation toolkit for the North Sea Region in a changing climate

Helge Bormann<sup>1</sup>, Yvonne Andersson-Sköld<sup>2</sup>, Ger de Lange<sup>3</sup>, Lybrich van der Linden<sup>3</sup>  
und Niels van Oostrom<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department Bauingenieurwesen, Universität Siegen, Deutschland

<sup>2</sup> Statens Geotekniska Institut, Göteborg, Schweden

<sup>2</sup> Deltares, Utrecht, Niederlande

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt ein Set von Werkzeugen vor, die im Rahmen des EU-Interreg IVB Projekts „*Climate Proof Areas*“ für die Herausforderung der Klimaanpassung in der Wasserwirtschaft entwickelt und zusammengestellt wurden. Das Anpassungs-Toolkit orientiert sich in seiner Struktur am Problemlösungs-Zyklus (Problemdefinition, Problemspezifizierung, Generieren von Lösungen, Auswahl des Lösungsansatzes, Implementierung, Evaluation) und versucht, für alle Phasen dieses Zyklus hilfreiche Werkzeuge für eine erfolgreiche Klimaanpassung vorzustellen, inklusive der Beschreibung einer Anwendung ausgewählter Werkzeuge in den Pilotgebieten von „*Climate Proof Areas*“.

## Hintergrund

Der für das 21. Jahrhundert zu erwartende Klimawandel wird in der Nordseeregion erhebliche Auswirkungen auf viele unterschiedliche wirtschaftliche und gesellschaftliche Sektoren haben (z.B. Wassermanagement, Landwirtschaft, Bauwirtschaft, Tourismus, etc.). Im Rahmen des EU-Interreg IVB Projekts „*Climate Proof Areas*“ wurden mögliche Auswirkungen auf Basis verfügbarer Untersuchungen Regionen-spezifisch identifiziert und zusammenfassend bewertet (Verhofstede et al., 2011). Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie war, dass neben der Vermeidung der Klimawandels die Anpassung an den Klimawandel in all diesen Sektoren bereits heute einen hohen Stellenwert haben muss. Die Klimaanpassung jedoch stellt die betroffenen Akteure vor neue Herausforderungen. Auf Basis unsicherer Informationen über den zukünftigen Klimawandel sowie anderer gesellschaftlicher Veränderungen auf der lokalen und regionalen Skala müssen heute in vielen Sektoren Entscheidungen für lange Planungszeiträume getroffen werden. Dabei sind erhebliche finanzielle Anstrengungen notwendig, die vor dem Hintergrund einer subjektiv geringen Dringlichkeit trotzdem gesellschaftliche Akzeptanz finden müssen. Standardansätze stehen für die Klimaanpassung aber ebenso wenig zur Verfügung wie klare Regelungen zur Organisation des Anpassungsprozesses. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen von „*Climate Proof Areas*“ ein „*Adaptation toolkit*“ entwickelt (van Oostrom et al., 2011), um den beteiligten Akteuren im wasserwirtschaftlichen Anpassungsprozess Hilfestellung zu geben.

## Adaptation toolkit

Das im Rahmen von „*Climate Proof Areas*“ entwickelte „*Adaptation toolkit*“ versucht, den Anpassungsprozess in Form der verschiedenen Phasen des Problemlösungs-Zyklus zu strukturieren: Problemdefinition, Problemspezifizierung, Generieren von Lösungen, Auswahl des Lösungsansatzes, Im-

plementierung, Evaluation. Für diese sechs Phasen werden empfehlenswerte Werkzeuge identifiziert, die im Rahmen verschiedener Pilotstudien von „*Climate Proof Areas*“ (Adriaanse et al., 2011) erfolgreich angewendet wurden, und beschreibt deren Eigenschaften (Zielstellung, Notwendige Informationen, Raumskala, Umgang mit Unsicherheiten, benötigte Zeit und Kosten, Sektor, Output) sowie deren jeweilige Stärken und Schwächen. Es leistet damit Unterstützung in der Organisation des Klimaanpassungsprozesses und stellt „*good-practice*“ Beispiele vor. Wesentliche Schwerpunkte werden auf die Organisation des Prozessmanagements, die Information der Öffentlichkeit sowie auf Beteiligungsprozesse gesetzt, die als zentrale Elemente in der Organisation des Klimaanpassungsprozesses identifiziert wurden. Prozess-Modelle, Szenarioanalysen und Entscheidungsunterstützungssysteme sind aber ebenso essentielle Bestandteile, um potentielle Klimawandelfolgen zu quantifizieren, das Bewusstsein für mögliche Klimafolgen zu schärfen und die Entscheidung zwischen unterschiedlichen Anpassungsoptionen zu erleichtern. Das „*Adaptation-toolkit*“ beschreibt den Klimaanpassungsprozess als iterativen Prozess, der sich durch ein hohes Maß an Transparenz auszeichnet und so sektorenübergreifend zu akzeptablen Lösungen führen kann. Es darf nicht als „Kochbuch“ für den Anpassungsprozess verstanden werden, bietet aber ein gewisses Maß an Hilfestellung, wie ein solcher Prozess organisiert werden kann. Ein zentraler Schwerpunkt ist die umfangreiche Beteiligung der Öffentlichkeit zur Bildung von Bewusstsein, zum Erfahrungsaustausch, zur Katalyse von Kompromissen und damit zur Entwicklung gemeinsamer Lösungsansätze. Die empfohlenen Werkzeuge sollen dabei nur als sinnvolle Beispiele verstanden werden. Natürlich kann ein Klimaanpassungsprozess auch mithilfe anderer Werkzeuge erfolgreich gestaltet werden. Aber die vorgestellten Werkzeuge haben sich in den Pilotgebieten als hilfreich im Rahmen der verschiedenen regionalen Klimaanpassungsprozesse erwiesen. Sie können dem Nutzer des „*Adaptation-toolkit*“ somit helfen, Fallstricke des Klimaanpassungsprozesses zu umgehen und ein tieferes Verständnis der Organisation der Klimaanpassung zu erlangen.

## Schlussfolgerungen

Das hier vorgestellte „*Adaptation-toolkit*“ gibt dem Nutzer eine Hilfestellung bei der Organisation des wasserwirtschaftlichen Klimaanpassungsprozesses. Es fördert die Strukturierung des Prozesses, sorgt für Transparenz und stellt mit den Pilotgebieten von „*Climate Proof Areas*“ Beispiele guter Praxis vor. Es zeigt aber auch, dass derzeit noch ein formales Instrument fehlt, Anforderungen der Klimaanpassung direkt in heutige Planungsprozesse zu integrieren. Demzufolge empfehlen die Projektpartner von „*Climate Proof Areas*“ die Entwicklung eines „*Climate Adaptation Pre-Assessment*“ (CAPrA).

## Literatur

- Adriaanse, L., E. van Zanten, S. Ciarelli, N. Houtekamer, F. Ahlhorn, H. Bormann, C. Gerrard, M. Dâverhög, H. Deavin und C. Soans (2011): Time to adapt - 8 pilots that show you how.  
[www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP2-endreport\\_web.pdf](http://www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP2-endreport_web.pdf) (8.2.12)
- Verhofstede, B., R. Ingle, R. de Sutter, H. Bormann, G. de Lange, L. van der Linden, C. Gerard, Y. Andersson-Sköld und P. Graham (2011): Comparison of climate change effects across North Sea countries.  
[www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP1\\_endreport\\_web.pdf](http://www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP1_endreport_web.pdf) (8.2.12)
- Van Oostrom, N., Y. Andersson-Sköld, H. Bormann, G. de Lange und L. van der Linden (2011): Adaptation toolkit for the North Sea Region in a changing climate.  
[www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP4-endreport\\_web.pdf](http://www.newsletter.climateproofareas.com/reports/end%20products/CPA-WP4-endreport_web.pdf) (8.2.12)

# **Entwicklung eines Indikatorenkonzepts für das System „Binnenwasserstraße“ und für politische Entscheidungsprozesse bei der Anpassung an den Klimawandel**

Annette Stosius und Sebastian Kofalk

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Indikatoren werden genutzt, um die Komplexität eines Systems oder Sachverhalts vereinfachter darzustellen und um entscheidungsrelevante Themen und Zusammenhänge hervorzuheben. Dadurch können hydrologische Forschungsergebnisse für politische Entscheidungsträger verständlicher gestaltet werden. Darin ist die Notwendigkeit zu einer wissenschaftlich fundierten Formulierung von Indikatoren beinhaltet. Potentielle Anpassungsmaßnahmen können nur dann bewertet werden, wenn eine vollständige Systemanalyse stattgefunden hat und ein ausreichend gutes Systemverständnis vorhanden ist. Diese Arbeiten sind Teil des Ressortforschungsprogramms „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Der dort verwendete Ansatz ermöglicht eine systematische Integration von Modellen in einer Kette, beginnend bei globalen und regionalen Klimamodellen, über hydrologische und morphologisch-hydraulische Modelle bis hin zu Ökosystem- und ökonomischen Modellen zur Analyse des Systems und der Wirkungsgefüges Binnenwasserstraße. All diese Modelle werden routinemäßig eingesetzt oder werden für besondere Einsatzgebiete weiterentwickelt. Die KLIWAS Modellkette ist ein wichtiges Werkzeug um das System Binnenwasserstraße in allen Teilen hinsichtlich seiner Verwundbarkeit bezüglich des Klimawandels zu untersuchen (BMVBS 2009).

Eine Vielzahl von Indikatoren wird auch heute schon im nachhaltigen Flussgebietsmanagement verwendet, sie sind aber auch im wissenschaftlichen Kontext präsent. Unser Ziel ist es, dieses bestehende Mosaik zu analysieren und in ein konsistentes Konzept zu transformieren, das die ökologischen und ökonomischen Aspekte des Unterhalts von Binnenwasserstraßen als Fokus hat. Es soll Entscheidungsträger dabei unterstützen, angemessene Anpassungsmaßnahmen an sich ändernde Klima- und Umweltkonditionen zu finden und deren Effizienz abzuschätzen.

Wir sammeln die Ergebnisse entlang der Modellketten, die in diesem Programm angewendet werden, mit besonderer Berücksichtigung der Unsicherheiten, die durch den Multi-Modell-Ansatz (Krahe et al., 2009) fassbar gemacht werden. Die Indikatoren müssen so gewählt und definiert werden, dass sie auch die entscheidungsrelevanten Größen der technischen und administrativ-politischen Zielstellungen des Betriebs und des Unterhalts von Wasserstraßen sowie die existierenden rechtlichen Vorgaben für ein Flussgebietsmanagement berücksichtigen.

Das entwickelte Indikatorenkonzept wird so eine Schnittstelle zwischen Forschung und Anwendung formen. Es kondensiert sozusagen die wissenschaftlich fundierten Ergebnisse aus KLIWAS zu aussagekräftigen Indikatoren, die von Entscheidungsträgern genutzt werden können. Dies gilt

insbesondere für die Planung und Unterhaltung von Binnenwasserstraßen. Ergebnisse aus hydrologischer Modellierung z.B. können so gezielter in den Entscheidungsprozess eingepasst werden. Wir verbinden unsere Arbeiten ebenfalls mit dem Indikatorenprojekt der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS).

## **Literatur**

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Tagungsband der ersten KLIWAS-Statuskonferenz am 18./19. März in Bonn, Bonn.

Krahe, P., E. Nilson, M. Carambia, T. Maurer, L. Tomassini, K. Bülow, D. Jacob, & H. Moser, (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 5/2009. S.316-331.

# **Wegweiser zum Studium hydrologischer Extremereignisse an der Elbe und Oder**

Mathias Deutsch, Karl-Heinz Pörtge, Gerd Hübner und Daniel Schwandt

Geographisches Institut, Universität Göttingen, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Im Dezember 2010 begann unter der Trägerschaft der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz (BfG) ein Forschungsprojekt mit dem Geographischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen: "Wegweiser zum Studium hydrologischer Extremereignisse an der Elbe und Oder". Das Projekt und erste Arbeitsergebnisse werden auf dem Poster vorgestellt.

Ziel des bis Mitte Mai 2013 laufenden Vorhabens ist es, ein umfangreiches bibliographisches Verzeichnis flussspezifischer Literatur- und Quellenangaben zu herausragenden Hoch- und Niedrigwasserereignissen von 1500 bis zum Jahr 2000 zu erstellen. Dabei geht es sowohl um hydrometeorologische und quantitativ hydrologische Aspekte als auch um gewässerökologische Auswirkungen sowie um Schadensbilanzen der Ereignisse. In die Arbeiten eingebunden sind Hydrologen, Geographen, Geoökologen, Umweltwissenschaftler, Historiker sowie Bibliothekare.

Das Verzeichnis wird in erster Linie Hinweise auf deutschsprachige Literatur sowie zu gedruckten Quellen beinhalten, wobei sich die Recherchen räumlich auf die Stromabschnitte Schöna bis Geesthacht (Elbe) sowie Mündung der Lausitzer Neiße bis Stettiner Haff (Oder) konzentrieren. Bisher konnten in Bibliotheken in Niedersachsen, Sachsen und Sachsen-Anhalt umfangreiche bibliographische Angaben erhoben werden. Zudem war es möglich, bei Recherchen in Stadt- und Staatsarchiven (u. a. in Merseburg, Pirna und Greifswald) wichtige handschriftliche Quellen und Karten sowie historische Hoch- und Niedrigwasserabbildungen zu erfassen. Anhand dieser Quellen ist es zum Beispiel möglich, die Hochwasser der Elbe von 1845 und 1890 oder die extremen Niedrigwasserereignisse in den Jahren 1904 und 1911 besser als bisher quantitativ und qualitativ zu beschreiben.

Es ist vorgesehen, das Verzeichnis nach Abschluss der Recherchen zeitnah zu veröffentlichen (Druck und digital) und mit dem Online-Katalog der Gewässerkundlichen Zentralbibliothek der BfG sowie mit der Informationsplattform Undine zu verknüpfen. Damit soll den zuständigen Fachbehörden des Bundes und der Länder, Forschungsinstituten, aber auch der interessierten Öffentlichkeit ein wichtiges Findhilfsmittel zur Verfügung stehen.

# **Grenzüberwindung bei der Hochwasservorhersage für die Flusssysteme Inn und Donau**

Alfons Vogelbacher, Georg Raffener, Gerald Lindner und Christoph Urbanek

Hydrographischer Dienst, Amt der Salzburger Landesregierung, Österreich

## **Zusammenfassung**

Internationale Flussgebietseinheiten reichen über Ländergrenzen und Staatsgrenzen hinaus. Der Vertrag zwischen der Republik Österreich einerseits und der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft andererseits über die wasserwirtschaftliche Zusammenarbeit im Einzugsgebiet der Donau samt Statut und Schlussprotokoll- Regensburger Vertrag BGBl.Nr 17/1991 ist ein Übereinkommen, welches Regelungen für grenzüberschreitende und grenzbildende Gewässer beinhaltet. Die Arbeitsgruppe " Wassermengenwirtschaft Wasserbau" als Teil des Regensburger Vertrages hat an Lösungen für gesamte Flusssysteme gearbeitet. Das Einzugsgebiet des Inns liegt in 3 Nationalstaaten, Schweiz, Deutschland und Österreich, das Einzugsgebiet der Donau ist auch grenzüberschreitend. Hochwasservorhersagesysteme mit Vorhersagemodellen für festgelegte Teilsysteme werden von den einzelnen Landesdiensten betrieben. Für das Einzugsgebiet des Inns und der Donau wird von den hydrographischen Landesdiensten der österreichischen Bundesländer Tirol, Salzburg, Oberösterreich und Niederösterreich und der gewässerkundliche Dienst des Bayerischen Landesamtes für Umwelt des Freistaates Bayern ein gemeinsames Vorhersagesystem betrieben. Dieses System besteht aus konzeptionellen NA-Modellen aller Flussgebiete gekoppelt mit hydrodynamischen Modellen für den Gerinneabfluss der Salzach, des Inns und der Donau. Die Fachgruppe "Hochwasservorhersagesystem Inn" hat an einer Lösung für den Datenaustausch der einzelnen Modellbetreibern gearbeitet. Ergebnis ist eine Kooperationsvereinbarung über die Zusammenarbeit bei der Hochwasservorhersage Inn und Donau und den Datenaustausch zwischen den Modellbetreibern sowie die Bereitstellung von Vorhersagen. Diese Vereinbarung definiert den Gegenstand und regelt die Bereitstellung der Vorhersagen, die Art des Datenaustausches, Schnittstellen, Nutzung, Weitergabe an Dritte, die Verfügbarkeit und die Rechtsnatur.

# Internetbasierte Informationsplattform für die Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems vom Rhein bis zur Oder

Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach<sup>1</sup>, Meike Cropp<sup>2</sup> und Marcus Meyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland

<sup>2</sup> Wasser- und Schifffahrtsamt Duisburg-Meiderich, Duisburg, Deutschland

<sup>3</sup> Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte, Hannover, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Wasserbewirtschaftung der Kanäle zwischen Rhein, Weser, Elbe und Oder ist durch unterschiedliche natürliche Gegebenheiten einerseits sowie unterschiedliche und veränderte Nutzeransprüche andererseits gekennzeichnet. Die Bewirtschaftung der Stauhaltungen erfolgt ämterübergreifend durch die Betriebszentralen Datteln, Minden und Magdeburg/Rothensee im Bereich der jeweils zuständigen Wasser- und Schifffahrtsdirektion West, Mitte oder Ost. Ziel ist es, eine nachhaltige und energetisch optimierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen zur Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sowie zur Sicherung anerkannter, gerechtfertigter Nutzeransprüche einschließlich der Ökologie zu erreichen.

Entsprechend dieser Zielstellung wurde die internetbasierte Informationsplattform zur optimierten Wasserbewirtschaftung der Stauhaltungen zwischen Rhein und Oder (ÜWA) entwickelt. ÜWA befindet sich gegenwärtig im Probebetrieb und wird voraussichtlich Ende des Jahres 2011 in den Wirkbetrieb gehen. Mit dieser WSV-Web-Anwendung können Informationen abgerufen werden, die der sicheren Verwaltung und der Auswertung von wasserwirtschaftlichen Daten (wie Wasserstandsdaten und Informationen über Pump-, Schleusungs- und Entlastungswassermengen) dienen und sie ermöglicht allen Betriebszentralen die gleiche Sicht auf das Bewirtschaftungssystem. ÜWA optimiert die Zusammenarbeit der Betriebszentralen und unterstützt als Entscheidungshilfe insbesondere in Trockenzeiten und während besonderer Betriebszustände ihre tägliche operationelle Arbeit.

In diesem Beitrag wird die internetbasierte Informationsplattform zur optimierten Wasserbewirtschaftung inhaltlich vorgestellt. Veranlassung sowie Vorgehensweise bei der Entwicklung dieser Web-Anwendung werden skizziert. Der Fokus des Beitrages liegt auf der ausführlichen Darstellung ihres Nutzens für die tägliche operationelle Arbeit in den Betriebszentralen. Dieses beinhaltet Erläuterungen zu den Besonderheiten der Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems, zur Datenbasis sowie zu den Möglichkeiten der Datenauswertung und ihrer Darstellung im internen und öffentlichen Bereich.

# **Austausch von hydrologischen Daten am Beispiel des Messdatenmanagementsystems AquaZIS**

Gerhard Langstädtler, Claudia Janßen und Simone Blücher

aqua\_plan Ingenieurgesellschaft für Problemlösungen in Hydrologie und Umweltschutz GmbH, Aachen, Deutschland

In der Wasserwirtschaft gewinnt die Verzahnung von Datenerhebung, -auswertung, -archivierung und -austausch als Grundlage beispielsweise zur Umsetzung der Monitoring- und Maßnahmenprogramme der Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung. In der Praxis hat es sich bewährt, alle diese Aufgaben über ein Programmsystem zu bearbeiten.

Das Messdatenmanagementsystem AquaZIS dient der Verwaltung, Visualisierung, Auswertung und dem verlustfreien Austausch zeitbezogener Daten in der Hydrologie. Die Sachgebiete Niederschlag, Oberflächenhydrologie, Grundwasser und Klima werden über ein Programmsystem bearbeitet. Neben der ausführlichen Datenprüfung und -korrektur bietet es auch die Möglichkeit, zahlreiche hydrologisch relevanten Auswertungen wie Extremwertstatistiken, Korrelation und Regression, Volumenberechnung, Schwellenwertanalyse etc. durchzuführen.

Der Im- und Export sämtlicher hydrologischer Massendaten einschließlich ihrer Metadaten ist problemlos möglich, sodass es als Schnittstelle zwischen Wasserverbänden, Ingenieurbüros, Hochschulen und öffentlicher Verwaltung eine bedeutende Praxisrelevanz erreicht.

Auch die Versorgung hydrologischer Modelle und sonstiger Drittanwendungen sowohl über deren spezifische proprietäre Datenformate als auch ohne Export über ein XML-Protokoll wird vom System gewährleistet.

Zeitreihen sind in AquaZIS den Messstellen zugeordnet und durch ihre Attribute (u. a. Station, Parameter, Herkunft, Zeitbezug, Einheit) eindeutig definiert. Über die Messstellen lassen sich die Reihen im System aufrufen. Dies erfolgt mit Hilfe der Karte, über die Stationsbezeichnung oder durch einen speziellen Zeitreihenfilter.

Mit den Funktionen zum Editieren von Zeitreihenfolgen lassen sich beliebige Zeitreihenabschnitte unterschiedlicher Zeitreihen miteinander kombinieren und mit Hilfe von Formeln modifizieren (z. B. Abfluss aus Wasserstand, Abflusskurven, Gültigkeiten und Veränderungswerten sowie Stofffrachten aus Abfluss und Konzentrationen).

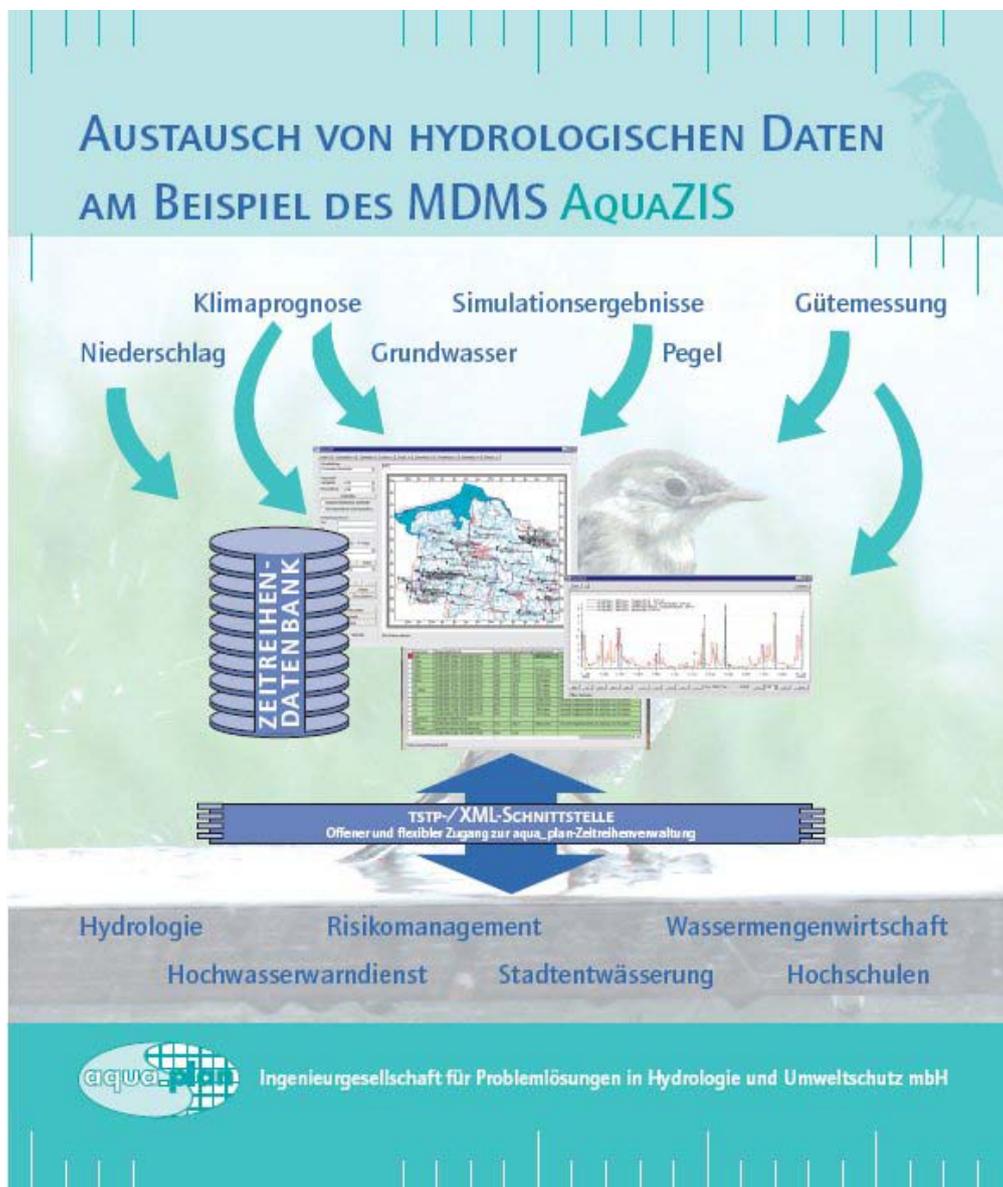
Zu jeder Messstelle können umfangreiche Stammdaten hinterlegt werden.

Es lassen sich Zeitreihen aus mehr als 50 Fremd- bzw. Austauschformaten importieren, die automatisch erkannt und ausgelesen werden. Der Export erfolgt unter anderem in die Formate DBF, CSV, UVF, DVWK, MD und das an den Hochschulen für die statistische Datenanalyse eingesetzte System „R“. Darüber hinaus ist die tagesaktuelle Belieferung des GRDC (Global Runoff Data Centre) Praxisanwendung.

Mit der tstp-Schnittstelle (time series transfer protocol) über das XML-Standardprotokoll stehen Zeitreihendaten für eine Vielzahl von Systemen ohne Im- bzw. Export bereit: GIS, NA-Modelle, Bewirtschaftungs- und Vorhersagemodelle, Kanalnetzsteuerungs- und Bemessungsmodelle, Hochwassernachrichtendienst, Internetpräsentationen.

AquaZIS besitzt eine große Anwendungsrelevanz in Landesverwaltung und Wasserverbänden von NRW, Niedersachsen, Thüringen, Schweiz, Österreich, in Stadtentwässerungsbetrieben, beratenden Ingenieurbüros und etlichen Hochschulen.

Die DWA bestätigt mit der Arbeitsgruppe M 151 „Messdatenmanagementsysteme in Entwässerungssystemen“ die Bedeutung des hier vorgestellten Themas.



## **Die Water Research Horizon Conference – Dialogplattform für die Wasserforschung innerhalb der Water Science Alliance**

Roland Barthel und Elisabeth Krüger

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig, Deutschland

Das Thema Wasser steht im Mittelpunkt zahlreicher wichtiger Forschungsfragen in der Umweltforschung. Die Fragmentierung der Wasserforschungslandschaft in mehr als 150 unabhängig agierende Institute/Forschungszentren führt dazu, dass die entwickelten Lösungen disziplinär geprägt sind. Dabei steht die Wissenschaft einem sich immer schneller wandelnden Umweltsystem gegenüber: Aufgrund der engen Vernetzung lokaler, regionaler und globaler Prozesse und der Interaktion anthropogener und hydrologischer Systeme, ist eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Wasserforschung erforderlich.

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 besser zu positionieren. 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
- Plattform für strategische Kooperationen mit führenden nationalen und internationalen Partnern

Die Water Research Horizon Conference (WRHC) ist die zentrale Diskussionsplattform der Water Science Alliance. Resultat der ersten WRHC im Jahr 2010 war das 'White Paper', das einen thematischen Leitfaden für die jährlich stattfindende Tagung bildet. Das White Paper ist das Ergebnis eines Diskussionsprozesses mit Beteiligung von über 200 Akteuren der deutschen Wasserforschungslandschaft (dazu gehört eine Bandbreite von Forschungseinrichtungen und Wissensgesellschaften sowie Vertreter von BMBF, BMU, DFG, UBA, BGR, BfG) über prioritäre Themenbereiche, die aus Sicht der Wissenschaft als einige der größten Herausforderungen angesehen werden. Die WRHC behandelt in jedem Jahr 1-2 Themen des White Papers. Thema der 3. WRHC im Juli 2012 in Berlin sind "Neue Perspektiven im integrierten Monitoring und Management von Wasserressourcen". In Vorträgen und offenen Workshops werden zukünftige Forschungsfragen identifiziert und Strategien für eine integrierte und an aktuellen Problemstellungen orientierte Forschung entwickelt. Die WRHC fungiert dabei als Kondensationskeim für weitergehende Initiativen.

Weitere Informationen zur Water Science Alliance, der WRHC sowie Download des White Papers unter: [watersciencealliance.de](http://watersciencealliance.de).

## **Ensemblesimulationen in Visdom – Entscheidungshilfe durch visuelle Interaktion**

Jürgen Waser, Hrvoje Ribičić und Günter Blöschl

Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschung GmbH, Wien, Österreich

Computersimulationen spielen im Hochwassermanagement eine wichtige Rolle. Eine Software, mit der sich verschiedene Szenarien durchspielen und vergleichen lassen, kann sinnvoll als Entscheidungshilfe eingesetzt werden. So können etwa alternative Schutzmaßnahmen in einer virtuellen Umgebung getestet werden. Die Bedienung moderner Simulationssysteme erfordert allerdings sehr viel Expertenwissen. Visdom ist ein digitales Werkzeug um ein intuitives Experimentieren zu ermöglichen (VISDOM 2012). Das wird erreicht durch eine Kombination aus Simulation und Visualisierung in einer einzigen Anwendung. Dadurch können die Auswirkungen alternativer Möglichkeiten untersucht werden, ohne Details über die zugrundeliegende Simulationstechnik wissen zu müssen. In dieser Arbeit erproben wir interaktive Systemkomponenten zur Erstellung und Analyse von Ensemblesimulationen unter Verwendung realer Geländemodelle und Gebäudedaten. Im ersten Beispiel werden unterschiedliche Drängewasserszenarien im ländlichen Raum untersucht (Abbildung 1a). Die Wasseraustrittsstellen werden durch Interaktion mit einer 3D-Ansicht auf das Szenario festgelegt. Die räumliche Darstellung einer Qualmwasserstelle bietet Kontrollelemente um die Austrittsfläche und den Grundwasserdurchfluss einzustellen. Darüber hinaus ist es möglich durch zeichnerische Interaktion vollständige Ensemblesimulationen zu definieren um Unsicherheiten bezüglich der Austrittsstelle zu berücksichtigen. Entlang des gefährdeten Deiches skizzieren AnwenderInnen eine Linie auf der die Drängewasserstellen gemäß der Unsicherheit verteilt werden sollen. Die Parameter dieser Verteilung werden mithilfe eines Ensemblekontrollelements festgelegt. Das Aussehen dieser Komponente ist an die grafische Darstellung von Wertebereichen innerhalb von Boxplots angelehnt. Durch Bewegung ('dragging') der mittleren Box wird der Median der Verteilung festgelegt. Durch Verlängerung der Linien wird die Standardabweichung eingestellt. Der direkte Bezug zur räumlichen Darstellung des Szenarios ist der entscheidende Vorteil dieser Eingabemethode, die ein rasches Testen von Eingangsunsicherheiten möglich macht. Die vorgestellte Software übersetzt die Eingaben der BenutzerInnen automatisch in Randbedingungen mehrerer Simulationsläufe. Um die Auswirkungen einer Änderung bereits während der Interaktion abschätzen zu können, zeigt die 3D-Ansicht wie die Modifikationen als Randbedingungen der Simulation übernommen werden (Echtzeitvorschau). Um die Navigation der erzeugten Simulationsläufe zu erleichtern bietet Visdom eine designierte 2D-Ansicht, in der jeder Simulationslauf als eine Zeitlinie darstellt wird (WASER et al. 2010). Das zweite Beispiel zeigt Hochwasserszenarien im urbanen Raum. Durch intuitive Linienführung können Schutzmaßnahmen wie etwa die Errichtung mobiler Schutzwände geplant werden (Abbildung 1b). Die eingezeichneten Pfade bestimmen die Positionierung der Sandsackersatzsysteme. Zur Feinadjustierung werden Kontrollpunkte bewegt um zum Beispiel die lokale Höhe einer Schutzwand zu verändern. Zusätzlich können zwei Pfade interpoliert werden um rasch ein Ensemble zu erzeugen, das aus vielen, unterschiedlichen Schutzbarrieren besteht. Diese Funktionalität wird in Abbildung 1b ausgenutzt um die Auswirkungen von Retentionsräumen verschiedener Größe zu untersuchen. In Abbildung 1c und 1d werden alternative Bruchsznarien durchgespielt. Analog zum Drängewasserbeispiel erleichtern visuelle Kontrollelemente die Definition der Bruchparameter wie zum Beispiel die Breite oder die Position entlang der Schutzwand.

Auch in diesem Fall verwenden wir ein boxplot-ähnliches Kontrollelement um eine Ensemblesimulation bezüglich der Bruchposition (Abbildung 1c) zu erzeugen. Während die AnwenderInnen Änderungen am Ensemble mithilfe des Kontrollelements vornehmen, visualisieren wir die modifizierte Verteilung der Brüche direkt als Aggregation auf der betroffenen Schutzwand (Echtzeitvorschau der Eingangunsicherheit bezüglich der Bruchstellen). Um einen schnellen Überblick über die Ergebnisse der Ensemblesimulationen zu erhalten, bietet die Software verschiedene Formen von aggregativen Darstellungen, in denen mehrere Simulationsschritte aus vielen Szenarien auf einmal dargestellt werden. In Abbildung 1c werden die Gebäude bezüglich ihrer Gefährdung eingefärbt (rot=hoch, gelb=mittel). Dazu wird der maximale Überflutungsgrad eines Gebäudes innerhalb aller Zeitschritte der Ensemblesimulation ermittelt und als Farbe auf ein Gebäude übertragen. Die Visualisierung bietet somit einen Überblick über die Eingangunsicherheit (Bruchbeschaffenheit) und die simulierte Ausgangunsicherheit (Gefahr) in einer einzigen Darstellung. In der Planung spielt die Verteilung von Ressourcen eine große Rolle und kann in der Bevölkerung leicht auf Unverständnis stoßen. Die Verwendung moderner Darstellungstechniken hat zum Vorteil, dass die Entscheidungen in leicht verständlicher Form kommuniziert werden können. Der Informationsaustausch wird über den Webservice-orientierten Ansatz der Software erleichtert. Zusätzlich ermöglicht das modulare Design von Visdom die leichte Einbindung existierender Simulationstechnologien. Damit kann Visdom als Hilfestellung im Hochwassermanagement eingesetzt werden.

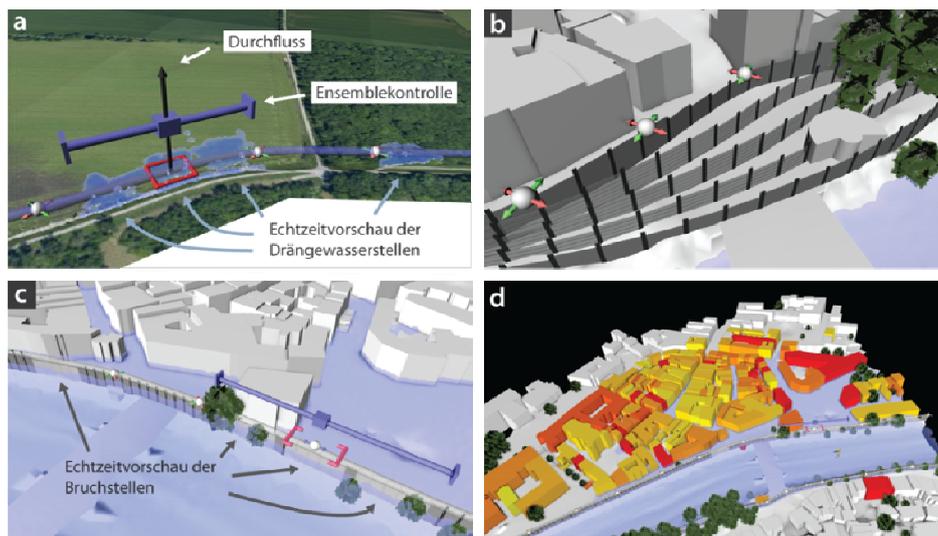


Abb. 1: Visdom Screenshots. (a) Visuelle Erzeugung einer Ensemblesimulation bezüglich unsicherer Drängewasserstellen. (b) Interpolation von skizzierten Pfaden zur Definition eines Ensembles bezüglich alternativer Schutzwandaufbauten. (c) Ensemblesimulation zur Untersuchung verschiedener Dammbuchstellen. (d) Visualisierung der maximalen Überflutungsgefährdung, ermittelt mithilfe der Ensemblesimulation aus (c).

Die Autoren bedanken sich bei der GEOCONSULT Wien ZT GmbH für die Bereitstellung der Datensätze.

## Literatur

- VISDOM (2012), ein integriertes Visualisierungssystem zur Kontrolle und Analyse mehrerer Simulationsläufe, <http://visdom.at>
- Waser, J., R. Fuchs, H. Ribicic, B. Sschindler, G. Blöschl & E. Gröller (2010) World Lines. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16 (6), pp. 1458-1467.

# **Konzeption wasserwirtschaftlicher Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel auf kommunaler und regionaler Ebene**

Heide Stephani-Pessel, Bettina Geiger und Uta Steinhardt

Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH) , Deutschland

## **Zusammenfassung**

GIS-gestützte Analysen ermöglichen die Identifikation von Flächen zum Wasserrückhalt auf kommunaler sowie regionaler Ebene als Anpassungsoption an zu erwartende Veränderungen des Niederschlags-Abfluss-Geschehens im Zuge des Klimawandels. Dabei werden Ansätze zur Anschlussfähigkeit zwischen den verschiedenen Planungshierarchien gemäß dem raumordnerischen Gegenstromprinzip ebenso identifiziert wie Synergien zwischen verschiedenen Fachplanungen.

## **Einleitung**

Regionale Klimaprojektionen lassen für den Nordosten Brandenburgs eine Erhöhung der Mitteltemperatur und eine Umverteilung der Niederschläge von den Sommer- in die Wintermonate erwarten. Dadurch bedingt ist mit Zunahme einer bereits zu beobachtenden Sommertrockenheit und weiter sinkenden Grundwasserständen zu rechnen. Der Versickerung von Niederschlagswasser und dem Wasserrückhalt kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Zwei im Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg-Berlin (kurz INKA BB) verankerte Teilprojekte (TP24: Siedlungswasserwirtschaft und TP04: Regionalplanung) entwickeln unter Beachtung des Gegenstromprinzips der Raumordnung konzeptionelle Ansätze für eine Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel auf kommunaler und regionaler Ebene. Ziel ist eine abgestimmte planerische Sicherung geeigneter Retentionsflächen – kommunal im Flächennutzungsplan und regional im Regionalplan. Auf kommunaler Ebene erfolgt die Erarbeitung im Einzugsgebiet der Panke, Vorfluter für die Entwässerungssysteme zweier Kommunen. Auf regionaler Ebene liegt das Augenmerk auf der Planungsregion Uckermark-Barnim.

## **Methodik**

Gemein ist der Herangehensweise beider Teilprojekte die GIS-gestützte Analyse, bei der auf Grundlage des digitalen Landschaftsmodells (DGM) Senken berechnet und auf den jeweiligen Planungsraum (Kommunen Panketal und Bernau sowie Planungsregion Uckermark-Barnim) angewandt wurden. Auswahlkriterium auf beiden Ebenen war die Lage der Senken, die verschiedene Kriterien zu erfüllen hatten: einen Grundwasserflurabstand von mehr als einem Meter und die Korrespondenz zu den von Kühn et al. (2004) identifizierten theoretischen Retentionsflächen auf der Grundlage von Bodendaten. Um Flächenkonkurrenzen, die sich im Klimawandel noch verschärfen werden, möglichst zu vermeiden, wurde auf Synergien mit Ausweisungen anderer Fachplanungen geachtet. So ist z. B. eine Ausweisung geeigneter Flächen auf Arealen des - in Brandenburg noch nicht ausgewiesenen - Biotopverbundes, in Synergie mit Biotoptypen (z. B. Niedermoore oder kleine Standgewässer) sowie in beste-

henden FFH-Gebieten nach Prüfung der naturschutzfachlichen Verträglichkeit der unterschiedlichen Nutzungen durchaus sinnvoll.

Da die Regionalplanung in einem Maßstab von 1:100.000 arbeitet, also wesentlich geringer aufgelöst als auf der kommunalen Ebene, ist hier vorrangiges Ziel, größere zusammenhängende Flächen zu identifizieren und diese entweder als Vorbehalts- oder Vorranggebiete zu sichern. Daher wurden in einem Zwischenschritt die Dichten der Senken berechnet, um geeignete Teilräume zu identifizieren, in denen eine hohe Dichte an Senken in Korrespondenz mit den o. g. theoretischen Retentionsflächen nach Kühn et al. (2004) zu finden ist. Diese Flächen wurden abschließend mit der Auswahl der Senken der Gemeinden Panketal und Bernau abgeglichen.

Auf kommunaler Ebene wurde durch eine enge Abstimmung mit den Praxispartnern aus Verwaltung sowie Wasser- und Bodenverband von einigen strengen Kriterien wieder Abstand genommen. Dies geschah mit Hilfe der Ortskenntnis der betreffenden Akteure; so wurden z. B. einige Flächen auch dann ausgewählt, wenn sie einen Grundwasserflurabstand von weniger als einen Meter aufwiesen, da dieses Kriterium zum Schutz des Grundwassers nicht in jedem Falle sinnvoll erschien.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Auf kommunaler und regionaler Ebene wurden geeignete und übereinstimmende Flächen zur planerischen Sicherung im Klimawandel identifiziert. Es zeigte sich jedoch, dass aus regionalplanerischer Betrachtung weniger, dafür aber größere Flächen in die Auswahl genommen wurden als auf kommunaler Ebene. In der Kommune hingegen zeigte sich die enge Zusammenarbeit mit sowohl orts- als auch sachkundigen Praxispartnern als unverzichtbar für die planerische Auswahl und Sicherung der Flächen in den beiden Gemeinden. In der Gemeinde Panketal fließen die ausgewählten Flächen in den zurzeit in Fortschreibung befindlichen Flächennutzungsplan ein.

Die Methodik der GIS-gestützten Analyse, wie sie für beide Ebenen angewandt wurde, ist für die Identifizierung der Retentionsflächen sehr gut geeignet. Allerdings sollten in weiteren Schritten die Abfluss- bzw. Infiltrationsgeschwindigkeit der Einzugsgebiete der Senken und deren Fassungsvermögen näher betrachtet werden, um größere Sicherheit in Bezug auf die Eignung der Senken als Retentionsfläche zu erhalten. Auf kommunaler Ebene kann dieser Schritt auf Grund der Ortskenntnis der Praxispartner unterbleiben; auf regionaler Ebene bleibt er unverzichtbar.

## **Schlussfolgerungen**

Aus o. g. Diskussion ergibt sich, die genannten weiteren Schritte - Berechnung von Abfluss- bzw. Infiltrationsgeschwindigkeit sowie Speichervolumen und wiederholter Abgleich der Ergebnisse - durchzuführen. Es zeigt sich jedoch auch die unbedingte Notwendigkeit der Abstimmung der unterschiedlichen raumplanerischen Hierarchien und der Validierung vor Ort, bestenfalls mit Hilfe ortskundiger Sachverständiger. Synergien zwischen wasserwirtschaftlichen und anderen Fachplanungen sollten dabei stets geprüft und genutzt werden.

## **Literatur**

Kühn, D., Bohl, S. Schultz-Sternberg, R. (2004): Ausweisung potenzieller Retentionsflächen auf der Basis der Bodenübersichtskarte 1:300.000 am Beispiel des Bundeslandes Brandenburg. Beitr. Forstwirtsch. u. Landschaftsökologie 38, 8-13.

# Harmonisierungsbedürftige Umweltqualitätsnormen als flussgebietsübergreifende Feststoffwerte im Fokus patentrechtlicher Lösungsvorschläge

Hans-Jürgen Ulonska

Erfurt, Deutschland

## 1. Einleitung und Zielstellung

Beschrieben werden Verfahren, Vorrichtung und deren Vorteile bestimmter Korngrößenverteilungen, die in mineralischen Feinböden und -sedimenten (Äquivalentkorndurchmesser  $< 2,0$  mm) nach dem Sieben durch Sedimentation ermittelt werden (*Offenlegungsschrift* 2009). Detaillierte Untersuchungen diverser Langzeitdaten, incl. einer statistischen Analyse, können Einfluss auf endgültige Umweltqualitätsnormen (UQN) haben.

## 2. Material und Methoden

Verfahren und Vorrichtung sind anwendbar für verbesserte Probenahme und laboranalytische Bestimmung von Masseanteilen (%) unterteilbarer nichtsynthetischer mineralischer Korngrößenfraktionen bzw. Korngrößengemische für Bodenproben mit bestimmtem Äquivalentkorndurchmesser und Reindichte ( $\rho_s$ ) bei variabler Fallhöhe.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1. Das Verfahren

Mit dem neuen Verfahren ergeben sich wesentliche Vorteile bei der angestrebten Harmonisierung bestimmter Feststoffwerte (mg/kg x Trockenmasse) verordneter Normen. Verbessert wird vor allem das Gesetz nach *Stokes* zur Ermittlung der Fallzeitspannen und daraus hervorgehender Masseanteile (%) zur Ableitung justitierbarer Texturklassen für die Rechtsbereiche Finanzen, Umwelt und Wirtschaft. Beim Vergleich identischer Pipettmethoden überschreiten zulässige Abweichungen gemäß deutschem Fachrecht, US-amerikanische um bis das 50fache. Die Abweichungen nach *Offenlegungsschrift* (2009, 6) bewegen sich im US-amerikanischen Bereich.

### 3.2. Die Vorrichtung

Der Suspensionsnehmer nach Figur 1 unterscheidet sich wesentlich von der Pipette nach *Köhn*, entsprechenden sonstigen patentrechtlich erfassten Geräten und ist nicht vergleichbar. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass das Entnahmeröhrchen (1) mit Skala (2) nahe seinem unteren Ende einen innen umlaufenden Ringsitz (3) hat, auf dem der Hebeschließer (4) mit einer Ringfläche aufsitzt. Dieser hat nach unten vorstehende Stabelemente (5) mit radialen Hakenvorsprüngen (6), die die Aufstiegshöhe des Hebeschließers durch Anschlag am Ringsitz (3) begrenzen. Der Hebeschließer ist leichter als die zu beprobende Suspension.

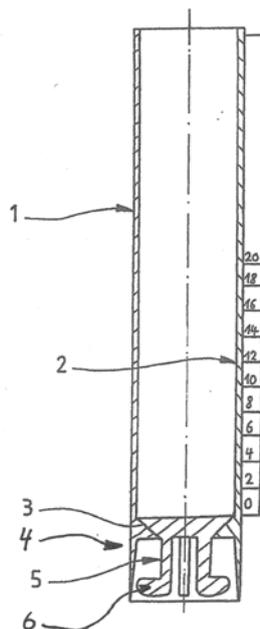
### 3.3. Umweltqualitätsnormen

Erstmals kann diese Bestimmung erweiterter, ineinander überführbarer, kompatibler und normal verteilter Fraktionsanteile des Korngrößengemisches  $< 0,01$  mm mit exakten UQN als Feststoffwerte und

in Verbindung mit konformen Kartenprojektionen zu fachgerechten Planungen z. B. für Modellierungen Korngrößengemischspezifischer Sedimenttransporte (Mame-de 2008, XXI) führen. Gemäß *Ruppel et al.* (2011, 111) sind in Abhängigkeit klimatischer Bedingungen, Texturklassen und Bodennutzungsformen zudem langfristige Trends von Feststoffwerten nach linearen Regressionen verschiedener Böden möglich. Dadurch werden die Wahrscheinlichkeit statistischer Sicherheiten ausgewählter UQN für Schwermetalle z. B. bei Überwachungen der Umweltradioaktivität verbessert und flussgebiets-, nutzungsarten-, fachrechts- und bodenfunktionsübergreifende Verknüpfungen herstellbar.

#### 4. Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Aus Sicht des medienübergreifenden Boden- und Gewässerschutzes besteht auf überregionaler Ebene weiterhin Bedarf nach harmonisierten und belastbaren Feststoffwerten für Nährstoff- bzw. flusseinzugsgebietspezifische Schadstoffgehalte und zur Einstufung prioritär gefährlicher Stoffe (z. B. Quecksilber und seine Verbindungen). Mit Hilfe bestverfügbarer Techniken gemäß geltender europäischer Richtlinienkompetenz, gewähren präzise ineinander überführbare Korngrößenanteile (Fraktionen und Gemische), zweifelsfrei eindeutig umgrenzte Feststoffwerte als UQN. Die darauf basierenden acht mineralischen Texturklassen sichern flächen- und tiefenbezogene kleinteilig vergleichende Betrachtungen nutzungsartenbezogener Flächen der Rechtsbereiche Finanzen und Wirtschaft zu übergreifenden Texturklassen betroffener größerer Flächen nach dem Umweltrecht (*Offenlegungsschrift* 2009, 6).



Figur 1: Die Vorrichtung im Längsschnitt (*Offenlegungsschrift* 2009, 13)

#### Literatur

- Mamede, G. L. (2008): Reservoir Sedimentation in Dryland Catchments: Modelling and management, I- XXII, 1-98.
- Offenlegungsschrift (2009): Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Korngrößenverteilung in mineralischen Feinböden und mineralischen Feinsedimenten. 10 2008 027 971 A 1 2009. 12. 24. Deutsches Patent- und Markenamt, 1-13.
- Ruppel, S. et al. (2011): Zusammenhang zwischen Stickstoffverfügung und mikrobieller Aktivität in der Rhizosphäre. Mitt. Agrarwissenschaften 19. Merbach, W. et al.,108- 115.

## 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 Bartussek, 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	<p>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</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 15.06	<p>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  Band 3 Poster, 280 Seiten  ISBN-10: 3 939057-31-2  ISBN-13: 978-3-939057-31-4</p>	<p>beide Vortragsbände zusammen 50 EUR  Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR</p>
Heft 16.06	<p>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</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 17.06	<p>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</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 18.06	<p>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  ISBN-13: 978-3-939057-57-4</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 19.07	<p>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</p>	48 EUR, CD 29 EUR

Heft 20.07	<p>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-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg          Band 1 Vorträge, 276 Seiten          Band 2 Poster, 17 Seiten          ISBN: 978-3-940173-04-1</p>	<p>beide Bände zusammen          60 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 21.07	<p>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</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 22.07	<p>EU-Hochwasserrichtlinie          Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz          Beiträge zum Seminar am 19./20. November 2007 in Koblenz          Herausgeber: Heribert Nacken          126 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-940173-44-7</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 23.08	<p>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-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg          300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD          ISBN: 978-3-940173-96-6</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 24.08	<p>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</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 25.09	<p>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</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 26.09	<p>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          ISBN: 978-3-941089-54-9</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>

Heft 27.10	<p>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</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 28.10	<p>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</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 29.10	<p>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          283Seiten, Format A4, mit Poster-CD          ISBN: 978-3-941897-49-6</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 30.11	<p>Hydrologie &amp; 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</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 31.12	<p>Wasser ohne Grenzen          Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012          an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg          Herausgeber: Markus Weiler          413 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-942964-38-8</p>	50 EUR

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 20 %