

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management



Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Die Zeitschrift Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) ist eine deutschsprachige Fachzeitschrift, die Themen der Hydrologie und Wasserwirtschaft umfassend behandelt. Sie bietet eine Plattform zur Veröffentlichung aktueller Entwicklungen aus Wissenschaft und operationeller Anwendung. Das Spektrum der Fachbeiträge sollte aus den folgenden Themenbereichen entstammen inklusive deren qualitativen, quantitativen sowie ökologischen Gesichtspunkten:

- Hydrologische Prozesse und Kreislaufgeschehen von Binnenund Küstengewässern
- Bewirtschaftung der Wasservorkommen
- Wasser- und Stoffflüsse, Gewässerschutz
- Ökologische Studien und Bewertungen
- Limnologische Untersuchungen

• Darstellung und Entwicklung von Grund- und Bodenwasser. Zur Veröffentlichung werden nur fachlich fundierte, originäre Artikel zu aktuellen Themen zugelassen. Ein Redaktionsausschuss sowie assoziierte Editoren, bestehend aus Hochschulvertretern, Vertretern des Bundes und der Länder, gewährleisten, dass nur qualitativ hochwertige Fachbeiträge veröffentlicht werden (peer review). Die HyWa enthält außerdem einen nachrichtlichen Teil, der über aktuelle Projekte und Studien aus Forschung und Praxis sowie neue Publikationen informiert.

Redaktionsausschuss (Stand: Dezember 2021)

Prof. Dr. Axel Bronstert, Universität Potsdam Prof. Dr.-Ing. Markus Disse, Technische Universität München Stephanie Gudat, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Prof. Dr. Bruno Merz, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam Dr. Volker Mohaupt, Umweltbundesamt Dr. Heike Puhlmann, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg Prof. Dr. Britta Schmalz, Technische Universität Darmstadt Dr. Natalie Stahl-van Rooiien, Bayerisches Landesamt für Umwelt Sebastian Wrede,

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie **Redaktion:**

Dr. Thomas Lüllwitz, Leitung, v.i.S.d.P. • redaktion@hywa-online.de • Telefon: 0261/1306-5879

Proofreading Englisch: ISL Übersetzungsbüro, 56068 Koblenz

Anschrift:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Am Mainzer Tor 1 • 56068 Koblenz • www.hywa-online.de

Verlagsrechte:

Die eingereichten Aufsätze und Kurzberichte müssen Originalarbeiten sein. Sie dürfen in der vorgelegten oder in ähnlicher Form weder an anderer Stelle eingereicht noch veröffentlicht sein. Mit der Annahme des Manuskripts geht das Recht der Veröffentlichung einschließlich sonstiger Vervielfältigung auf den Herausgeber über.

Hinweis:

Namentlich gekennzeichnete Artikel geben nicht unbedingt die Meinung der Redaktion und des Herausgebers wieder.

Erscheinungsweise:

zweimonatlich im Abo, 34,- €/Jahr, Studententarif 17,- € (gg. Nachweis) kündbar jeweils drei Monate vor Jahresende

Herausgeber:

BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und der Länder

Satz und Druck:

Druckerei des BMVI, Bonn ISSN 1439-1783 Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier The journal Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) (Hydrology and Water Resources Management) is a Germanlanguage periodical which comprehensively reports on hydrological topics. It serves as a platform for the publication of the latest developments in science and operational application. The range of contributions relates to the following subjects that are treated from qualitative, quantitative and ecological aspects

- hydrological processes and circulation of inland and coastal waters
- water resources management
- water and material fluxes, water protection
- ecological studies and assessment
- limnological investigations
- Description and processes of ground- and soilwater.

Only scientifically substantiated articles on current topics are selected for publication. An editing committee comprising representatives from universities, and from the Federal Republic and the Federal States guarantees that only high-quality contributions are published (peer review).

HyWa also contains a news section informing on current projects and studies in research and practice as well as on recent publications.

Assoziierte Editoren (Stand: Dezember 2021)

Prof. Dr.-Ing. Jens Bender, Duale Hochschule Baden-Württemberg Prof Dr Günter Blöschl Technische Universität Wien Prof. Dr. Markus Casper, Universität Trier Prof. Dr. Bernd Cyffka, Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt Norbert Demuth, Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz Dr. Svenja Fischer, Ruhr-Universität Bochum Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt, Universität Hannover Dr. Dr. Dietmar Mehl, biota GmbH Prof. Dr. Lucas Menzel, Universität Heidelberg Prof. Dr. Konrad Miegel, Universität Rostock Prof. Dr. Günter Meon, Technische Universität Braunschweig Prof. Dr. Elisabeth I. Meyer, Universität Münster Prof. Dr. Heribert Nacken, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Dr. Enno Nilson, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz Angela Pfister, Emschergenossenschaft Dr. Ina Pohle. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin Prof. Dr. Frido Reinstorf, Hochschule Magdeburg-Stendal Prof. Dr. Benny Selle, **Beuth Hochschule** Prof. Dr. Benedikt Toussaint, Taunusstein Prof. Dr. Markus Weiler, Universität Freiburg Prof. Dr. Rolf Weingartner, Universität Bern

Inhalt | Contents

Vorwort | Foreword

Hydrologische Vorhersagen – ein wichtiger Beitrag zum Schutz für die Bevölkerung	4

Fachartikel | Scientific reports

```
DOI: 10.5675/HyWa_2022.1_1
```

Ingo Haag, Julia Krumm, Dirk Aigner, Andreas Steinbrich & Markus Weiler	
Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM	
Simulation of floods caused by intense rain events with the water balance model LARSIM	6

Hydrologische Notizen | Hydrological notes

Aktuelles Latest news	28
Ausbildung Education	39
Projektberichte – Workshops – Konferenzen Projekt reports – Workshops – Conferences	40

Nachrichten | News

Deutsche Hydrologische Gesellschaft German Hydrological Society	50
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften Association for Hydrological Sciences	52
Neue Publikationen New publications	54
Termine Events	55

Jahresinhaltsverzeichnis 2021

Inhaltsverzeichnis Heft 1 bis 6, 65. Jahrgang 2021	56
--	----

Die Fachzeitschrift Hydrologie und Wasserbewirtschaftung ist gelistet im:

Science Citation Index Expanded (SCIE), Journal Citation Reports/Science Edition, Scopus und Geobase.

Hydrologische Vorhersagen – ein wichtiger Beitrag zum Schutz der Bevölkerung

Flusshochwasser und Sturzfluten können große Schäden anrichten und gefährden Menschenleben. Das verheerende Eifel-Hochwasser vom 14./15. Juli 2021 und Sturzfluten wie in Simbach und Braunsbach 2016 haben uns diese Tatsache mit erschreckender Deutlichkeit vor Augen geführt. Zudem ist zu erwarten, dass sich die Gefahr durch Hochwasser und Sturzfluten im Zuge des Klimawandels noch weiter verschärft. Allen Verantwortlichen ist klar, dass mit technischem Hochwasserschutz alleine keine hundertprozentige Sicherheit zu erreichen ist. Für den Schutz der Bevölkerung sind daher neben technischen Hochwasserschutzmaßnahmen zuverlässige Systeme aus operationellen Echtzeitvorhersagen, Warnungen und Notfallplänen notwendig. Ein zentraler, unverzichtbarer Baustein solcher Warnsysteme sind möglichst verlässliche hydrologische Abflussvorhersagen.

Die hydrologischen Vorhersagen sind dabei selbstverständlich im Zusammenspiel mit meteorologischen Eingangsdaten und hydraulischen Berechnungen zu sehen. Hydrologische Modelle werden von meteorologischen Eingangsdaten angetrieben, wobei im Hochwasserfall naturgemäß der Niederschlag am wichtigsten ist. Ein gut funktionierendes operationelles Niederschlagsmessnetz sowie Radarprodukte und Niederschlagsvorhersagen mit ausreichender Genauigkeit sind daher eine notwendige Voraussetzung für verlässliche Abflussvorhersagen.

Allerdings führt nicht jeder ergiebige Niederschlag zu einem extremen Hochwasser und nicht jedes Starkregenereignis zu einer Sturzflut. Vielmehr ist es die originäre Aufgabe der Hydrologie bzw. des hydrologischen Modells, die resultierende Abflussreaktion vorherzusagen.

Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsmechanismen und Reaktionszeiten muss zwischen Vorhersagen von Flusshochwassern und Vorhersagen für Sturzflutwarnungen differenziert werden. Flusshochwasser entstehen in der Regel durch großräumige, ergiebige Niederschläge und sind durch Überschwemmungen entlang der Flussläufe charakterisiert. Die Reaktions- und Warnzeiten liegen je nach Ereignis und Größe des Einzugsgebiets in der Regel zwischen einigen Stunden und mehreren Tagen. Für die hydrologische Vorhersage von Flusshochwassern gibt es bereits etablierte Systeme. So wird das im vorliegenden Heft von HAAG et al. (2022) besprochene Modell LARSIM in mehreren Bundesländern und im benachbarten Ausland für die operationelle Vorhersage von Flusshochwassern genutzt, unter anderem in Rheinland-Pfalz und in Luxemburg (BREMICKER et al., 2013).

Das Hochwasser vom Juli 2021, welches an der Ahr und an vielen anderen Flüssen der Eifel und der Ardennen zum Teil verheerende Auswirkungen hatte, war kein klassisches, großräumiges Flusshochwasser, wie wir es von Donau, Elbe oder Rhein kennen. So können die auslösenden Niederschläge für die Dauerstufe von sechs Stunden als Starkregen klassifiziert werden. Zudem trug neben rein sättigungsbedingten Abflussreaktionen vermutlich auch Infiltrationsüberschuss zum Hochwasserabfluss bei und auch in kleinen Einzugsgebieten kam es zu massiven Überflutungen. Der Großteil der Überschwemmungen mit Reaktionszeiten von einigen Stunden trat aber entlang mittelgroßer Flüsse wie der Ahr auf, weshalb das Ereignis zumindest teilweise als Flusshochwasser einzuordnen ist. Entsprechend wurden die bestehenden operationellen LARSIM-Vorhersagesysteme in Rheinland-Pfalz und Luxemburg auch beim Juli-Hochwasser 2021 eingesetzt. Auf Basis dieser operationellen hydrologischen Vorhersagen wurde von den zuständigen Institutionen vor dem extremen Hochwasser gewarnt (RHEIN-ZEITUNG, 2021; DER SPIEGEL, 2021; AGE, 2021; LUXEMBURGER WORT, 2021).

Wenngleich das Juli-Hochwasser 2021 kein ausschließliches bzw. klassisches Flusshochwasser war, verdeutlicht das Beispiel, dass für die operationelle Vorhersage von Flusshochwassern bereits adäquate hydrologische Modelle im Einsatz sind, die mit kurzen Berechnungszeiten Echtzeitvorhersagen des zu erwartenden Abflusses liefern. Entscheidend für die Gefährdung der Bevölkerung sind letztlich allerdings die mit dem vorhergesagten Scheitelabfluss einhergehenden Fließwege, überschwemmten Bereiche und Fließgeschwindigkeiten. Im Ernstfall müssen die Entscheidungsträger also zusätzlich wissen, welche Überschwemmungen und Fließwege bei den vorhergesagten Abflüssen (zuzüglich eines Unsicherheitsbereichs) zu erwarten sind. Dies kann über die Verknüpfung der Abflüsse mit den Ergebnissen hydraulischer Berechnungen erreicht werden, welche z. B. in Hochwassergefahrenkarten und zugehörigen Datensätzen hinterlegt sein können. Dabei ist es empfehlenswert, auch die Auswirkungen hydraulisch ungünstiger Eventualitäten auf zu erwartende Fließwege und Wasserstände vorab zu bestimmen und den Entscheidungsträgern zugänglich zu machen (z. B. Verklausung von Brücken).

Im Gegensatz zu Flusshochwassern sind Sturzfluten meist kleinräumige Ereignisse mit kurzen Reaktionszeiten, die durch Starkregen von meist kurzer Dauerstufe, Infiltrationsüberschuss und daraus resultierendem Oberflächenabfluss geprägt sind. Die größte Gefahr geht dabei in der Regel von wild abfließendem Wasser außerhalb der Gewässerläufe aus. Sturzfluten führen naturgemäß aber auch zu Hochwasserabflüssen von Bächen und Flüssen, in deren Einzugsgebiet sie auftreten. Aufgrund der Kleinräumigkeit, der hohen Niederschlagsintensität und der kurzen Reaktionszeiten sind Sturzfluten nochmals deutlich schwerer vorherzusagen als Flusshochwasser. Entsprechende Systeme zur operationellen hydrologisch basierten Warnung vor Sturzfluten sind daher bislang kaum bekannt. Rein niederschlagsbasierte Warnungen können solche hydrologischen Systeme nicht ersetzen, da nicht jeder Starkregen zu einer Sturzflut führt.

Die im vorliegenden Heft von HAAG et al. (2022) dargestellte Weiterentwicklung von LARSIM ist ein wichtiger Schritt hin zur möglichen kurzfristigen Vorhersage von Sturzfluten. Dabei ist ein Wasserhaushaltsmodell mit vereinfachter Abbildung der Abflusskonzentration natürlich nicht in der Lage, die Fließwege wild abfließenden Wassers von Sturzfluten wie in Simbach oder Braunsbach vorherzusagen. Bei ausreichender Genauigkeit des Niederschlagsinputs ist es aber möglich, die Abflussreaktion kleinerer Gewässer vorherzusagen und statistisch einzuordnen. Darauf basierend kann dann vor der akuten Gefahr einer Sturzflut im Einzugsgebiet des Gewässers gewarnt werden. Auch hier muss dann bei der hydraulischen Interpretation der hydrologischen Warnungen auf bestehende hydraulische Berechnungen z. B. aus Starkregengefahrenkarten zurückgegriffen werden.

Bei der konkreten Ausgestaltung eines solchen Systems zur operationellen hydrologisch basierten Warnung vor Sturzfluten sind zweifellos noch einige Probleme zu lösen. So müssen unter anderem Wege zum Umgang mit den sehr kurzen Vorwarnzeiten und der Unsicherheit bei der vorhergesagten räumlichen Lage der Niederschlagszelle gefunden werden. Zudem kann auch auf Seiten der hydrologischen Modelltechnik derzeit noch nicht davon ausgegangen werden, dass Sturzflutvorhersagen ähnlich verlässlich sind wie die Vorhersagen für Flusshochwasser, zumal nur relativ wenige Beobachtungsdaten zur Validierung der Modelle vorliegen. Die Grundvoraussetzungen für eine hydrologisch basierte Warnung vor Sturzfluten sind jedoch vorhanden. Diese Voraussetzungen sollten genutzt und vor allem hinsichtlich der hydrologischen Modellansätze und deren Parametrisierung sowie der radarbasierten Niederschlagsvorhersagen weiterentwickelt werden.

Operationelle hydrologische Abflussvorhersagen sind von zentraler Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung vor Flusshochwassern und Sturzfluten. Die operationelle Vorhersage von Flusshochwassern ist in vielen Ländern bereits etabliert. Zum bestmöglichen Schutz der Bevölkerung sollten diese Vorhersagen kontinuierlich optimiert und bestmöglich in die Warnsysteme integriert werden. Operationelle hydrologisch basierte Warnsysteme für Sturzfluten müssen hingegen erst noch aufgebaut werden. Wenngleich in diesem Bereich noch erhebliche Verbesserungspotenziale vorhanden sind, stehen die grundlegenden modelltechnischen Voraussetzungen für eine operationelle hydrologische Warnung vor Sturzfluten zur Verfügung. Unseres Erachtens ist es eine wichtige gemeinsame Aufgabe von Wissenschaft und Praxis, die vorhandenen Grundlagen zu nutzen und zukünftig hydrologische Vorhersagen für die Warnung vor Sturzfluten aufzubauen.

> Dr. Ingo Haag, Julia Krumm, Dirk Aigner HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe

Prof. Dr. Markus Weiler, Andreas Steinbrich Professur für Hydrologie der Universität Freiburg

Literaturverzeichnis

- AGE ADMINISTRATION DE LA GESTION DE L'EAU, LUXEMBOURG (2021): Hochwasserereignis Juli 2021. Präsentation zur Pressekonferenz des Umweltministeriums Luxemburg vom 19.07.2021. Online abrufbar über https://eau.gouvernement.lu/fr/actualites/2021/07-juillet/ Hochwasserereignis2021.html.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. & I. HAAG (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (9), 509–519.
- DER SPIEGEL (2021): Rekonstruktion der Flutwarnungen. Drei Stunden, die Leben kosteten. Artikel in DER SPIEGEL, Hamburg (Annette Großbongardt, Dietmar Hipp und Roman Lehberger) vom 06.08.2021. Online abrufbar über https://www.spiegel.de/politik/ deutschland/flut-warnungen-im-kreis-ahrweiler-drei-stunden-dieleben-kosteten-a-aa7e6e2c-0002-0001-0000-000178686057.
- HAAG, I., KRUMM, J., AIGNER, D., STEINBRICH, A. & M. WEILER (2022): Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 66, (1). DOI: 10.5675/HyWa_2022.1_1.
- LUXEMBURGER WORT (2021): Chronik eines Hochwassers. "Ein Winterhochwasser im Sommer". Artikel in LUXEMBURGER WORT, Luxembourg (Maximilian Richard) vom 19.07.2021. Online abrufbar über https://www.wort.lu/de/lokales/ein-winterhochwasser-im-sommer-60f577aede135b923672c762.
- RHEIN-ZEITUNG (2021): Landesamt warnte vor Jahrhunderthochwasser. Artikel in der Rhein-Zeitung, Koblenz (Christian Kunst/dpa) vom 21.07.2021.

Ingo Haag, Julia Krumm, Dirk Aigner, Andreas Steinbrich & Markus Weiler

Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Simulation of floods caused by intense rain events with the water balance model LARSIM

Das in der Hochwasservorhersage und -frühwarnung bislang bereits erfolgreich eingesetzte Wasserhaushaltsmodell LARSIM wurde mit dem Infiltrationsmodul des Modells RoGeR ergänzt, um Infiltrationsüberschuss bei Starkregen und daraus resultierende (lokale) Hochwasser realistischer abbilden zu können. Mit dem dynamischen Ansatz wird die Infiltration über die Bodenmatrix, über Makroporen und über Trockenrisse mithilfe der physikalisch basierten Green-Ampt-Approximation räumlich sehr hoch aufgelöst simuliert. Die großräumige und zugleich flächendifferenzierte Parametrisierung des Infiltrationsmoduls kann auf der Basis mittelmaßstäblicher Bodenkarten und der Landnutzung analog zum Vorgehen in RoGeR erfolgen. Zunächst wurde eine entsprechende Parametrisierungsstrategie für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg abgleitet und umgesetzt. Diese wurde dann auf Gebiete mit anderen Datengrundlagen übertragen. Das Infiltrationsmodul, die Parametrisierungsstrategie und deren Übertragbarkeit wurden anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf mesoskaligen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Luxemburg validiert. Im Vergleich zur bisherigen Modellkonfiguration führte die Berücksichtigung des Infiltrationsmoduls für alle sieben Starkregenereignisse zu klaren Verbesserungen bei der Simulation der Abflussreaktion. Bei ausreichender Qualität des Niederschlagsinputs konnten die zumeist durch Horton-Oberflächenabfluss dominierten Ereignisse mit den LARSIM-Modellen hinsichtlich Volumen und Scheitel gut nachgebildet werden. Dies belegt die grundsätzliche Eignung des Infiltrationsmoduls und deutet darauf hin, dass die robuste Parametrisierungsstrategie auf Gebiete mit unterschiedlichen Datengrundlagen übertragen werden kann. Mit den erfolgreichen Weiterentwicklungen wurde somit eine wichtige Grundlage für die Vorhersage lokaler Hochwasser in Folge von kleinräumigem Starkregen geschaffen. Die Analysen verdeutlichen aber auch, dass Unsicherheiten im Radarniederschlag üblicher Weise zu Über- oder Unterschätzungen des resultierenden Abflusses um den Faktor zwei führen können. Zudem ist es wünschenswert, LARSIM so weiterzuentwickeln, dass das gleichzeitige Auftreten von Horton-Oberflächenabfluss und sättigungsbedingten Abflussreaktionen zukünftig besser abgebildet werden kann. Ein Augenmerk zukünftiger Arbeiten sollte daher sowohl auf der Weiterentwicklung von LARSIM wie auch auf der weiteren Verbesserung von Radar-Produkten und Niederschlagsvorhersagen liegen.

Schlagwörter: Starkregen, pluviale Hochwasser, fluviale Hochwasser, Horton-Oberflächenabfluss, LARSIM, Wasserhaushaltsmodell

The distributed water balance model LARSIM has been successfully used for real-time forecasting of fluvial floods for two decades. In order to improve the simulation of infiltration excess, Horton Overland Flow (HOF) and (local) pluvial floods due to intense rainfall, LARSIM was amended by the infiltration module of the research model RoGeR. The newly introduced infiltration module accounts for matrix infiltration as well as infiltration via macropores and shrinkage cracks by applying the physically based Green-Ampt approximation. First, we derived an approach to parameterize the infiltration module with a high spatial resolution on the basis of a digital soil map and land use data for the federal state of Baden-Württemberg. Secondly, this approach was transferred to regions in North-Rhine Westphalia and Luxembourg using different soil data. The infiltration module and the parametrization approaches were evaluated using seven intense rain events in five different mesoscale catchments in Baden-Württemberg, North-Rhine Westphalia and Luxembourg. Introducing the infiltration module improved simulation results for all seven mainly HOF dominated events. When using sufficiently accurate rain input, the measured discharges of the events (volume and peak) could generally be reproduced well with the model. These findings suggest that the infiltration module as well as the parametrization approach are broadly valid, transferable and robust. The successful model improvement lays an important foundation for a possible future real-time forecasting of pluvial floods. However, our investigations also showed that the uncertainty of radar based rain may typically cause under- or overestimations of the resulting discharge by a factor of up to two. Moreover, LARSIM should be further improved with respect to simulating the simultaneous occurrence of HOF and saturation driven runoff. Consequently, besides further refining LARSIM, the quantitative estimation and forecasting of precipitation with weather radar also needs to be further improved in order to enhance the simulation and prediction of floods caused by intense rain events.

Keywords: Intense rainfall, pluvial flood, fluvial flood, Horton Overland Flow, LARSIM, water balance model

1 Einleitung

Das Wasserhaushaltsmodell (WHM) LARSIM dient unter anderem als Werkzeug zur Analyse und Vorhersage von Hochwasser. In mehreren deutschen Bundesländern sowie in mehreren Behörden in Frankreich, Luxemburg, der Schweiz und Österreich wird LARSIM standardmäßig seit vielen Jahren erfolgreich zur operationellen Hochwasservorhersage und -frühwarnung eingesetzt (BREMICKER, 2000; BREMICKER et al., 2006; 2011; 2013; GERLINGER & DEMUTH, 2001; LUCE et al., 2006; VOGELBACHER, 2006; BRAHMER, 2010; BARTELS et al., 2017; HAAG et al., 2019a). Das Modell wird im Auftrag der LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG) kontinuierlich im Hinblick auf diesen Einsatz weiterentwickelt. In der Vergangenheit wurde das Modell dabei vor allem zur Simulation von Flusshochwasser (fluvial floods) angewendet und entwickelt. Diese Hochwasser werden in der Regel durch großflächige, langanhaltende Niederschläge ausgelöst, welche zu einer Aufsättigung der Böden in den Einzugsgebieten führen. Prozesse, welche zur Entstehung solcher Flusshochwasser führen, sind folglich im WHM LARSIM mit ausreichendem Detailgrad berücksichtigt (LEG, 2020).

In den letzten Jahren kam es in Deutschland zu einer Häufung von Überschwemmungen in Folge von kleinräumigen, konvektiven Niederschlagsereignissen, die erhebliche Schäden verursachten (BBK, 2015). Wenngleich die bisher beobachtete Entwicklung kurzer, sommerlicher Starkregen in Deutschland noch keine eindeutigen Schlüsse hinsichtlich einer möglichen Verschärfung zulässt, wird davon ausgegangen, dass solche Ereignisse vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit verbundenen Temperaturzunahme zukünftig noch häufiger und intensiver werden könnten (DWD, 2016). Überschwemmungen oder Hochwasser in Folge von kleinräumigen Starkregen (pluvial floods) zeichnen sich u. a. durch eine kurze Entstehungszeit aus und können auch entlang der Bachläufe in kleinen Einzugsgebieten ein großes Schadenspotenzial haben. Dementsprechend besteht ein großes Interesse daran, solche Ereignisse auch in operationellen hydrologischen Modellen bestmöglich abzubilden, um zukünftig entsprechende Vorhersagen zu ermöglichen. Die für die Entstehung von Hochwassern in der Folge von Starkregen verantwortlichen hydrologischen Prozesse und die relevanten zeitlichen und räumlichen Skalen unterscheiden sich jedoch deutlich von denen eines Flusshochwassers (BORGA et al., 2011; HAPUARACHCHI et al., 2011). Vor diesem Hintergrund wurde das bislang vor allem für Flusshochwasser genutzte WHM LARSIM weiterentwickelt, um auch die Abflussreaktion auf Starkregen adäquat abzubilden (LUBW, 2019).

Im vorliegenden Artikel werden die modelltechnischen Grundlagen dieser Weiterentwicklung sowie die großräumige flächendifferenzierte Parametrisierungsstrategie für das neue Infiltrationsmodul in LARSIM erläutert. Anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Luxemburg und Nordrhein-Westfalen wird die Wirkung der Weiterentwicklung sowie die Übertragbarkeit der Parametrisierungsstrategie auf Gebiete mit unterschiedlichen Datengrundlagen überprüft. Da der Niederschlag großen Einfluss auf die Abflussreaktion bei Starkregen hat, wird zudem die mögliche Auswirkung der Unsicherheit der verwendeten Radarniederschläge bewertet.

2 Modelltheorie und Parametrisierung

2.1 Grundlegende Funktionsweise von LARSIM

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) wurde von BREMICKER (2000) auf Basis des Flussgebietsmodells FGMOD (LUDWIG, 1982) entwickelt. In den letzten 20 Jahren wurde LARSIM mit dem Fokus auf den operationellen Vorhersagebetrieb im Auftrag der länderübergreifenden LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG) kontinuierlich weiterentwickelt (BREMICKER et al., 2013). Die Funktionsweise des modular aufgebauten Modells ist in LEG (2020) detailliert beschrieben.

LARSIM ist ein prozessorientiertes, räumlich verteiltes Wasserhaushaltsmodell. Beim Aufbau eines LARSIM-Modells werden die Flussgebiete zunächst in Teilgebiete (TGB) unterteilt, die über die Fließvernetzung miteinander verknüpft sind. Die TGB können entweder als reale hydrologische Teil-Einzugsgebiete oder als Raster aufgebaut sein (Abb. 1). In den räumlich hoch aufgelösten operationellen Modellen der Bundesländer haben diese LARSIM-TGB häufig eine Größe von ca. 1 km² (BREMICKER et al., 2013). Die Berechnung von Abflusskonzentration und Wellenablauf im Gerinne erfolgt auf der räumlichen Ebene der TGB. Die Abflusskonzentration wird dabei in der Regel durch vier unterschiedlich schnell reagierende, parallele Einzellinearspeicher abgebildet, welche die Abflusskomponenten Basisabfluss, Interflow, langsamer Direktabfluss und schneller Direktabfluss repräsentieren (Abb. 2 und LEG, 2020). Der zeitliche Verlauf der Abflusskon-



Abbildung 1

Grundlegende räumliche Struktur eines LARSIM-Modells mit TGB-Aufteilung in hydrologische Teil-Einzugsgebiete (Teil-EZG, links oben) bzw. Raster (links unten) sowie Unterteilung eines Teil-Einzugsgebiets (rechts oben) bzw. Raster (rechts unten) in UTGB, welche durch die unterschiedlichen Farben repräsentiert werden.

Spatial structure of LARSIM water balance model with discretization into hydrological sub-catchments (Teil-EZG, left top) or grid cells (Raster, left bottom) and discretization of a sub-catchment (right top) or grid cell (right bottom) into hydrological response units (HRU, UTGB), which are represented by the different colors.

zentration wird dabei durch Rückhaltekonstanten gesteuert, deren Werte durch Kalibrierung ermittelt werden müssen. Die Rückhaltekonstante für die Abflusskonzentration des bei Starkregen relevanten schnellen Direktabflusses wird über den Parameter EQD2 festgelegt bzw. kalibriert (Abb. 2; HAAG et al., 2016; LEG, 2020).

Jedes TGB wird wiederum in hydrologisch ähnlich reagierende Unter-Teilgebiete (UTGB) gegliedert, die auch als Hydrotope oder Hydrological Response Units (HRU) bezeichnet werden. Diese in der Regel wenige Hektar großen UTGB sind durch eine einheitliche Landnutzung und vergleichbare Bodeneigenschaften definiert (Abb. 1).

Auf der räumlichen Ebene der UTGB werden die Schneedynamik, die Interzeption, die Evapotranspiration (i. d. R. nach Penman-Monteith) sowie der Bodenwasserhaushalt und die Abflussbildung simuliert. Die Simulation von Evapotranspiration, Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung basiert dabei auf dem UTGB-spezifischen LARSIM-Bodenspeicher, der das effektive Porenvolumen [mm] repräsentiert. Das effektive Porenvolumen wird wiederum in die Luftkapazität (LK) und die nutzbare Feldkapazität (nFK) unterteilt. Die LK wird über vertikale Tiefenversickerung zum Basisabfluss und/oder laterale Drainage zum Interflow rasch entleert. Die nFK wird nicht bzw. nur sehr langsam über vertikale Tiefenversickerung zum Basisabfluss entleert und steht somit langfristig für die Evapotranspiration zur Verfügung. Mit einem optionalen UTGB-spezifischen vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert (VDB) kann berücksichtigt werden, dass die Tiefenversickerung beim Vorliegen hydraulisch schlecht durchlässiger Bodenhorizonte reduziert wird. Für grundwassernahe UTGB kann optional zudem der kapillare Aufstieg (kapA) in den Bodenspeicher abgebildet werden (Abb. 2 und LEG, 2020).



Abbildung 2

Schematische Struktur der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (schwarz = bisherige Modellstruktur, grau = optionale Komponenten; grün = hier beschriebenes neues Infiltrationsmodul).

Schematic structure of LARSIM water balance model (black = existing model structure, gray = optional components; green = newly introduced infiltration module described in this article).

In den operationellen LARSIM-Modellen wird die schnelle Abflussreaktion (Direktabfluss) i. d. R. mit dem nach TODINI (1996) modifizierten Xinanjang-Verfahren (ZHAO, 1977) abgebildet, bei dem der Anteil des Direktabflusses am Wasserdargebot eine nichtlineare Funktion der aktuellen Füllung des Bodenspeichers ist (BEVEN, 2012). In LARSIM wird das Verfahren als Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF) oder Preferential Flow Function (PFF) bezeichnet. Der über die BSF ermittelte Direktabfluss wird mittels des Parameters A2 nochmals in den sogenannten langsamen Direktabfluss und den schnellen Direktabfluss aufgeteilt. Dabei ist A2 ein einfacher Schwellenwert in Form einer Rate [mm/h]. Solange die Rate des durch die BSF gebildeten gesamten Direktabflusses kleiner als A2 ist, wird der gesamte Direktabfluss als langsamer Direktabfluss abgeführt. Übersteigt die aktuelle Rate des gesamten Direktabflusses den Schwellenwert A2, so wird der Anteil, der über A2 hinausgeht, als schneller Direktabfluss abgeführt (Abb. 2 und LEG, 2020). Direktabfluss wird in LARSIM somit bislang mit einem konzeptionellen Ansatz ermittelt, welcher vorrangig von der Bodenfeuchte abhängig ist. Vor allem die Quantifizierung des schnellen Direktabflusses erfolgt dabei über einen sehr einfachen Schwellenwertansatz, bei dem A2 durch Kalibrierung ermittelt werden muss.

2.2 Implementierung des Infiltrationsmoduls

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Modellstruktur wurde in den letzten 20 Jahren erfolgreich für die Simulation und Vorhersage von Flusshochwassern in der Folge von ergiebigen Niederschlags- und/oder Schneeschmelzereignissen eingesetzt (BREMICKER, 2000; BREMICKER et al., 2006; 2011; 2013; GERLINGER & DEMUTH, 2001; LUCE et al., 2006; VOGELBACHER, 2006; BRAHMER, 2010; BARTELS et al., 2017; HAAG et al., 2019a). Der Fokus der Anwendung lag bisher jedoch nicht auf lokalen Hochwassern durch kleinräumige Starkregen. Nach den verheerenden Überschwemmungen in Folge von Starkregen in den letzten Jahren wurde das Modell daher weiterentwickelt, um auch diese (lokalen) Hochwasser, die primär aus Infiltrationsüberschuss bzw. Horton-Oberflächenabfluss (HOF) resultieren, bestmöglich abzubilden. Als hierfür sehr gut geeigneter Ansatz wurde das physikalisch basierte Infiltrationsmodul des Niederschlag-Abflussmodells RoGeR (Runoff Generation Research) identifiziert, das an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelt wurde (STEINBRICH et al., 2016) und für das Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg die Grundlagen zur Berechnung der Oberflächenabflusskennwerte bildet (LUBW, 2016). Nachfolgend werden die Grundlagen dieses Ansatzes und seiner Implementierung in das bestehende LARSIM Bodenmodul sowie eine ergänzende einfache Berücksichtigung der Verschlämmung auf Ackerflächen erläutert.

Die mathematische Abbildung der Infiltration entspricht der im Modell RoGeR (STEINBRICH et al., 2016). Dabei ist das Infiltrationsmodul in LARSIM dem eigentlichen Bodenmodul vorgeschaltet. Der Anteil des Wasserdargebots, der die aktuelle dynamisch simulierte Infiltrationskapazität überschreitet, wird als Infiltrationsüberschuss ausgewiesen und über den schnellen Direktabfluss abgeführt. Der so ausgewiesene schnelle Direktabfluss kann somit als HOF interpretiert werden. Nur der infiltrierende Anteil gelangt in das Bodenmodul und wird dort genauso weiter behandelt wie ohne Infiltrationsmodul. Für die in der vorliegenden Studie durchgeführten Berechnungen wurde der Schwellenwert A2 deaktiviert, sodass der gesamte über die BSF ermittelte Direktabfluss als langsamer Direktabfluss abgeführt



Abbildung 3

Schematische Darstellung der im Infiltrationsmodul berücksichtigten Prozesse.

Schematic representation of processes taken into account by the infiltration module.

wird. Der schnelle Direktabfluss umfasst somit nur den Horton-Oberflächenabfluss (Abb. 2). Für die Berechnung der Gesamt-Infiltration werden die drei Teilprozesse der Matrix-Infiltration, der Infiltration über Makroporen und ggf. der Infiltration über Trockenrisse berücksichtigt (Abb. 3). In LARSIM wird dabei zusätzlich die infiltrationsmindernde Wirkung der Verschlämmung auf Ackerflächen vereinfacht mit einbezogen. Die Anwendung des Infiltrationsmoduls bedingt, dass kein schneller Direktabfluss gebildet wird, solange die aktuelle Infiltrationskapazität höher ist, als die aktuelle Intensität des Wasserdargebots. Überschreitet die aktuelle Intensität des Wasserdargebots jedoch die dynamisch berechnete aktuelle Infiltrationskapazität, so kommt es zu Infiltrationsüberschuss und in der Folge zu einer schnellen Abflussreaktion.

2.2.1 Parameter und Anfangsbedingungen

Für die physikalisch basierte Berechnung der Infiltration über Matrix, Makroporen und Trockenrisse werden für jedes Unter-Teilgebiet (UTGB) die in Tabelle 1 aufgeführten Infiltrationsparameter berücksichtigt (STEINBRICH et al., 2016). Zur vereinfachten Berücksichtigung der infiltrationsmindernden Wirkung von Verschlämmung kann in LARSIM zusätzlich ein bodenartspezifischer Faktor für die Verschlämmungsneigung (VF) angegeben werden (Tab. 1).

Für die Parametrisierung der Makroporen ist neben der UTGBspezifischen Makroporendichte MP_{dichte} und der Makroporenlänge MP_{laenge} aus Tabelle 1 zusätzlich ein Makroporendurchmesser MP_{dm} erforderlich. Analog zum Ansatz in RoGeR wird hierfür vereinfachend angenommen, dass alle Makroporen einen Durchmesser von MP_{dm} = 5 mm haben, da dies dem typischen Wert für Regenwurmgänge entspricht (ausführliche Diskussion siehe STEINBRICH et al., 2016: S. 5).

Aus der Makroporendichte MP_{dichte} wird der Anteil der Landoberfläche berechnet, der in Makroporen entwässern kann (MP_{ant}). Der in WEILER (2001) für zehn Wertepaare explizit bestimmte Zusammenhang zwischen MP_{dichte} und MP_{ant} wird in LARSIM durch folgende Funktion beschrieben (LUBW, 2019):

$$MP_{ant} = 1 - exp\left(-\left(\frac{MP_{dichte}}{82}\right)^{0.887}\right)$$
(1)

mit:

MP_{ant}	[-]	Flächenanteil, der in die Makroporen ent-
		wässern kann
MP _{dicht}	e [Anzahl/m²]	Anzahl der Makroporen je Quadratmeter

Tabelle 1 UTGB-spezifische Parameter des Infiltrationsmoduls. HRU specific parameters of the infiltration module			
Parameter	Einheit	Beschreibung	
ks	[mm/h]	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.	
nEK	[04]	Nutzbare Feldkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent.	
	[90]	Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P _{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.	
I.K.	[06]	Luftkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent.	
LN _{Vol}	[70]	Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P _{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.	
wsf	[mm]	Saugspannung an der Sättigungsfront. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes, i. d. R. als Funktion der Textur.	
МО	[Anzahl/m ²]	Anzahl vertikaler Makroporen je m ² zur Ermittlung des Flächenanteils, der in Makroporen entwässert	
NIP dichte	[Anzani/m]	(MP _{ant} , Gleichung 1) und zur Berechnung der Infiltration über Makroporen.	
MP _{laenge}	[mm]	Durchschnittliche Länge (Tiefe) der vertikalen Makroporen zur Berechnung der Infiltration über Makroporen.	
тр	[mm]	Maximale Tiefe der Trockenrisse bei Wassergehalten kleiner/gleich der Schrumpfungsgrenze zur Berechnung	
In _{tiefe_max}		der Infiltration über Trockenrisse.	
AugrC #100	[0/ mEK]	Wassergehalt bei der Ausrollgrenze als Prozent der nFK.	
AusiGi100		Parameter zur dynamischen Berechnung der aktuellen Trockenrisstiefe als Funktion der Bodenfeuchte.	
SchrGr100	[04 pEK]	Wassergehalt bei der Schrumpfungsgrenze als Prozent der nFK.	
Schiditoo		Parameter zur dynamischen Berechnung der aktuellen Trockenrisstiefe als Funktion der Bodenfeuchte.	
VE		Faktor zur Reduktion der Infiltrationskapazität bei maximaler Verschlämmung.	
		Zulässiger Wertebereich 0 – 1, i. d. R. als Funktion der Textur.	

Der Anteil der Fläche, welcher Anschluss an Makroporen hat, nimmt also nichtlinear mit der Makroporendichte zu. Bei den für die unterschiedlichen Landnutzungen typischen Werten von 75, 100 bzw. 150 Makroporen je Quadratmeter (Tab. 2) sind also ca. 60 %, 70 % bzw. 82 % der Oberfläche an Makroporen angeschlossen.

Für die Parametrisierung der Trockenrisse ist neben der UTGBspezifischen maximalen Trockenrisstiefe TR_{tiefe_max} auch eine Annahme zur räumlichen Dichte der Trockenrisse erforderlich. Analog zu RoGeR wird davon ausgegangen, dass die Trockenrisse unabhängig von sonstigen Bodeneigenschaften ein regelmäßiges Gitter ausbilden, in dem die einzelnen Trockenrisse einen Abstand von 20 cm voneinander haben. Entsprechend ergibt sich eine Trockenrissdichte TR_{str} von 10 m/m² (Diskussion zur Herleitung siehe STEINBRICH et al., 2016: S. 5 – 6).

Zu Beginn eines Ereignisses werden als Anfangsbedingungen zur Berechnung der Infiltration 1) die aktuelle effektive Porosität im Oberboden P_{eff} in Volumenanteilen [-] und 2) die aktuelle tatsächliche Tiefe der Trockenrisse TR_{tiefe} [mm] bestimmt. P_{eff} ergibt sich aus der Summe der zu Ereignisbeginn freien nFK_{Vol} und der LK_{Vol} des Oberbodens. Wie im Modell RoGeR wird davon ausgegangen, dass im Oberboden immer mindestens die Luftkapazität LK zur Verfügung steht. Hinsichtlich der aus dem nFK-Anteil der Poren ggf. zusätzlich verfügbaren P_{eff} wird vereinfachend angenommen, dass die aktuelle Bodenfeuchte des Gesamtbodenspeichers repräsentativ für die aktuelle Feuchte des Oberbodens ist (LUBW, 2019).

Zur Ermittlung der aktuellen Tiefe der Trockenrisse TR_{tiefe} bei Ereignisbeginn werden die entsprechenden UTGB-spezifischen Parameter aus Tabelle 1 und die aktuelle Füllung des Bodenspeichers (Bodenfeuchte) herangezogen. Wenn die aktuell simulierte Bodenfeuchte größer/gleich der Bodenfeuchte bei der Ausrollgrenze (AusrGr100) ist, liegen keine Trockenrisse vor. Ist die aktuelle Bodenfeuchte kleiner/gleich der Bodenfeuchte bei der Schrumpfungsgrenze (SchrGr100), haben die Trockenrisse ihre maximale Tiefe (TR_{tiefe_max}). Liegt die aktuelle Bodenfeuchte zwischen den beiden Grenzwerten, wird die Trockenrisstiefe TR_{tiefe} linear zwischen Null und TR_{tiefe_max} interpoliert (LUBW, 2019). Die tatsächliche aktuelle Tiefe der Trockenrisse bleibt während des Ereignisses konstant. Die tatsächlich infiltrationswirksame Tiefe wird während des Ereignisses jedoch durch die von oben vorrückende Matrix-Infiltrationsfront verkürzt (siehe unten).

2.2.2 Matrix-Infiltration

Die vertikale Infiltration über die Bodenmatrix wird über den Ansatz von GREEN & AMPT (1911) unter Berücksichtigung variabler Niederschlagsintensitäten nach PESCHKE (1985) abgebildet. Die physikalisch basierte Green-Ampt-Approximation geht von einer gleichförmigen Sättigungsfront aus, an welcher eine texturspezifische Saugspannung wirkt. Die Infiltrationsrate der Bodenmatrix hängt neben dieser Saugspannung an der Sättigungsfront (wsf) von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens (ks), dem effektiven Porenvolumen (P_{eff}) zu Beginn des Ereignisses (Anfangsbedingung) und der Niederschlagsintensität ab. Bis zu dem Zeitpunkt, zu dem eine Sättigung der Bodenmatrix an der Oberfläche auftritt, kann das gesamte Wasserdargebot über die Matrix infiltrieren. Der Sättigungszeitpunkt (ts in [h]) sowie die bis dahin infiltrierte Wassermenge (Fs in [mm]) wird mithilfe der Gleichungen 10 und 12 in PESCHKE (1985) berechnet. Für alle darauffolgenden Zeitschritte lässt sich die kumulierte potenzielle Matrix-Infiltration wie folgt ausdrücken (PESCHKE, 1985):

$$F_{pot}(t) = \frac{ks \cdot (t-ts)}{2} + \sqrt{\frac{(ks \cdot (t-ts))^2}{4} + (ks \cdot (t-ts)) \cdot (wsf \cdot P_{eff} \cdot 2 + Fs) + Fs^2}$$
(2)

mit:

F _{pot} (t)	[mm]	kumulative potenzielle Matrix-Infiltration bis
·		einschließlich dem aktuellen Zeitschritt
t	[h]	Zeit seit Ereignisbeginn
ts	[h]	Zeitpunkt der Sättigung an der Oberfläche (time
		to ponding)
Fs	[mm]	über die Matrix bis zum Zeitpunkt ts tatsächlich

s [mm] uber die Matrix bis zum Zeitpunkt ts tatsächlich infiltrierte Wassermenge

Alle anderen Parameter sind in Tabelle 1 erläutert. Die potenzielle Matrix-Infiltration für den aktuellen Zeitschritt (= aktuelle Infiltrationskapazität) ergibt sich wie folgt:

$$f_{pot}(t) = F_{pot}(t) - F_{pot}(t-1)$$
 (3)

mit:

Die tatsächliche Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das Wasserdargebot limitiert:

$$f_{matrix}(t) = Minimum(N(t), f_{pot}(t))$$
(4)

mit:

N(t) [mm] Wasserdargebot im aktuellen Zeitschritt

Neben der Infiltration wird die Eindringtiefe der Matrix-Sättigungsfront SFT berechnet, um zu berücksichtigen, wie sich die infiltrationswirksame Tiefe der Makroporen und der Trockenrisse dadurch verkürzt (Abb. 3):

$$SFT(t) = \frac{F_{matrix}(t)}{P_{eff}}$$
(5)

mit:

SFT(t) [mm] Tiefe der Matrix-Sättigungsfront im aktuellen Zeitschritt

 $F_{matrix}(t)$ [mm] über die Matrix bis zum Zeitschritt t tatsächlich infiltrierte Wassermenge $\Sigma f_{matrix}(i)$

2.2.3 Makroporen-Infiltration

Wenn das Wasserdargebot die aktuelle Infiltrationskapazität der Bodenmatrix übersteigt, entsteht zunächst potenzieller Horton-Oberflächenabfluss (HOF_{pot,matrix}). Je nach Dichte der Makroporen gelangt ein Teil dieses Infiltrationsüberschusses in die Makroporen (Gleichung 1). So fließen z. B. bei einer für Grünland typischen Makroporendichte von 100 Makroporen je Quadratmeter (Tab. 2) ca. 70 % des HOF_{pot,matrix} in die Makroporen, während ca. 30 % als HOF weiterfließen. Der Anteil des potenziellen HOF, der in die Makroporen gelangt, kann von dort wiederum lateral in den Boden infiltrieren (Abb. 3). Dieser Infiltrationsprozess aus den Makroporen in die Bodenmatrix wird mit dem Green-Ampt-Ansatz für horizontale, radialsymmetrische Infiltration simuliert (BEVEN & CLARKE, 1986; WEILER, 2005). Zunächst wird die horizontale Eindringtiefe der radialsymmetrischen Infiltrationsfront MP_{SFY} mit der analytischen Lösung von WEILER (2005) berechnet (Gleichung 6 in WEILER, 2005). Aus dem Voranschreiten von MP_{SFY} lässt sich die potenzielle Infiltration aus den Makroporen in die Bodenmatrix für den aktuellen Zeitschritt berechnen:

$$fMP_{pot}(t) = \left(MP_{laenge} - SFT(t)\right) \cdot \pi \cdot P_{eff} \cdot \frac{MP_{SFY}(t)^2 - MP_{SFY}(t-1)^2}{10^6}$$
(6)

mit:

fMP_{pot}(t) [mm] potenzielle Makroporen-Infiltration im aktuellen Zeitschritt MP_{SFY} [mm] aktuelle Distanz der horizontalen Sättigungs-

front vom Porenrand

Die tatsächliche Makroporen-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das in den Makroporen verfügbare Wasserdargebot limitiert:

$$f_{mp}(t) = Minimum\left(\left(HOF_{pot,matrix}(t) \cdot MP_{ant}\right), fMP_{pot}(t)\right)$$
(7)

mit:

f _{mp} (t)	[mm]	tatsächliche	Makroporen-Infiltration	im
·		aktuellen Zei	tschritt	
HOF _{pot,mat}	_{rix} (t) [mm]	potenzieller	HOF im aktuellen Zeitscl	nritt
		nach Berechi	nung der Matrixinfiltratio	n

Übersteigt der Zufluss in die Makroporen die potenzielle Makroporen-Infiltration, so bildet die Differenz zusätzlichen potenziellen HOF, der zu jenem Anteil des HOF_{pot,matrix} hinzuaddiert wird, der den Makroporen überhaupt nicht zufließt. Hieraus resultiert dann der potenzielle HOF nach Berücksichtigung der Makroporen-Infiltration HOF_{pot,mp}.

2.2.4 Trockenriss-Infiltration

In Abhängigkeit vom Tongehalt und der aktuellen Bodenfeuchte kann der Boden neben Makroporen ggf. auch Trockenrisse aufweisen. Für Trockenrisse wird vereinfachend angenommen, dass sie ein Gitter ausbilden. Im Gegensatz zu Makroporen kann beim Vorliegen von Trockenrissen daher davon ausgegangen werden, dass der gesamte verbleibende HOF_{pot,mp} zunächst in die Trockenrisse gelangt. Die Berechnung der Infiltration aus den Trockenrissen in die Bodenmatrix erfolgt weitgehend analog zur Berechnung für die Makroporen. Dabei wird von einer spiegelsymmetrischen horizontalen Infiltration über beide Seiten des jeweiligen Trockenrisses ausgegangen. Entsprechend lässt sich auch hier aus dem Voranschreiten der spiegelsymmetrischen horizontalen Infiltrationsfront TR_{SFY} die potenzielle Infiltration aus den Trockenrissen in die Bodenmatrix für den aktuellen Zeitschritt berechnen:

$$fTR_{pot}(t) = \left(TR_{tiefe} - SFT(t)\right) \cdot P_{eff} \cdot TR_{str} \cdot \left(TR_{SFY}(t) - TR_{SFY}(t-1)\right) \cdot \frac{2}{10^6}$$
(8)

mit:

fTR_{pot}(t) [mm] potenzielle Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt

TR _{tiefe}	[mm]	tatsächliche Tiefe de	r Trockenri	sse	
TR _{str}	[mm/m ²]	Trockenrissdichte:	Strecke	je	Fläche
		$(= 10.000 \text{ mm/m}^2)$			
TR_{SFY}	[mm]	aktuelle Distanz de	er Sättigur	ngsfror	nt vom
		Trockenrissrand			

Die tatsächliche Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das in den Trockenrissen verfügbare Wasserdargebot limitiert:

$$f_{tr}(t) = Minimum \left(HOF_{pot,mp}(t), fTR_{pot}(t) \right)$$
(9)

mit:

f_{tr}(t) [mm] tatsächliche Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt HOF_{pot,mp}(t) [mm] potenzieller HOF im aktuellen Zeitschritt nach Berechnung der Makroporen-Infiltra-

2.2.5 Berücksichtigung der Verschlämmung

tion

Die infiltrationsmindernde Wirkung der Verschlämmung kann in LARSIM mithilfe eines Reduktionsfaktors RF (Wertebereich 0 – 1) überschlägig berücksichtigt werden. Da sich die Verschlämmung auf alle drei hier berücksichtigten Teilprozesse auswirkt, werden dabei die für alle drei Prozesse ermittelten UTGB-spezifischen potenziellen Infiltrationsraten durch Multiplikation mit RF gleichermaßen reduziert (LUBW, 2019).

Der zum aktuellen Zeitpunkt für das jeweilige UTGB verwendete Reduktionsfaktor berücksichtigt die Bodenart, die Landnutzung und die Jahreszeit. Der bei maximaler Verschlämmung im jeweiligen UTGB vorliegende minimale Reduktionsfaktor ist durch VF (Wertebereich 0 - 1) festgelegt (Tab. 1). Bodenarten, die zur starken Verschlämmung neigen, werden entsprechend durch einen niedrigen VF-Wert charakterisiert (z. B. 0,3), während Bodenarten mit geringer Verschlämmungsneigung höhere VF-Werte erhalten (z. B. 0,7). Das tatsächliche Ausmaß der Verschlämmung hängt darüber hinaus von zahlreichen weiteren Faktoren ab, von denen die Bodenbedeckung durch Pflanzen inklusive der Ausbildung ihrer Wurzeln sowie der Zeitpunkt der letzten Bodenbearbeitung zu den wichtigsten zählen (HARTGE & HORN, 2009). Diese Einflüsse werden in LARSIM vereinfachend über einen landnutzungsspezifischen und jahreszeitlich variablen Faktor für den tatsächlichen Verschlämmungsgrad VG abgebildet. Auch VG kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 für das Erreichen der maximal möglichen Verschlämmung steht. Der jeweilige Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Verschlämmungswirkung ergibt sich entsprechend wie folgt:

$$RF = VF + (1 - VF) \cdot (1 - VG)$$
(10)

mit:

- RF [-] Faktor zur verschlämmungsbedingten Reduktion der potenziellen Infiltrationsraten (Wertebereich: 0 1)
- VF [-] UTGB-spezifischer Faktor, mit dem die potenziellen Infiltrationsraten bei potenziell maximaler Verschlämmung (d. h. VG = 1) reduziert werden (Wertebereich: 0 1);
 i. d. R. in Abhängigkeit der Bodenart

VG [-] landnutzungsspezifischer, jahreszeitlich variabler Faktor zur Berücksichtigung des tatsächlichen Ausmaßes der Verschlämmung (Wertebereich: 0 – 1)

2.2.6 Gesamt-Infiltration und resultierender HOF

Die gesamte Infiltration ergibt sich aus der Summe der drei Teilprozesse:

$$f_{tot}(t) = f_{matrix}(t) + f_{mp}(t) + f_{tr}(t)$$
 (11)

mit:

$f_{tot}(t) \quad [mm] \quad Gesamt-Infiltration \ im \ aktuellen \ Zeitschritt$

Folglich resultiert der Infiltrationsüberschuss bzw. HOF aus der Differenz des Wasserdargebots und der Gesamt-Infiltration:

$$HOF(t) = Maximum\left(0, \left(N(t) - f_{tot}(t)\right)\right)$$
(12)

. .

mit:

HOF(t) [mm] Horton-Oberflächenabfluss im aktuellen Zeitschritt

Die Gesamt-Infiltration wird dem nachgeschalteten Bodenspeicher zugeführt und beeinflusst somit dessen Füllung und Verhalten. Der ausgewiesene HOF wird über den schnellen Direktabfluss abgeführt (Abb. 2).

2.3 Flächendifferenzierte Parametrisierung des Infiltrationsmoduls

Die für den unter 2.2 beschriebenen Berechnungsansatz erforderlichen Parameterwerte (Tab. 1) können in der Regel direkt aus mittelmaßstäblichen Bodenkarten entnommen werden oder indirekt über geeignete Pedotransferfunktionen aus der Textur (Bodenart) und der Landnutzung abgeschätzt werden (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).

Für Baden-Württemberg lag bereits eine an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg abgeleitete landesweite Parametrisierung für das Modell RoGeR vor (STEINBRICH et al., 2016), die im Wesentlichen auf der Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50)

Tabelle 2

Pa

de

Ра

on

(LGRB, 2017) und Landnutzungsdaten basiert. Auf dieser Grundlage wurde zunächst im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) eine Parametrisierungsstrategie für die existierenden LARSIM-WHM für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg entwickelt und angewandt (LUBW, 2019). Die nutzbare Feldkapazität in Volumenprozent nFK_{Vol}, die Luftkapazität in Volumenprozent LK_{Vol} und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ks für den Oberboden sowie Angaben zur Bodenart und zum Tongehalt konnten dabei direkt aus den durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) Baden-Württemberg bereitgestellten Bodendaten im Maßstab 1: 50.000 entnommen werden.

Die bei trockenem Boden maximal mögliche Tiefe von Trockenrissen $TR_{tiefe max}$ der ton-

haltigen Böden wurde auf Basis der Arbeiten von STEINBRICH et al. (2016) so abgeschätzt, dass beim in Baden-Württemberg maximalen Tongehalt von 68 % eine maximale Trockenrisstiefe von 500 mm erreicht wird (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019):

$$TR_{tiefe\ max} = 7,35 \cdot Ton \tag{13}$$

mit:

Ton [%] prozentualer Tongehalt im Oberboden

Für die in Süddeutschland häufig auftretende Bodenart schluffiger Lehm (Lu), mit ca. 25 % Tongehalt, ergeben sich entsprechend maximale Trockenrisstiefen von ca. 18 cm. Um die aktuelle Tiefe der Trockenrisse als Funktion der simulierten Bodenfeuchte berechnen zu können, wurden zusätzlich die Wassergehalte an der Ausrollgrenze AusrGr100 und der Schrumpfungsgrenze SchrGr100 anhand der Bodenart auf Basis der Pedotransferfunktion von WESSOLEK et al. (2009) bestimmt.

Für die Saugspannung an der Sättigungsfront wsf konnte auf eine bodenartspezifische Zuordnungstabelle zurückgegriffen werden, die an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg abgeleitet worden war (STEINBRICH & WEILER, 2012; zur Herleitung siehe WEILER, 2005 und STEINBRICH et al., 2016).

Die Makroporendichte MP_{dichte} und die Makroporenlänge MP_{laenge} wurden analog zum Vorgehen in RoGeR auf Basis der Landnutzung abgeschätzt (Tab. 2). Der zusätzliche Einfluss des Skelettgehalts auf MP_{dichte} wurde wie folgt abgeschätzt: Für volumetrische Skelettgehalte von 25 % bis 50 % erfolgte ein Zuschlag von +50 Makroporen je m², für 10 % bis 25 % und 50 % bis 70 % erfolgte ein Zuschlag von +25 Makroporen je m². Für die Skelettgehalte unter 10 % und über 70 % wurde keine Veränderung der Makroporendichte vorgenommen. Es ist selbstverständlich davon auszugehen, dass die tatsächliche räumliche (und zeitliche) Heterogenität der Makroporen von zahlreichen weiteren Faktoren beeinflusst wird (CAPOWIEZ et al., 2014; PELOSI et al., 2017; RECK et al., 2018). Allerdings ist es bislang nicht möglich, die Wirkung dieser Einflussfaktoren großräumig und allgemeingültig zu quantifizieren (BLOUIN et al., 2013). Entsprechend stellt

rametrisierung der Makroporendichte MP _{dichte} und der Makroporenlänge MP _{laenge} auf Basis
r in LARSIM verwendeten Landnutzungsklassen (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).
rameterization of frequency of macropores (MP $_{dichte}$) and length of macropores (MP $_{laenae}$) based
land use classes considered in LARSIM (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).

Landnutzung	MP _{dichte} [Anzahl/m ²]	MP _{laenge} [mm]
unversiegelte Flächen in Siedlungsbereichen	75	300
vegetationslose und extensiv genutzte Flächen	75	300
Acker	75	300
Feuchtflächen	100	300
locker baumbestandene Flächen	100	300
Obst- und Weinbau	100	500
Grünland	100	800
Nadelwald	150	300
Laubwald	150	500
Mischwald	150	500

die hier vorgenommene Abschätzung der räumlichen Verteilung der Makroporosität eine sehr grobe aber robuste Grundlage für ein großräumiges Modell dar (STEINBRICH et al., 2016).

Für die in LARSIM implementierte überschlägige Berücksichtigung der Verschlämmung konnte auf eine grobe zweistufige Klassifizierung in stark verschlämmungsgefährdete Böden (VF = 0,3) und mäßig verschlämmungsgefährdete Böden (VF = 0,7) zurückgegriffen werden, die in den Bodendaten des LGRB bereits vorlag. Liegt keine solche Klassifikation in den Bodendaten vor, so kann sie anhand der Bodenart mithilfe der Tabellen zur Verschlämmungsneigung bzw. Erodierbarkeit aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung erfolgen (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Für die hier vorliegenden Analysen wurde davon ausgegangen, dass Verschlämmung nur auf Ackerböden auftritt. Für alle anderen Landnutzungen wurde daher ganzjährig ein Verschlämmungsgrad VG = 0 angesetzt, sodass bei diesen Landnutzungen keine Infiltrationsminderung durch Verschlämmung simuliert wird (Gleichung 10). Für die Landnutzung Acker wurde in Abstimmung mit dem LGRB ein mittlerer Jahresgang von VG auf Basis einer für Baden-Württemberg charakteristischen Bewirtschaftung abgeschätzt (LUBW, 2019). Dabei wird für April und Mai von minimaler Bodenbedeckung und in der Folge maximaler Verschlämmung (VG = 1) ausgegangen. Bei den nachfolgend untersuchten Starkregen im Mai wird also davon ausgegangen, dass die potenziellen Infiltrationsraten auf Acker mit stark verschlämmungsgefährdeten Böden (VF = 0,3) mit dem Faktor RF = 0,3 reduziert werden. Für die Ereignisse im Juni (VG = 0.85) und Juli (VG = 0.8) ergeben sich für Acker mit stark verschlämmungsgefährdeten Böden etwas geringere Reduktionen RF = 0,41 bzw. RF = 0,44 (Gleichung 10).

Durch Verschneidung der Infiltrationsparameter mit weiteren für LARSIM relevanten Bodenparametern (z. B. nFK und LK bis 1 m Bodentiefe in [mm], vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte VDB, maximale kapillare Aufstiegsraten kapA [mm/h]), der Landnutzung und den Teilgebieten (TGB) des Modells ergeben sich die hoch aufgelösten Polygone der LARSIM-UTGB (Hydrotope), auf deren räumlicher Auflösung die Infiltration und die Abflussbildung simuliert werden (Abb. 1). Durch die hohe räumliche Differenzierung der UTGB ist die Simulation einer räumlich stark differenzierten Reaktion auf Starkregen möglich, wenngleich die UTGB innerhalb der TGB nicht räumlich verortet sind.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojekts wurde die für Baden-Württemberg verwendete Parametrisierungsstrategie für die Verwendung der BK50 für Nordrhein-Westfalen angepasst (IS BK 50, Informationssystems Bodenkarte von NRW, GEO-LOGISCHER DIENST NRW, 2018). Dabei konnte grundsätzlich genauso vorgegangen werden, wie dies oben für Baden-Württemberg beschrieben ist. Die Parametrisierung erfolgte für die Einzugsgebiete der Großen Dhünn und der Sülz, die teilweise in das Dhünn-Einzugsgebiet übergeleitet wird (KRUMM et al., 2020).

Für die Anwendung im Dhünn- und Sülz-Einzugsgebiet stand jedoch nicht die Simulation von starkregenbedingten Hochwassern im Vordergrund. Vielmehr sollten hier die mögliche Abschwemmung und Erosion von landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Grundlage des dort auftretenden HOF bestmöglich abgebildet werden. Insofern wurde das Infiltrationsmodul hier verwendet, um HOF infolge intensiver, aber nicht unbedingt sehr extremer Niederschläge zu simulieren (KRUMM et al., 2020). Die am Beispiel von Baden-Württemberg entwickelte Parametrisierungsstrategie (LUBW, 2019) wurde außerdem vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) angewendet, um das Einzugsgebiet der Mosel (inkl. dem luxemburgischen Sauergebiet) entsprechend zu parametrisieren (BERNDT, 2020; HENGST, 2021). Diese Parametrisierung wurde für die Simulation der Starkregenereignisse an der Weißen Ernz in Luxemburg verwendet (AGE, 2020).

3 Untersuchungsgebiete und Ereignisse

Abbildung 4 und Tabelle 3 geben einen Überblick über die fünf Einzugsgebiete und sieben Ereignisse, die in der vorliegenden Studie untersucht wurden. Weitere Informationen zum jeweiligen Gebietsniederschlag können den Abbildungen 6 und 9 entnommen werden. Die Untersuchungsgebiete erstrecken sich über drei Gebiete mit unterschiedlichen Grundlagen für die Bodendaten. Dadurch wird es möglich, zu bewerten, ob die zunächst für Baden-Württemberg abgeleitete Parametrisierungsstrategie auch auf andere Länder mit anderen Datengrundlagen übertragen werden kann. Soweit verfügbar, wurden möglichst relevante starkregenbedingte Abflussereignisse mit hoher Jährlichkeit für die Analyse herangezogen. Sofern in einem der betroffenen Einzugsgebiete ein weiteres (kleineres) starkregenbedingtes Hochwasser vorlag, wurde dieses zu Vergleichszwecken in die Analyse mit aufgenommen.

Für Baden-Württemberg wurden insgesamt 20 Starkregenereignisse in 16 Einzugsgebieten analysiert (LUBW, 2019; HAAG et al.,



Abbildung 4 Lage der fünf untersuchten Einzugsgebiete. *Location of the five analyzed catchments.*

Tabelle 3Übersicht über die untersuchten Einzugsgebiete (EZG) und Ereignisse.Overview of catchments (EZG) and flood events analyzed in this study.										
Pegel Gewässer EZG-Fläche [km²] Ereignis Abfluss-Jährlichke										
Rangendingen	Starzel	123	02.06.2008	HQ100						
Kocherstetten	Kocher	1.288 ¹	29.05.2016	HQ10 ¹						
Course anoth of an	Rottum	F7	29.05.2016	HQ100						
Gopperstnoien		57	24.06.2016	HQ100						
Deindeuf	Ma:0 - F	102	22.07.2016	HQ100						
Reisdorf	weiße Ernz	102	01.06.2018	HQ2						
Hommerich	Kürtener Sülz	64	20.06.2013	HQ5						

¹ Relevant für die Analyse bei Kocherstetten ist das 214 km² große Zwischen-EZG des Pegels, in dem der Abfluss eine deutlich höhere Jährlichkeit als HQ10 aufwies.

2019b). Aufgrund der hohen Abflussjährlichkeit bzw. Relevanz der in ihnen aufgetretenen Ereignisse wurden hieraus die drei in Tabelle 3 aufgeführten Einzugsgebiete für die hier durchgeführte detailliertere Analyse ausgewählt. Dabei ist anzumerken, dass der Orlacher Bach (ohne Pegel), der durch die Gemeinde Braunsbach fließt, oberhalb des Pegels Kocherstetten in den Kocher mündet. Das für den Pegel Kocherstetten/Kocher analysierte Ereignis vom Mai 2016 umfasst somit auch das verheerende lokale Katastrophen-Ereignis in Braunsbach (BRONSTERT et al., 2017). Das relevante Starkregenereignis ereignete sich dabei ausschließlich im Zwischeneinzugsgebiet des Pegels Kocherstetten, das oberstromig durch die Pegel Geislingen/Bühler, Westheim/Bibers und Gaildorf/Kocher begrenzt wird. Für die Analyse des Ereignisses bei Kocherstetten (bzw. Braunsbach) wurde daher nur das 214 km² große Zwischeneinzugsgebiet herangezogen und die Zuflüsse von oberhalb durch die Messungen an den drei genannten Zuflusspegeln berücksichtigt. Für die starkregenbedingte Abflussbildung im Zwischeneinzugsgebiet von Kocherstetten wird also sicherlich eine wesentlich höhere Jährlichkeit als HQ10 erreicht.

In Luxemburg trat im Juli 2016 ein starkregeninduziertes Hochwasser an der Weißen Ernz auf, das in AGE (2020) untersucht wurde. Darüber hinaus konnte zu Vergleichszwecken ein zweites kleineres Ereignis vom Juni 2018 in die Analyse mit aufgenommen werden. Die Jährlichkeiten für die beiden Ereignisse wurden aus der Hochwasser-Regionalisierung für Luxemburg entnommen.

Für Nordrhein-Westfalen lagen mit dem Infiltrationsmodul parametrisierte Modelle nur für die Einzugsgebiete von Dhünn und Sülz vor (KRUMM et al., 2020). Auf Basis einer Analyse der Niederschlagsintensitäten und der gemessenen Abflussreaktion im Zeitraum 2004 bis Mitte 2018 wurde das starkregeninduzierte Hochwasser mit der größten Jährlichkeit identifiziert. Dabei handelt es sich um das hier näher untersuchte Ereignis an der Kürtener Sülz vom Juni 2013, das allerdings nur einem HQ5 entspricht und somit eine deutlich geringere Jährlichkeit als die anderen hier untersuchten Ereignisse aufweist.

4 Datengrundlage und Anpassung der Radarniederschläge

4.1 Abfluss, Niederschlag und Meteorologie

Abflussmessungen lagen für Baden-Württemberg und Luxemburg in 15-Minuten-Zeitschritten vor und wurden von der Landesanstalt für Umwelt (LUBW) bzw. der Administration de la gestion de l'eau (AGE) zur Verfügung gestellt. Für den Pegel Hommerich in Nordrhein-Westfalen wurden die als Stundenwerte durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) bereitgestellten Daten verwendet. Zudem standen für alle Untersuchungsgebiete Stationsdaten als langjährige plausibilisierte Stundenwert-Zeitreihen für die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck zur Verfügung (LUBW, 2019; AGE, 2020; KRUMM et al., 2020). Diese Stationsdaten wurden für die unten beschriebenen LARSIM-Simulationen in Stundenschritten verwendet.

Für den Niederschlag wurden für die Ereigniszeiträume zudem RADKLIM-YW-Daten aus der Radarklimatologie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1 km² genutzt (WINTERRATH et al., 2018). Die YW-Daten werden vom DWD an Niederschlags-Stationsdaten quasi angeeicht (WINTERRATH et al., 2017). In Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen kamen die Daten der Version 17.002 zum Einsatz, für Luxemburg wurden Daten der Version 19.001 verwendet. Im vorliegenden Fall wurden diese Datensätze zu 15-Minutenwerten aggregiert und dann als Antriebsdaten für die unten beschriebenen Simulationen in 15-Minuten-Zeitschritten verwendet.

Für die vorliegende Untersuchung standen teilweise mehr Niederschlags-Stationsdaten zur Verfügung als dem DWD für die Aneichung des RADKLIM-Produkts. Daher wurde in einigen Fällen eine weitergehende Anpassung an diese zusätzlichen Stations-Niederschläge vorgenommen (siehe Kapitel 4.2).

Für die beiden Ereignisse am Pegel Goppertshofen/Rottum wurde zusätzlich das Radarprodukt SuperHD der Firma Meteologix (SuperHD Radar Level1 Kalibrierung aus dem Jahr 2018) verwendet, das von der LUBW zur Verfügung gestellt wurde. Das Super-HD-Produkt weist eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten und eine räumliche Auflösung von 250 m x 250 m auf. Die Daten beruhen auf denselben Radarmessungen wie RADKLIM-YW, unterscheiden sich jedoch durch die Aufbereitung (z. B. Z-R-Beziehung, Korrekturverfahren, Aneichmethoden). Auch die SuperHD-Daten wurden von 5-Minutenwerten zu 15-Minutenwerten aggregiert.

4.2 Ermittlung des bestmöglichen Niederschlags für die Ereignisse

Die Simulation der Abflussreaktion kleiner Einzugsgebiete auf lokal begrenzte (und kurze, intensive) Starkregenereignisse ist stark abhängig von einer präzisen räumlichen und zeitlichen Erfassung der tatsächlichen Niederschlagsintensität (VILLINGER et al., 2017; GÖPPERT, 2018; LUBW, 2019). Niederschlagsstationen erfassen die tatsächlichen Niederschlagsintensitäten punktuell am besten. Aufgrund der Kleinräumigkeit konvektiver Starkregenereignisse ist die Wahrscheinlichkeit jedoch hoch, dass die Niederschlagszelle nicht oder nur randlich von einer Niederschlagsstation erfasst wird. Wenn die maximalen Niederschlagsintensitäten durch eine Station erfasst werden, ist die Ausdehnung der Niederschlagszelle ohne zusätzliche Informationen schwer abgrenzbar. Räumliche Interpolationsmethoden können in beiden Fällen keine bzw. keine optimale Abhilfe schaffen. Im Gegensatz zu Stationsdaten erfassen Radarmessungen die räumliche (und zeitliche) Verteilung des Niederschlags in hoher Auflösung, nicht jedoch die zugehörigen Niederschlagsintensitäten. Die Kombination beider Messmethoden ist zur Erfassung von Starkregen daher unumgänglich und wird von den Anbietern von Radarprodukten mit aufwändigen Prozessierungen und Aneichungen der Radarmessungen umgesetzt (WINTERRATH et al., 2017).

Allerdings sind auch die angeeichten Radarprodukte noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (LUBW, 2019; HAAG et al., 2019b). In der vorliegenden Studie wurde daher versucht, diese Unsicherheit soweit möglich weiter zu reduzieren bzw. ihren Einfluss auf die Abflusssimulation zu bewerten. Hierfür wurde aus den vorhandenen Daten ein "bestmöglicher" Niederschlagsinput ausgewählt bzw. abgeleitet. Aufgrund der Unterschiede in der Datenverfügbarkeit wurde dabei für die einzelnen Ereignisse unterschiedlich vorgegangen. Das Vorgehen wird nachfolgend erläutert.

4.2.1 Anpassung der RADKLIM-Daten an zusätzliche Stationsdaten (Hommerich, Reisdorf, Rangendingen)

In den Untersuchungsgebieten waren teilweise Messwerte von Niederschlagsstationen verfügbar, welche dem DWD für die Aneichung der RADKLIM-Daten nicht zur Verfügung stehen. In Baden-Württemberg sind dies v. a. Stationen aus dem LUBW Luftmessnetz sowie Stationen kommunaler und privater Betreiber. Im Einzugsgebiet der Dhünn/Sülz liegen zusätzliche Daten mehrerer vom Wupperverband betriebenen Niederschlagsstationen vor und in Luxemburg wurden zusätzliche Daten aus dem Messnetz der ASTA (Administration des Services Techniques de l'Agriculture) bereitgestellt.

Um den bestmöglichen Niederschlagsinput für die untersuchten Ereignisse zu bestimmen, wurden die Daten der jeweils

zusätzlich verfügbaren Stationen mit den Radardaten verglichen. Dazu wurde jeweils der relevante Niederschlagszeitraum eines Ereignisses eng eingegrenzt. Dann wurden die Niederschlagssummen der Stationen für diesen Zeitraum mit den Niederschlagssummen des Radarprodukts an den zugehörigen Radarpixeln verglichen. Anhand der Lage der Stationen, der Ausdehnung der Niederschlagszelle in den Radardaten sowie den Differenzen der Niederschlagssummen wurde für jedes Ereignis bzw. Gebiet einzeln beurteilt, ob die Nutzung der zusätzlichen Stationen einen Informationszugewinn darstellt. Anhand der räumlichen Auswertung konnte auch beurteilt werden, wie gut die jeweiligen maximalen Niederschlagsintensitäten in den Radardaten durch Stationsdaten (egal ob beim DWD oder nachträglich verfügbar) belegt sind.

Für die Einzugsgebiete von Hommerich und Reisdorf ergab sich durch die zusätzlichen Stationsdaten ein erheblicher Informationszugewinn. In Baden-Württemberg lag für das Einzugsgebiet von Rangendingen eine zusätzliche relevante Station vor. Für Kocherstetten und Goppertshofen ergab sich aus den zusätzlich verfügbaren Stationen allerdings kein Informationszugewinn. Daher wurde für die Ereignisse an den Pegeln Hommerich, Reisdorf und Rangendingen eine zusätzliche Anpassung der Radardaten durchgeführt. Für Goppertshofen und Kocherstetten wurde eine abweichende Vorgehensweise gewählt, die unten erläutert wird.

Die zusätzliche Anpassung der Radardaten erfolgte anhand der Quotienten aus den Niederschlagssummen der zusätzlichen Stationen und der zugehörigen Radarpixel. Diese Quotienten wurden als Korrekturfaktoren für die Radardaten verwendet. Dazu wurden die an den zusätzlichen Stationen ermittelten Korrekturfaktoren mithilfe des IDW-Verfahrens räumlich interpoliert. An den bereits vom DWD zur Aneichung genutzten Stationen ging dabei unabhängig von möglichen Abweichungen zwischen Stationsdaten und Radardaten ein Faktor von 1 in die Interpolation ein. Aus dem Ergebnis der Interpolation wurde anschließend für jeden Radarpixel der zugehörige Korrekturfaktor übernommen und die Radarniederschläge für den zuvor abgegrenzten Niederschlagszeitraum mit dem Korrekturfaktor multipliziert. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel der originalen und der angepassten Radardaten für das Einzugsgebiet der Weißen Ernz. Im gezeigten Beispiel ist v. a. die zusätzlich verwendete Station Christnach von Relevanz. Für die Ereignisse in den Einzugsgebieten von Hommerich, Reisdorf und Rangendingen wurden als bestmöglicher Niederschlag die wie beschrieben angepassten RADKLIM-YW-Werte verwendet.

4.2.2 Bestmöglicher Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet von Kocherstetten

Für das sehr extreme Ereignis im Zwischeneinzugsgebiet von Kocherstetten bzw. des Orlacher Bachs (Gemeinde Braunsbach) haben Analysen der rohen Radardaten des DWD durch BRONSTERT et al. (2016, 2017) gezeigt, dass das Zentrum des Niederschlagsgebiets genau über dem Einzugsgebiet des



Abbildung 5

Darstellung der a) originalen und der b) zusätzlich angepassten Radardaten für das Ereignis am 22.07.2016 im Einzugsgebiet der Weißen Ernz (Niederschlagssummen von 22.07.2016 18:00 Uhr bis 23.07.2016 04:00 Uhr MEZ).

Representation of the a) original and b) additionally adapted radar precipitation for the event on 07/22/2016 in the catchment of Weiße Ernz (precipitation sums from 07/22/2016 18:00 until 07/23/2016 04:00 CET).

Orlacher Bachs lag und innerhalb von 75 Minuten hier ca. 120 mm (± 20 mm) Niederschlag fielen. Diese Summe wurde weder von einer Niederschlagsstation erfasst noch ist sie in den vom DWD angeeichten Radardaten enthalten. Für das Einzugsgebiet des Orlacher Bachs wurde daher ein räumlich einheitlicher Korrekturfaktor von 1,36 für die Radardaten bestimmt, der sich aus der maximalen Niederschlagssumme der Radardaten im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs und der von BRONSTERT et al. (2016, 2017) geschätzten Niederschlagssumme ergibt (LUBW, 2019). Als bestmögliche Niederschlagsdaten für das Ereignis in Kocherstetten wurden also die um den Faktor 1,36 erhöhten RADKLIM-YW-Werte verwendet.

4.2.3 Bestmögliche Niederschlagsdaten für das Einzugsgebiet von Goppertshofen

Für das Einzugsgebiet des Pegels Goppertshofen lagen uns keine zusätzlichen Niederschlagsdaten zur Anpassung der RADKLIM-Daten vor. Für die beiden Ereignisse im Jahr 2016 stand jedoch alternativ das SuperHD-Produkt der Firma Meteologix zur Verfügung. Im vorliegenden Fall erbrachten die LARSIM-Simulationen mit SuperHD eine bessere Übereinstimmung am Pegel Goppersthofen als die Simulationen mit RADKLIM-YW. Rein auf dieser Basis wurden die SuperHD-Daten für die beiden Ereignisse im Jahr 2016 als bestmöglicher Niederschlag ausgewählt. Diese Auswahl kann jedoch nicht durch entsprechende Niederschlagsmessungen untermauert werden. Inwieweit SuperHD in den beiden Fällen den Niederschlag tatsächlich besser widerspiegelt als RADKLIM-YW oder eventuell nur LARSIM-Modellunsicherheiten ausgleicht, kann an dieser Stelle daher nicht abschließend geklärt werden. Unabhängig davon, ermöglicht der Vergleich der Ergebnisse mit den beiden Radarprodukten qualitative Aussagen zur Auswirkung der Unsicherheit der Radarniederschläge auf die Abflusssimulation.

5 Simulationsvarianten und Auswertungsmethoden

5.1 Simulationsvarianten

Für alle hier untersuchten Einzugsgebiete lagen LARSIM-Modelle vor, die gemäß des LARSIM-Kalibrierleitfadens für operationelle WHM in Stundenschritten kalibriert waren (HAAG et al., 2016). Dabei ist zu beachten, dass das hier analysierte dynamische Infiltrationsmodul physikalisch basiert ist und nicht kalibriert wurde. Die Kalibrierung erfolgte daher mit der in Kapitel 2.1 erläuterten Modellstruktur mit Stundenwerten der Stationsmessungen und unter Verwendung des Parameters A2 zur Ausweisung des schnellen Direktabflusses (Abb. 2: schwarze Struktur). Mit diesen Modellen wurden unter Verwendung der Stationsdaten die jeweiligen Anfangsbedingungen vor den Ereignissen bestimmt. Hierfür wurde über einen Zeitraum von mehreren Jahren bis zum jeweiligen Ereignisbeginn gerechnet und dann eine Zustandsdatei ausgegeben, welche die Anfangsbedingungen für alle unten definierten Varianten bildete. Ausgehend von diesen Anfangsbedingungen wurden die in Tabelle 3 definierten Ereignisse mit unterschiedlichen Varianten berechnet. Die drei Grundvarianten unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Modellkonfiguration, der Zeitschrittweite und der Verwendung von Stations- bzw. Radarniederschlagsdaten. Sie sind in Tabelle 4 definiert.

Variante 1 entspricht dem Modell in der Form, wie es kalibriert wurde und wie es auch standardmäßig zur Hochwasservorhersage eingesetzt wird. Variante 1 kann somit als Referenz oder Standard-Modellkonfiguration angesehen werden, die den bisherigen Ist-Zustand repräsentiert. Ausgehend vom Status Quo der Variante 1 wurden in LUBW (2019) schrittweise Veränderungen an der Modellkonfiguration vorgenommen, die eine Verkürzung der Zeitschrittweite, die Nutzung von Radar- anstelle von Stations-Niederschlägen, die Nutzung des physikalischen Infiltrationsmoduls anstelle des konzeptionellen Parameters A2 und die Anpassung des Parameters EQD2 für die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses an die HOF-dominierten Ereignisse umfassten. Die Analyse dieser Varianten für insgesamt 20 Starkregenereignisse verdeutlichte, dass der Ersatz des konzeptionellen Parameters A2 durch das physikalisch basierte Infiltrationsmodul die deutlichste Wirkung auf die Simulationsergebnisse zeigte. Alle anderen Schritte bewirkten im Vergleich hierzu nur relativ geringe Änderungen (LUBW, 2019). Im Sinne einer möglichst übersichtlichen Darstellung werden im vorliegenden Artikel daher nur die Ergebnisse von drei Simulationsvarianten gezeigt. Der Vergleich von Variante 2 zu Variante 3 verdeutlicht dabei die Wirkung des für die hier durchgeführte Analyse entscheidenden Schritts, der Verwendung des neuen Infiltrationsmoduls anstelle von A2. Der Vergleich von Variante 1 mit Variante 2 fasst hingegen die Wirkung aller weiteren Schritte zusammen.

Die Varianten 2 und 3 werden mit Radarniederschlägen angetrieben und in 15-Minuten-Zeitschritten berechnet. Grundsätzlich kann LARSIM auch in kürzeren Zeitschritten von minimal 5 Minuten betrieben werden. Allerdings liegen die Abflussmessungen (mit Ausnahme von Hommerich) in einer minimalen zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vor. Zudem wurde in LUBW (2019) gezeigt, dass die Unterschiede der Simulationsergebnisse zwischen Zeitschrittweiten von 5 und 15 Minuten recht gering sind. Als Kompromiss zwischen Anforderungen an die operationellen Daten und die zu erzielende Genauigkeit wurde daher empfohlen, zukünftige operationelle Vorhersagen lokaler Hochwasser in Folge von kleinräumigen konvektiven Starkregen in Zeitschritten von 15 Minuten zu berechnen (LUBW, 2019). Darüber hinaus wurde in den Varianten 2 und 3 nicht der in der allgemeinen Kalibrierung festgelegte Parameter EQD2 übernommen, der maßgeblich für die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses ist. Vielmehr wurde in beiden Varianten ein EQD2-Wert verwendet, der visuell spezifisch an die analysierten Ereignisse angepasst

Tabelle 4 Definition der drei grundlegenden Berechnungsvarianten für die untersuchten Starkregenereignisse. Definition of the three different simulation versions of the present study. EQD2 Niederschlag Zeitschritt A2 Infiltrationsmodul Variante 1 Stationen 1 Stunde allgemein nein ja Variante 2 Radar 15 Minuten angepasst nein ja Variante 3 Radar 15 Minuten angepasst nein ja

worden war. An den Pegeln mit zwei Ereignissen wurde dabei für beide Ereignisse derselbe EQD2-Wert verwendet.

Die Varianten 2 und 3 unterscheiden sich somit nur hinsichtlich der Bildung von schnellem Direktabfluss. In der Variante 2 wird die Menge des schnellen Direktabflusses mithilfe des kalibrierten Parameters A2 ausgewiesen, während sie in Variante 3 durch die Anwendung des (kalibrierfreien) dynamischen Infiltrationsmoduls bestimmt wird (Details siehe Kapitel 2). Dabei ist zu beachten, dass mit dem dynamischen Infiltrationsmodul lediglich Infiltrationsüberschuss und somit Horton-Oberflächenabfluss ausgewiesen wird. Oberflächenabfluss infolge von Sättigungsflächen wird in Variante 3 nicht als schneller Direktabfluss behandelt. Da hier sommerliche Starkregenereignisse mit geringer Vorfeuchte analysiert wurden, ist der Einfluss von Sättigungsflächen vermutlich gering. Dieser Aspekt muss bei der Interpretation der Ergebnisse aber berücksichtigt werden.

Um den Einfluss der Niederschlagsunsicherheit bewerten zu können, wurden die Varianten 2 und 3 darüber hinaus jeweils mit zwei unterschiedlichen Radarniederschlägen simuliert:

- a) bestmöglicher Niederschlag gemäß Kapitel 4.2
- b) unveränderte RADKLIM-YW-Daten des DWD (siehe Kapitel 4.1).

Somit ergeben sich für die Ereignisse jeweils fünf unterschiedliche Modellläufe mit Variante 1, Variante 2 a), Variante 3 a), Variante 2 b) und Variante 3 b).

5.2 Auswertungsmethoden

Die Simulationsvarianten wurden zum einen auf Basis des visuellen Vergleichs zwischen simulierten und gemessenen Ganglinien an den betrachteten Pegeln qualitativ bewertet. Zum anderen wurden die Scheitelwerte sowie die Abflussvolumina der Ereignisse als Grundlage für eine quantitative Bewertung herangezogen. Für die Ermittlung des ereignisspezifischen Abflussvolumens wurde bewusst ein sehr einfacher und leicht nachvollziehbarer Ansatz gewählt: Für alle Ganglinien wurde das Volumen bestimmt, das während des (unten dargestellten) ereignisspezifischen Auswertungszeitraums oberhalb des jeweiligen MQ-Werts liegt.

Bei der quantitativen Bewertung von Abflussscheiteln und -volumina besteht das Problem, dass diese auf der Seite minimaler Werte (linksseitig) durch Null begrenzt sind, die maximalen Werte (rechtsseitig) aber unendlich hoch werden können. Daher besteht die Tendenz, dass Modelle mit systematischer Unterschätzung durch gewöhnliche differenzielle Fehlermaße wie die absolute oder die relative Abweichung besser bewertet werden als Modelle mit einer systematischen Überschätzung (HELSEL & HIRSCH, 2002). Zur Analyse der Abweichungen wurde in der vorliegenden Studie daher ein multiplikativer Fehler (MF) in Anlehnung an den "mean multiplicative error" von MOOG & JIRKA (1998) wie folgt berechnet:

 $MF = \frac{sim}{mes}$ für: $sim \ge mes$ (13a)

 $MF = -\frac{mes}{sim}$ für: sim < mes (13b)

			•		
r	Υ	٦	I	т	٠
		۰	•	Ľ	٠

MF	[]	multiplikatives Fehlermaß						
sim	[m³/s], [mm]	Simulationsergebnis (Scheitelwert				rt bz	w.	
		Abflussvolu	ımen)					
mes	[m³/s], [mm]	Messung	(Scheitelw	ert	bzw.	Abflus	5S-	
		volumen)						

Der Wertebereich des Fehlermaßes reicht von +1 bis + ∞ sowie von -1 bis - ∞ , der Bereich zwischen -1 und +1 ist nicht definiert. Eine perfekte Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wird durch einen Wert von +1 oder -1 repräsentiert. Eine Überschätzung um das Doppelte wird durch den Wert 2 und eine Unterschätzung um die Hälfte durch den Wert -2 charakterisiert.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Einfluss der Modellkonfiguration

Hier wird zunächst die bisherige Standard-Modellkonfiguration (Variante 1: Berechnungsschrittweite = 1 h, Stationsdaten des Niederschlags, keine Nutzung des neuen Infiltrationsmoduls) mit den Varianten 2 a) und 3 a) verglichen. In den Varianten 2 a) und 3 a) erfolgt die Simulation jeweils in Zeitschritten von 15 Minuten, mit einem angepassten EQD2-Wert unter Verwendung der bestmöglichen Radarniederschläge. Die beiden Varianten unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Nutzung des neuen Infiltrationsmoduls: In Variante 2 a) wird das neue Infiltrationsmodul nicht verwendet, die Bildung von schnellem Direktabfluss erfolgt wie in Variante 1 über den Parameter A2. In Variante 3 a) ist die Wirkung von A2 deaktiviert, die Bildung von schnellem Direktabfluss (= HOF) erfolgt ausschließlich über das dynamische Infiltrationsmodul. In Abbildung 6 werden die simulierten Ganglinien der drei Varianten mit den Abflussmessungen verglichen. Zusätzlich sind die Summenkurven der Stationsniederschläge (Variante 1) und der bestmöglichen Radarniederschläge (Varianten 2 a) und 3 a)) dargestellt.

Aus Abbildung 6 wird deutlich, dass der kumulierte Stationsniederschlag bei den Ereignissen in Rangendingen, Reisdorf 2018 und Hommerich klar höher ist als der bestmögliche Radarniederschlag. Beim Ereignis in Rangendingen lag eine Station genau im Zentrum der auslösenden Niederschlagszelle. Die an dieser Station gemessenen sehr hohen Niederschlagssummen und -intensitäten wurden durch das LARSIM-interne Interpolationsverfahren auf eine große Fläche extrapoliert. Entsprechend fällt der aus den Stationsdaten ermittelte Niederschlag höher aus als der bestmögliche Radarniederschlag (LUBW, 2020). Für Hommerich und Reisdorf 2018 liegen ähnliche Phänomene vor. Lediglich im Falle von Kocherstetten und Reisdorf 2016 ist umgekehrt der aus den Stationsdaten abgeleitete Gebietsniederschlag merklich geringer als der bestmögliche Radarniederschlag. Im Einklang mit den Ergebnissen in LUBW (2020) wird also deutlich, dass mit Stationsdaten die Gebietsniederschläge bei Starkregen je nach Lage von Stationen und Niederschlagszellen sowohl unter- wie auch überschätzt werden können.

Obwohl der Gebietsniederschlag aus den Stationsdaten häufig höher ist als der bestmögliche Radarniederschlag, wird die Abflussreaktion auf das Starkregenereignis in der Variante 1 in allen Fällen, außer am Pegel Rangendingen, klar unterschätzt (Abb. 6). Die systematische Unterschätzung der Gebietsantwort auf Starkregen in Variante 1 lässt sich also nicht auf eine systematische Unterschätzung des Niederschlagsinputs zurückführen, sondern ist offensichtlich modelltechnisch bedingt. Da die intensitätskon-



Abbildung 6

Gangliniendarstellungen der gemessenen Abflüsse im Vergleich mit den simulierten Abflüssen der Varianten 1, 2 a) und 3 a). Hydrographs of measured discharge in comparison with simulated discharge of versions 1, 2 a) und 3 a). trollierte Abflussreaktion bei Starkregen durch den in der Standardkonfiguration verwendeten Speicheransatz für den Boden naturgemäß nicht abgebildet werden kann, entspricht dieses Ergebnis den Erwartungen und bisherigen Erfahrungen mit der Standardkonfiguration bei Starkregen auf zuvor trockenen Boden. Es verdeutlicht somit nochmals, weshalb die hier dargestellten Weiterentwicklungen durchgeführt wurden.

Mit der Variante 2 a) ergeben sich im Allgemeinen nur geringe Veränderungen gegenüber der Variante 1, da auch hier der Großteil des Niederschlags in den Boden aufgenommen wird und somit nicht (schnell) zum Abfluss kommt. Die Verkürzung des Zeitschritts auf 15 Minuten, die Berücksichtigung des bestmöglichen Radarniederschlags und die Verwendung des spezifischen EQD2-Werts haben in Summe nur einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Auch mit der Variante 2 a) wird die Abflussreaktion auf das Starkregenereignis (außer im Falle von Rangendingen) weiterhin stark unterschätzt (Abb. 6).

Erst durch die Aktivierung des dynamischen Infiltrationsmoduls in Variante 3 a) ergibt sich eine deutliche Verstärkung der Abflussreaktion. Das Infiltrationsmodul simuliert also bei allen hier untersuchten Starkregenereignissen signifikante Mengen an Infiltrationsüberschuss bzw. HOF (schneller Direktabfluss). Der über das physikalisch basierte Infiltrationsmodul generierte schnelle Direktabfluss (= HOF) ist dabei deutlich höher als in der ansonsten gleichen Modellvariante 2 a) mit dem Parameter A2. Bei der weiteren Interpretation ist jedoch zu berücksichtigen, dass lediglich das maßgebliche Abflussvolumen auf dem kalibrierfreien dynamischen Infiltrationsmodul beruht, während die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses durch die Anpassung des Parameters EQD2 visuell optimiert wurde. In den Varianten 2 a) und 3 a) wurden dabei dieselben EQD2-Werte verwendet, sodass diese beiden Varianten auch hinsichtlich der Abflusskonzentration unmittelbar vergleichbar sind. Mit Variante 3 a) wird die grundlegende Abflussreaktion für alle sieben Ereignisse zufriedenstellend bis gut wiedergegeben. Dabei sind

die Ergebnisse in sechs der sieben Fälle eindeutig besser als in der Variante 2 a). Wie Abbildung 6 verdeutlicht, hätte für diese sechs Ereignisse auch durch die Wahl eines anderen Wertes für EQD2 keine bessere Anpassung der Variante 2 a) erreicht werden können, da das Volumen des dadurch beeinflussten schnellen Direktabflusses viel zu gering ist. Lediglich im Fall von Rangendingen hätte durch die Wahl eines anderen EQD2-Wertes mit der Variante 2 a) eine ähnlich gute visuelle Übereinstimmung erzielt werden können wie mit der Variante 3 a) (Abb. 6).

Neben den qualitativen Vergleichen anhand der Ganglinien werden die Ergebnisse auch quantitativ anhand der Scheitelabflüsse und der Abflussvolumina verglichen. Hierfür sind die multiplikativen Fehler MF (aller fünf Varianten) für die Scheitel in Abbildung 7 und für die Volumina in Abbildung 8 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass das Ereignis Goppertshofen Juni 2016 nicht für die quantitative Auswertung verwendet werden konnte, da für dieses Ereignis keine durchgehende, gemessene Abflussganglinie vorliegt.

Abbildung 7 verdeutlicht nochmals, dass sowohl in der Standard-Konfiguration der Variante 1 wie auch in der Variante 2 a) eine systematische Unterschätzung der beobachteten Scheitelabflüsse vorliegt. Im extremsten Fall (Variante 1 für Reisdorf 2016) beträgt der simulierte Scheitelabfluss weniger als 1/13 der Messung. In den meisten anderen Fällen der Varianten 1 und 2 a) liegen die simulierten Scheitel im Bereich von nur ca. 1/6 bis 1/3 der gemessenen Scheitel. Lediglich für die Pegel Rangendingen und Kocherstetten sind die Unterschätzungen der Scheitel mit MF von ca. -1,7 bis -1,4 geringer. Für den Pegel Kocherstetten am Kocher ist aber zu beachten, dass der simulierte Scheitel nicht bei der ersten starkregeninduzierten Welle auftritt, sondern bei der zweiten Welle, die aus dem oberstromigen Einzugsgebiet stammt (Abb. 6). Wenn man nur die für die Reaktion auf das Starkregenereignis relevante erste Welle zur Auswertung heranziehen würde, ergäben sich für Kocherstetten MF von -3,7 für die Variante 1 bzw. -2,2 für Variante 2 a).

Für die Variante 3 a), in der das Infiltrationsmodul genutzt wird, ergeben sich hingegen sowohl positive wie auch negative MF für die Scheitel. Dabei liegen sowohl die Überschätzungen wie auch die Unterschätzungen nahe bei +1 bzw. -1 (Wertebereich: -1,37 für Goppersthofen Mai 2016 bis +1,18 für Hommerich; Abb. 7).

Die quantitative Auswertung der Scheitel untermauert also die Erkenntnisse aus der visuellen Ganglinienanalyse. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die simulierten Scheitelabflüsse auch durch die kalibrierten Werte des Parameters EQD2 beeinflusst werden. Daher wird im Folgenden das Abflussvolumen als weiteres Kriterium herangezogen. Der Parameter EQD2 beeinflusst die Dynamik des schnellen Direktabflusses, nicht aber die Dynamik der drei anderen, langsameren Abflusskomponenten. In allen hier vorliegenden Fällen kommt der ereignisspezifische schnelle Direktabfluss während des Auswertungszeitraums vollständig zum Abfluss. Folglich sind die ermittelten Abflussvolumina un-



Abbildung 7

Multiplikative Fehler MF der Scheitelabflüsse der Simulationsvarianten. Multiplicative errors MF of the peak discharges of the simulation versions. abhängig von EQD2, wodurch die Volumenauswertung einen objektiven Vergleich der Varianten sicherstellt.

Abbildung 8 zeigt, dass auch die Abflussvolumina der Ereignisse mit den Varianten 1 und 2 a) systematisch unterschätzt werden. Nur für den Pegel Rangendingen ergibt sich in der Variante 1 eine Überschätzung des Abflussvolumens, was vermutlich auf die oben erläuterte Überschätzung des Gebietsniederschlags durch die Stationsdaten zurückzuführen ist (LUBW, 2020). In der Variante 3 a) mit dynamischem Infiltrationsmodul ergeben sich hingegen gleichermaßen Unter- und Überschätzungen des Abflussvolumens. Die MF liegen dabei im Allgemeinen nahe bei +1 bzw. -1, wobei die größte Fehleinschätzung für den Pegel Hommerich mit einer Überschätzung um das 1,64-fache auftritt.

Beim Volumen sind die systematischen Fehler der Varianten 1 und 2 a) erwartungsgemäß geringer als bei den Scheiteln, da für den Scheitel nicht nur die Abflussmenge ausschlaggebend ist, sondern auch die Aufteilung in unterschiedlich dynamisch reagierende Abflusskomponenten. In den Varianten 1 und 2 a) wird im Vergleich zur Variante 3 a) zu wenig des sehr dynamisch reagierenden schnellen Direktabflusses gebildet. Daher kann eine moderate Unterschätzung des Abflussvolumens in den Varianten 1 und 2 a) eine drastische Unterschätzung des Scheitels erzeugen. Aber selbst wenn man diesen Aspekt der Aufteilung in unterschiedlich schnell reagierende Abflusskomponenten außer Acht lässt und nur das Abflussvolumen als Kriterium heranzieht, sind die Ergebnisse der Variante 3 a) eindeutig besser als die der Variante 1 und der direkt vergleichbaren Variante 2 a) (Abb. 8).

Mit den LARSIM-Modellen mit dynamischem Infiltrationsmodul können die hier untersuchten starkregenbedingten Hochwasser bei Verwendung des bestmöglichen Radarniederschlags somit insgesamt gut abgebildet werden. Die Vergleiche der Modellkonfigurationen verdeutlichen, dass die Berücksichtigung der dynamischen Infiltration dabei der entscheidende Faktor ist, um die Abflussreaktion auf Starkregenereignisse adäquat abbilden zu können.



Abbildung 8

Multiplikative Fehler MF der Abflussvolumina der Simulationsvarianten. Multiplicative errors MF of the discharge volumes of the simulation versions.

6.2 Einfluss des Niederschlagsinputs

In diesem Abschnitt werden die bereits zuvor analysierten Varianten 2 a) und 3 a) (bestmöglicher Radarniederschlag) zusätzlich mit den Varianten 2 b) und 3 b) verglichen, die jeweils mit den unveränderten Niederschlagswerten aus RADKLIM-YW berechnet wurden. Die jeweiligen a)- und b)-Varianten unterscheiden sich somit nur hinsichtlich des verwendeten Niederschlagsinputs. In Abbildung 9 werden die simulierten Ganglinien der vier Varianten mit den Messungen verglichen. Zusätzlich sind die Summenkurven der Niederschläge des bestmöglichen Radarniederschlags (Varianten 2 a) und 3 a)) und des hier nicht weiter angepassten RADKLIM-YW-Niederschlags (Varianten 2 b) und 3 b)) dargestellt.

Bei den beiden Ereignissen in Goppertshofen wurden für die bestmögliche Abbildung des Niederschlags die SuperHD-Daten der Firma Meteologix verwendet (Kapitel 4.2.3). Für Goppertshofen Juni 2016 zeigen beide Radarprodukte einen ähnlichen zeitlichen Verlauf. Die Summe des Gebietsniederschlags ist bei RADKLIM-YW aber ca. 35 % höher als bei SuperHD. Für Goppertshofen Mai 2016 sind die Niederschlagssummen der beiden Radarprodukte ähnlich, sie zeigen aber deutliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Gemäß den Ergebnissen in LUBW (2019) und (2020) sind die hier für Goppertshofen festgestellten Unterschiede zwischen den beiden Radarprodukten in einer typischen Größenordnung, wie sie auch für andere Ereignisse immer wieder auftreten. Die Unterschiede hinsichtlich der Niederschlagsmenge sind dabei jedoch nicht systematisch, vielmehr kann in einem Fall RADKLIM-YW mehr Niederschlag liefern und in einem anderen SuperHD. Ebenso liefern die Abflusssimulationen für manche Ereignisse mit SuperHD bessere Ergebnisse und für andere mit RADKLIM-YW (LUBW, 2020).

Bei allen anderen hier untersuchten Ereignissen stellt der bestmögliche Niederschlag eine im Rahmen dieser Studie durchgeführte Korrektur der RADKLIM-YW-Daten dar (Kapitel 4.2.1). Diese Korrektur führte bei allen hier untersuchten Ereignissen zu einer Erhöhung des Gebietsniederschlags um minimal 20 % (Reisdorf

> 2018) bis zu maximal 67 % (Hommerich). Auch hier ist jedoch darauf hinzuweisen, dass in LUBW (2019) auch mehrere umgekehrte Fälle identifiziert wurden, in denen die RADKLIM-YW-Niederschläge im Vergleich zu Stationsdaten (die dem DWD nicht zur Aneichung zur Verfügung standen) deutlich zu hoch waren. Es kann also nicht grundsätzlich von einer systematischen Unterschätzung der RADKLIM-YW-Niederschläge ausgegangen werden.

> Insgesamt liegen die Unterschiede zwischen den bestmöglichen Radarniederschlägen und den RADKLIM-YW-Niederschlägen in dem Bereich der von uns bislang häufig vorgefundenen Abweichungen zwischen unterschiedlichen Radarprodukten (LUBW, 2019; 2020). Daher gehen wir davon aus, dass die hier analysierten Unterschiede charakteristisch für die häufig vorzufindende Unsicherheit von Radarniederschlägen sind. Der Vergleich zwischen den Varianten 3 a) und 3 b) erlaubt damit Aussagen über den typischen

Einfluss der Niederschlagsunsicherheit auf die simulierte Abflussreaktion starkregeninduzierter Ereignisse.

Abbildung 9 verdeutlicht, dass diese typische Unsicherheit des Radarniederschlags eine erhebliche Unsicherheit für die simulierte Abflussreaktion zur Folge hat. Infolge der veränderten Niederschläge ergeben sich im Vergleich zwischen den Varianten 3 a) und 3 b) Unterschiede in den Scheitelabflüssen zwischen -58 % (Hommerich) und +86 % (Goppertshofen Juni 2016). Dies lässt sich wiederum besser als multiplikative Abweichung analog zum MF ausdrücken. Die Abweichungsfaktoren zwischen den beiden Varianten liegen zwischen 1,1 für Goppersthofen Mai 2016 und 2,4 für Hommerich. Der mittlere Abweichungsfaktor zwischen Variante 3 a) und 3 b) für alle sieben Ereignisse liegt bei 1,8. Das heißt, die hier zugrunde gelegte Unsicherheit des radarbasierten Starkregenniederschlags resultiert in einem mittleren Unsicherheitsfaktor von 1,8 für den simulierten Abflussscheitel. Auf Basis der sieben hier analysierten Ereignisse erscheint es also plausibel, dass der für ein Starkregenereignis simulierte Scheitelabfluss alleine aufgrund der Unsicherheit des Radarniederschlags typischerweise grob im Bereich einer Unterschätzung um die Hälfte und einer Überschätzung um das Doppelte liegt (Unsicherheitsfaktor ~ 2).

Die Unterschiede zwischen den Varianten 2 a) und 3 a), die durch die Modellkonfiguration bedingt sind, sind meist größer als die niederschlagsbedingten Unterschiede zwischen 3 a) und 3 b) (Abb. 9). Die multiplikativen Abweichungsfaktoren für den Vergleich der simulierten Scheitel der Varianten 2 a) und 3 a) liegen dabei zwischen 1,5 für Rangendingen und 6,0 für Reisdorf 2016. Der mittlere Abweichungsfaktor zwischen den Scheiteln der Varianten 2 a) und 3 a) beträgt 3,1 und ist damit deutlich größer als der mittlere Abweichungsfaktor von 1,8 zwischen 3 a) und 3 b). Dies unterstreicht nochmals die Bedeutung der Modellverbesserung auch im Vergleich zu der verbleibenden Unsicherheit durch den Niederschlagsinput.

Der Vergleich der Ganglinien für die Varianten 2 b) und 3 b) zeigt, dass das dynamische Infiltrationsmodul (Variante 3 b)) auch bei Nutzung der unveränderten RADKLIM-YW-Niederschläge in der Regel zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse führt (Abb. 9). Dies wird auch durch die quantitative Auswertung der multiplikativen Fehler für die Scheitelabflüsse und die Abflussvolumina bestätigt (Abb. 7 und 8). Die bei Verwendung von RADKLIM-YW in der Variante 2 b) teils drastischen Unterschätzungen der Scheitel mit einem mittleren MF von -5,0 werden in der Variante 3 b) mit einem mittleren MF von -1,8 deutlich reduziert (Abb. 7). Ähnliches gilt auch für die Abflussvolumina, für die der mittlere MF von -2,9 in Variante 2 b) auf -1,5 in Variante 3 b) reduziert wird (Abb. 8). Die Ergebnisse unterstreichen also, dass die Einführung des dynamischen Infiltrationsmoduls auch bei unsicherem Niederschlagsinput zu einer klaren Verbesserung bei der Simulation starkregeninduzierter Abflüsse mit LARSIM führt.

6.3 Anwendungsbereiche des weiterentwickelten Modells

Fluviale Hochwasser, die in der Folge langanhaltender, ergiebiger Niederschläge und möglicherweise hoher Vorsättigung des Einzugsgebiets auftreten, werden mit der bislang genutzten Standardkonfiguration (Variante 1) gut abgebildet. Für diese fluvialen Hochwasser haben sich der einfache konzeptionelle Ansatz mit einer Kombination aus der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion BSF und A2 sowie eine Zeitschrittweite von einer Stunde bewährt. Ergänzend steht LARSIM nun auch in der hier vorgestellten, um das Infiltrationsmodul erweiterten Konfiguration zur Verfügung (Variante 3). Damit können lokale, starkregenbedingte Hochwasser simuliert und vorhergesagt werden, die durch Infiltrationsüberschuss und Horton-Oberflächenabfluss dominiert sind. Allerdings reagiert die Variante 3 im Vergleich zu Variante 1 sehr sensitiv auf den Niederschlagsinput (Abb. 9), der insbesondere bei längerfristigen meteorologischen Vorhersagen hinsichtlich Menge und Intensität sehr unsicher ist. Zudem ist auch bei kurzfristigen meteorologischen Vorhersagen die exakte Lage eines Starkregen-Niederschlagsfelds mit erheblicher Unsicherheit behaftet, was wiederum Auswirkungen darauf hat, für welches Gewässer ein starkregenbedingtes, lokales Hochwasser vorhergesagt wird (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020).

Vor diesem Hintergrund wird für die operationelle Vorhersage fluvialer Hochwasser und deren zeitlichen Verlauf weiterhin die bewährte Variante 1 mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde verwendet. Parallel kann zukünftig die Variante 3 mit Infiltrationsmodul und einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten verwendet werden, um damit pluviale Hochwasser in der Folge von lokalem Starkregen besser vorherzusagen. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Intensität und räumlichen Zuordnung der vorhergesagten Niederschläge sollten die Vorhersagen lokaler starkregenbedingter Hochwasser jedoch generalisiert und in eine regionale Warninformation überführt werden.

Die dargestellten Weiterentwicklungen und Analysen zielen vor allem auf eine verbesserte Simulation und Vorhersage von starkregeninduzierten Hochwassern ab. Folglich haben sich die Betrachtungen bislang auf die Abflüsse an Pegeln bzw. in Gewässern konzentriert. Insbesondere durch die räumlich sehr hoch aufgelöste UTGB-spezifische Berechnung des Infiltrationsüberschusses und des daraus resultierenden HOF ergeben sich aber auch weitere Anwendungsmöglichkeiten vor allem für den flächendifferenziert ermittelten Infiltrationsüberschusse.

Im Zusammenhang mit Starkregengefahrenkarten kann der durch LARSIM je UTGB (Hydrotop) ermittelte Infiltrationsüberschuss z. B. analog zum Vorgehen mit RoGeR in Baden-Württemberg als Eingangsgröße für detaillierte hydraulische Berechnungen des außerhalb der Gewässerläufe wild abfließenden Oberflächenabflusses genutzt werden (LUBW, 2016), wobei die räumliche Auflösung bei RoGeR aber noch deutlich höher ist als die der UTGB in LARSIM.

Auch bei der großräumigen Stoffeintragsmodellierung, bei der LARSIM bereits als hydrologische Grundlage für die Berechnung diffuser Stoffeinträge genutzt wird (LUBW, 2017; KRUMM et al., 2020), ergeben sich deutliche Verbesserungen. Für diffuse Stoffeinträge ist häufig der Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss auf landwirtschaftlichen Flächen von entscheidender Bedeutung. Durch den HOF, der bei kurzzeitigen, intensiven Ereignissen entsteht, können über Erosion und Abschwemmung so große Mengen partikulärer bzw. gelöster Nähr- und Schadstoffe in die Gewässer eingetragen werden, dass die kurzzeitigen Ereignisse häufig maßgeblich für die langjährige Eintragsbilanz sind (LAZAROTTO et al., 2005; TANG et al., 2012; HAHN et al., 2013). Auch für eine langjährige mittlere Bilanzierung ist es daher erforderlich, den Oberflächenabfluss bei solchen sporadisch auftretenden, kurzzeitigen Ereignissen möglichst exakt einzubeziehen. Hierfür können die bislang bereits





	Messung 15min		
	Variante 2 a)	•••••	a) N bestmöglich
	Variante 2 b)		b) N Standard
	Variante 3 a)		
	Variante 3 b)		

Abbildung 9

Gangliniendarstellungen der gemessenen Abflüsse im Vergleich mit den simulierten Abflüssen der Varianten 2 a), 2 b), 3 a) und 3 b). Hydrographs of measured discharge in comparison with simulated discharge of versions 2 a), 2 b), 3 a) and 3 b).

bei der Stoffeintragsmodellierung verwendeten langjährigen LARSIM-Wasserhaushaltssimulationen nun durch ereignisspezifische Betrachtungen ergänzt werden. Dabei werden Zeiträume mit hohen Niederschlagsintensitäten separat in kurzen Berechnungszeitschritten von 5 oder 15 Minuten unter Nutzung von Radarniederschlägen mit dynamischer Infiltration (Variante 3) simuliert. Für diese Ereignisse liegt dann der simulierte HOF räumlich sehr hoch aufgelöst für jedes UTGB (Hydrotop) vor, sodass er räumlich differenziert je Landnutzung quantifiziert werden kann. Der so ermittelte landnutzungsspezifische HOF kann zur Quantifizierung der diffusen Stoffeinträge über Oberflächenabflusspfade (Abschwemmung, Erosion) genutzt werden (AGE, 2021). Durch eine geeignete Anwendung des dynamischen Infiltrationsmoduls werden somit auch die mit LARSIM ermittelbaren hydrologischen Grundlagen für eine großräumige Stoffeintragsmodellierung deutlich verbessert (KRUMM et al., 2020).

6.4 Defizite und Verbesserungspotenziale

Die Varianten 3 a) und 3 b) wurden mit dynamischem Infiltrationsmodul und ohne den Parameter A2 berechnet. Der schnelle Direktabfluss wird daher nur durch Infiltrationsüberschuss gebildet und repräsentiert ausschließlich Horton-Oberflächenabfluss (HOF). Der mögliche Beitrag von Sättigungsflächen-Oberflächenabfluss (SOF) wird in der Variante 3 mit der zweitschnellsten Abflusskomponente, dem langsamen Direktabfluss, abgeführt (Abb. 2). Bei den hier untersuchten Ereignissen handelt es sich um intensive sommerliche Starkregen bei geringen Vorfeuchten, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sie durch Infiltrationsüberschuss und HOF dominiert wurden. Entsprechend können diese pluvialen Ereignisse trotz der genannten Einschränkung mit der Variante 3 a) gut simuliert werden. Folglich kann die Variante 3 wie oben beschrieben zur Vorhersage starkregenbedingter lokaler Hochwasser genutzt werden. Sonstige Hochwasser, die in der Regel durch die allmählich zunehmende Sättigung der Böden im Einzugsgebiet und die damit verbundene Aktivierung von lateralen unterirdischen Fließwegen und Sättigungsflächen dominiert werden, können hingegen mit dem einfachen konzeptionellen Ansatz der Variante 1 gut simuliert und vorhergesagt werden. Darüber hinaus gibt es jedoch auch Hochwasser, die aus einer Kombination von intensitätsbedingtem HOF und sättigungsbedingten Abflusskomponenten resultieren. Für solche Ereignisse wäre es wünschenswert, die Modellkonfigurationen der Varianten 1 und 3 zu kombinieren. Eine einfache Kombination des physikalischen Infiltrationsmoduls mit dem konzeptionellen Schwellenwert-Ansatz mit A2 ist jedoch kritisch zu sehen, da die gleichzeitige Nutzung des Infiltrationsmoduls und des kalibrierten Schwellenwerts A2 zu einer Überschätzung der Abflussreaktion führen würde (LUBW, 2019). Vor diesem Hintergrund ist also eine schlüssigere Kombination der Ansätze für Infiltrationsüberschuss und sättigungsbedingte Abflussreaktionen anzustreben. Hierzu sollte zukünftig auch die sättigungsbedingte Abflussbildung möglichst physikalisch basiert abgebildet werden. Für eine Nutzung im operationellen Vorhersagemodell LARSIM muss ein solches, physikalisch basiertes Modul jedoch genauso wie das Infiltrationsmodul durch großräumig verfügbare Daten zuverlässig parametrisierbar sein und es muss für die Echtzeit-Vorhersage zugleich sehr recheneffizient sein.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zudem zu beachten, dass das in Variante 3 erfolgreich angewandte kalibrierfreie Infiltrationsmodul nur die Menge des Infiltrationsüberschusses und des daraus resultierenden HOF liefert, der in LARSIM als schneller Direktabfluss über die Abflusskonzentration in die Gewässer abgeführt wird. Die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses wird über einen zu kalibrierenden Parameter (EQD2) bestimmt. Somit hängen Geschwindigkeit und Scheitel eines HOF-dominierten Ereignisses neben dem Infiltrationsmodul auch von diesem Kalibrierparameter ab. Mit einer herkömmlichen Modellkalibrierung, bei der im Kalibrierzeitraum kein HOF-dominiertes Ereignis vorliegt, lässt sich EQD2 nur schwer anpassen (HAAG et al., 2016). Um möglichst zuverlässige Vorhersagen für Hochwasser in Folge lokaler Starkregen auch für solche Gebiete zu ermöglichen, in denen bislang noch kein HOFdominiertes Ereignis zur Kalibrierung der Abflusskonzentration aufgetreten ist, wäre es daher wünschenswert, zukünftig die Abflusskonzentration des Oberflächenabflusses mithilfe eines kalibrierfreien Verfahrens (vorab) verlässlich festzulegen.

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass das Infiltrationsmodul nur den Infiltrationsüberschuss für das jeweilige UTGB (Hydrotop) berechnet. Bislang nicht berücksichtigt werden in LARSIM aber der Rückhalt in der Fläche sowie eine mögliche Infiltration des Oberflächenabflusses auf dem Weg in die Gerinne (also bei der Abflusskonzentration). In der vorliegenden Studie wurden überwiegend extreme Starkregen analysiert, bei denen der Rückhalt in der Fläche und eine mögliche Infiltration auf dem Fließweg hinsichtlich des sehr großen Gesamtabflusses relativ gesehen wahrscheinlich unbedeutend sind. Bei kleineren Ereignissen kann der Einfluss der genannten Prozesse jedoch deutlicher sichtbar werden. Dies ist möglicherweise auch eine Erklärung dafür, weshalb das im Vergleich zu den anderen hier untersuchten Ereignissen relativ kleine Hochwasser am Pegel Hommerich (HQ5) in der Variante 3 a) überschätzt wurde. Für eine weitere Verbesserung mit Blick auf die Starkregen-Problematik sollten gemeinsam mit einem kalibrierfreien Verfahren zur Abflusskonzentration von HOF zukünftig auch der Rückhalt an der Geländeoberfläche sowie die mögliche Infiltration auf dem Fließweg im Modell berücksichtigt werden. Hierdurch sind weitere Verbesserungen vor allem bei der Simulation lokaler Hochwasser infolge kleinerer Starkregenereignisse zu erwarten.

7. Folgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Studie wird dargestellt, wie das physikalisch basierte Infiltrationsmodul des Forschungsmodells RoGeR in das WHM LARSIM überführt wurde und wie das Modul anhand großräumig verfügbarer Boden- und Landnutzungsdaten in unterschiedlichen Gebieten parametrisiert werden kann. Die Wirksamkeit der Weiterentwicklung und der auf unterschiedlichen Datengrundlagen basierenden Parametrisierung wird anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf verschiedenen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Luxemburg und Nordrhein-Westfalen erfolgreich getestet.

Die hier vorgenommenen Auswertungen zeigen, dass bei ausreichend hoher Güte des Niederschlags die Abflussreaktion der Einzugsgebiete auf extreme sommerliche Starkregen mit dem weiterentwickelten Modell gut nachvollzogen wird. Sie stehen damit im Einklang mit Analysen, die für insgesamt 46 weitere Ereignisse in 24 unterschiedlichen Einzugsgebieten mit RoGeR bzw. LARSIM in Baden-Württemberg bereits durchgeführt wurden (STEINBRICH et al., 2016; HAAG et al., 2019). In Zusammenschau mit diesen bereits vorliegenden Ergebnissen kann also davon ausgegangen werden, dass die relevanten Prozesse mit dem aus RoGeR übernommenen dynamischen Infiltrationsmodul ausreichend gut abgebildet werden und die vorgestellte einfache Parametrisierung des Moduls in den meisten Fällen erfolgreich ist. Die hier dargestellten Ergebnisse für Luxemburg und NRW legen zudem nahe, dass die Parametrisierungsstrategie auch auf Gebiete mit anderer Datengrundlage übertragen werden kann.

Damit ist eine wichtige Grundlage für die Nutzung des Modells LARSIM in der operationellen Vorhersage starkregenbedingter lokaler Hochwasser geschaffen. Unsere Ergebnisse verdeutlichen aber auch, dass die Simulations- und Vorhersagequalität für solche Ereignisse stark von der Güte der (operationellen) Radarprodukte und der Niederschlagsvorhersagen abhängt. Radar-Niederschläge und Niederschlagsvorhersagen sind hinsichtlich Menge, Intensität, zeitlichem Verlauf und genauer räumlichen Lage aber nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020). Daher sollten die Vorhersagen für Hochwasser in Folge lokaler Starkregen generalisiert und in regionale Warnhinweise überführt werden. Zudem sollte neben Weiterentwicklungen an LARSIM ein Hauptaugenmerk auch auf der weiteren Verbesserung operationeller radarbasierter Niederschlagsmessungen und -vorhersagen liegen.

Insbesondere die nun mögliche flächendifferenzierte Simulation des Infiltrationsüberschusses infolge intensiver Niederschläge eröffnet neben der operationellen Vorhersage weitere Anwendungsmöglichkeiten des WHM LARSIM. So kann das Modell zur Ermittlung der Eingangsgrößen für Starkregengefahrenkarten und zur validen Berechnung von Horton-Oberflächenabfluss bei der Modellierung diffuser Stoffeinträge über Abschwemmung und Erosion genutzt werden.

Selbstverständlich sollte der hier vorgestellte Infiltrationsansatz für zusätzliche Ereignisse und Einzugsgebiete validiert werden, um möglicherweise bislang übersehene Defizite aufzuzeigen. Unmittelbares Verbesserungspotenzial besteht bei der Berechnung der Abflusskonzentration von Oberflächenabfluss. Diese sollte zukünftig vorzugsweise mit einem robusten kalibrierfreien Verfahren erfolgen, wobei auch der Rückhalt an der Geländeoberfläche und die mögliche Infiltration auf dem Fließweg ins Gewässer berücksichtigt werden sollten. Langfristig erscheint es erstrebenswert, die physikalische Basis des Modells weiter auszubauen, soweit die großräumigen Datengrundlagen dies erlauben. Hierdurch sollte vor allem auch eine verbesserte Simulation bei gleichzeitigem Auftreten von Horton-Oberflächenabfluss und sättigungsbedingtem Hochwasserabfluss ermöglicht werden.

Conclusion and outlook

The present work describes the integration of the physically based infiltration module of the research model RoGeR into the water balance model LARSIM. A robust parameterization strategy for the module has been developed on the basis of readily available land use and soil data and has been applied to different regions. The validity of the newly implemented module, its parametrization and its transferability to different regions is successfully tested for seven intense rain events in five different catchments in Baden-Württemberg, Luxembourg and North-Rhine Westphalia. The analysis shows that the discharge reaction of the catchments triggered by intense summer precipitation can be well simulated using the refined model, if precipitation data is sufficiently precise. Also considering the validation results for 46 additional events in 24 additional catchments in Baden-Württemberg (STEINBRICH et al., 2016; HAAG et al., 2019), it can thus be deduced that the relevant processes are well captured with the newly integrated infiltration module and that the presented parametrization is successful. The results presented for Luxemburg and North-Rhine Westphalia suggest that the parametrization strategy is also applicable to regions outside the federal state of Baden-Württemberg.

This constitutes an important precondition for predicting floods caused by intense precipitation with LARSIM. However, our results also highlight the importance of precipitation input for the quality of discharge forecasts. Radar based precipitation measurements and forecasts are still associated with considerable uncertainty with respect to quantity, intensity, temporal evolution and spatial distribution (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020). Therefore, it is advisable to generalize the predictions of floods caused by local storms and use them as a basis for regional flood warning. Besides enhancing the hydrological model LARSIM it is also important to further improve radar based real-time precipitation measurements and forecasts.

The spatially distributed simulation of infiltration excess after intense rain events also enables the utilization of LARSIM for other purposes. The model can for example be applied to determine the spatially distributed infiltration excess as the input for the hydraulic simulation of flashflood hazard maps. Moreover, the realistic quantification of Horton Overland Flow may also improve the modeling of diffuse emissions via surface runoff and erosion.

Further validation for additional catchments and events is recommended, in order to identify so far overlooked potential deficits of the infiltration approach presented here. Immediate potential for improvement exists concerning the simulation of runoff concentration of the overland flow in LARSIM. This should preferably be tackled by a robust approach free of calibration, also taking into account retention at the terrain surface and possible infiltration along the flow path towards the watercourse. In the long run, it seems desirable to expand the physical foundation of the model along with the availability of reliable large-scale data. This should particularly permit an improved simulation of situations in which Horton Overland Flow and saturation driven runoff occur at the same time.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die verwendeten Modelle sind Eigentum der jeweiligen im Artikel genannten Auftraggeber und werden durch die Autoren daher nicht öffentlich zugänglich gemacht. Die im Rahmen der Studie erzeugten Modellergebnisse können auf ordnungsgemäße Anfrage bei den Verfassern und mit Zustimmung der jeweiligen Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Die Implementierung des Infiltrationsmoduls in LARSIM, die Ausarbeitung der Parametrisierungsstrategie, die landesweite Parametrisierung für Baden-Württemberg sowie die Analysen der drei baden-württembergischen Einzugsgebiete erfolgten im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). Wir danken insbesondere Dr. Manfred Bremicker für die Initiierung der Arbeiten sowie Angela Sieber, Ulla Schlenk und Ute Badde für die Datenbereitstellung und die umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung. Wir danken dem LfU Rheinland-Pfalz für die Übertragung der Parametrisierung auf das Mosel-Einzugsgebiet. Die Analyse der beiden Hochwasser an der Weißen Ernz erfolgte im Auftrag der luxemburgischen Administration de la gestion de l'eau (AGE). Wir danken vor allem Noémie Patz und Christophe Gilbertz von der AGE für die Bereitstellung der Daten und die Begleitung der Arbeiten für die Weiße Ernz. Die Arbeiten für das Einzugsgebiet in Nordrhein-Westfalen wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WGR1431F gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte der Veröffentlichung liegen jedoch bei den Autoren. Darüber hinaus danken wir Julianna Regenauer, Katharina Teltscher, Michael Kraft und Dr. Manuel Antonetti für ihre Unterstützung im Zusammenhang mit der Simulation von Starkregen mit LARSIM. Abschließend bedanken wir uns bei zwei anonymen Gutachtern, deren konstruktive Hinweise zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

Anschriften der Verfasser

Dr.-Ing. Ingo Haag Julia Krumm, M.Sc. Dirk Aigner, Dipl. Geogr. HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Ritterstraße 9 76137 Karlsruhe ingo.haag@hydron-gmbh.de julia.krumm@hydron-gmbh.de dirk.aigner@hydron-gmbh.de

Andreas Steinbrich, Dipl.-Hyd. Prof. Dr. Markus Weiler Professur für Hydrologie der Universität Freiburg Friedrichstraße 39 79098 Freiburg andreas.steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung – KA5. Schweizerbart, Stuttgart; 5. Auflage.
- AGE ADMINISTRATION DE LA GESTION DE L'EAU, LUXEMBOURG (2020): Vorstudie zur Fortschreibung des operationellen LARSIM Systems zur Hochwasserfrühwarnung in kleineren Einzugsgebieten im WHM Sauer – Starkregen Weiße Ernz. HYDRON GmbH im Auftrag der AGE, unveröffentlicht.
- AGE ADMINISTRATION DE LA GESTION DE L'EAU, LUXEMBOURG (2021): LARSIM-Wasserhaushaltsmodellierung und Ermittlung von Abflusskomponenten als Grundlage für die Modellierung diffuser Stoffeinträge mit MoRE für Luxemburg. HYDRON GmbH im Auftrag der AGE, unveröffentlicht.
- BARTELS, J., BLIEFERNICHT, J., SEIDEL, J., BÁRDOSSY, A., KUNSTMANN, H., JOHST, M. & N. DEMUTH (2017): Bewertung von Ensemble-Abflussvorhersagen für die operationelle Hochwasserwarnung. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 61, (5), 297–310. DOI: 10.5675/HyWa_2017,5_1.
- BBK BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHEN-HILFE (2015): Die unterschätzten Risiken "Starkregen" und "Sturzfluten". Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.

- BERNDT, C. (2020): Dokumentation zur Aufbereitung der Bodendaten für das neue LARSIM-Bodeninfiltrationsmodul – Teil 1. Interne Dokumentation des LfU Rheinland-Pfalz.
- BEVEN, J. (2012): Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons, New York; 2. Auflage.
- BEVEN, K.J. & R.T CLARKE (1986): On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores. Water Resources Research, 22 (3), 383–388.
- BLOUIN, M, HODSON, M.E., DELGADO, E.A., BAKER, G., BRUSSAARD, L., BUTT, K.R., DAI, J., DENDOOVEN, L., PERES, G., TONDOH, J.E., CLUZEAU, D. & J.-J. BRUN (2013): A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. European Journal of Soil Science, 64, 161-182.
- BORGA, M., ANAGNOSTOU, E.N., BLÖSCHL, G. & J.-D. CREUTIN (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: the HY-DRATE project. Environmental Science & Policy 14 (7), 834–844. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- BRAHMER, G. (2010): Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen. Jahresbericht 2009 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. & I. HAAG (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendung. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (9), 509–519.
- BREMICKER, M., CASPER, M.C. & I. HAAG (2011): Extrapolationsfähigkeit des Wasserhaushaltsmodells LARSIM auf extreme Abflüsse am Beispiel der Schwarzen Pockau. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2011/4 (8), S. 445–451.
- BREMICKER, M., HOMAGK, P. & K. LUDWIG (2006): Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. Wasserwirtschaft, 2006 (7–8), S. 46–50.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEIS-TERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & D. WENDI (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 61. 2017 H.3, 150–162.
- BRONSTERT, A., THIEKEN, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HAHN, I., KÖHN, L., LAUDAN, J., MORAN, T., ÖZTÜRK, U., RIEMER, A., RÖZER, V., SIEG, T., VOGEL, K., & D. WENDI (2016): Die Sturzflut in Braunsbach, Mai 2016 – Eine Bestandsaufnahme und Ereignisbeschreibung. Taskforce im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs Natural Hazards and Risks in a Changing World an der Universität Potsdam. www.geo.uni-potsdam.de/tl_files/news/TaskForceBraunsbach.pdf.
- CAPOWIEZ, Y., SAMMERTINO, S. & E. MICHEL (2014): Burrow systems of endogeic earthworms. Effects of earthworm abundance and consequence for soil water infiltration. Pedobiologia 57:303–309. DOI:10.1016/j.pedobi.2014.04.001.
- CECINATI, F., RICO-RAMIREZ, M.A., HEUVELINK, G.B., & D. HAN (2017): Representing radar rainfall uncertainty with ensembles based on a time-variant geostatistical error modelling approach. Journal of Hydrology, Nr. 548: S. 391–405. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.053.
- DWD DEUTSCHER WETTERDIENST (2016): Starkniederschläge in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland.
- GEOLOGISCHER DIENST NRW (2018): Informationssystems Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1 : 50 000 (IS BK 50). Abgerufen am: 15.03.2018. http://www.gis-rest.nrw.de/atomFeed/rest/ atom/5c120c49-1486-4fc0-827c-da14624af4a4.html.

- GERLINGER, K. & N. DEMUTH (2001): The LARSIM model of the Moselle river basin as an example of flood forecasting in a transboundary water system. IHP/OHP-Berichte Sonderheft 12 "Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management", Koblenz, S. 219–222.
- GÖPPERT, H. (2018): Auswertung von abgelaufenen Starkregenereignissen über Radarmessungen. Wasserwirtschaft, Heft 11/2018, 44–50.
- GREEN, W.H. & G.A. AMPT (1911): Studies in soil physics. 1 The flow of air and water through soils. Journal of Agriculture Science, 4, 1–24.
- HAAG, I., AIGNER, D. & G. RAFFEINER (2019a): Ein robustes Gletschermodul für die Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung auf der Basis unterschiedlicher verfügbarer Daten. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 41.19, S. 99–104.
- HAAG, I., AIGNER, D., KRUMM, J., REGENAUER, J., STEINBRICH, A., WEILER, M., SIEBER, A. & M. BREMICKER (2019b): Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 41.19, S. 105–110.
- HAAG, I., JOHST, M., SIEBER, A. & M. BREMICKER (2016): Leitfaden zur Kalibrierung von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage. LARSIM-Entwicklergemeinschaft.
- HAHN, C., PRASUHN, V., STAMM, C., LAZZAROTTO, P., EVANGELOU, M. W. H., & R. SCHULIN (2013): Prediction of dissolved reactive phosphorus losses from small agricultural catchments: calibration and validation of a parsimonious model, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 3679–3693. DOI: 10.5194/hess-17-3679-2013.
- HAPUARACHCHI, H., WANG, Q. & T.C. PAGANO (2011): A review of advances in flash flood forecasting. Hydrol. Process. 25 (18), 2771–2784.
- HARTGE, K.H. & R. HORN (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Schweizerbarth science publishers, Stuttgart; 4. Auflage.
- HELSEL, D.R. & R.M. HIRSCH (2002): Statistical Methods in Water Resources. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation. Chapter A3. USGS. DOI: 10.3133/twri04A3.
- HENGST, A. (2021): Dokumentation zur Aufbereitung der Bodendaten für das neue LARSIM-Bodeninfiltrationsmodul – Teil 2. Interne Dokumentation des LfU Rheinland-Pfalz.
- KRUMM, J., HAAG, I. & K. TELTSCHER (2020): Multidisziplinäre Datenakquisition als Schlüssel für ein global anwendbares Wasserressourcenmanagement – Teilprojekt 2: Wasserhaushaltsmodellierung. Schlussbericht des BMBF-Projekts mit dem Förderkennzeichen 02WGR1431F.
- LAZZAROTTO, P., PRASUHN, V., BUTSCHER, E., CRESPI, C., FLÜHLER, H. & C. STAMM (2005): Phosphorus export dynamics from two Swiss grassland catchments. J. Hydrol., 304 (1–4): 139–150. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.027.
- LEG LARSIM ENTWICKLERGEMEINSCHAFT (2020): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation. pdf, Stand: 05.03.2020.
- LGRB LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (2017): Bodenkarte 1 : 50.000 (GeoLa BK 50). http://maps.lgrb-bw.de.
- LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2017): Fortschreibung der WHM Oberrhein, Hochrhein und Bodensee mit aktualisierten Bodendaten und landesweite LARSIM-Ausgaben für METRIS (Monatswerte für 1998-2014). HYDRON GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).

- LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2019): LARSIM-Weiterentwicklungen für Starkregenereignisse. HYDRON GmbH in Zusammenarbeit mit der Professur für Hydrologie (Uni Freiburg) im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2020): Analyse von Starkregenereignissen für das gesamte Einzugsgebiet des oberen Neckars bis Wendlingen. HYDRON GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATUR-SCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. https://www. lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen
- LUCE, A., HAAG, I. & M. BREMICKER (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50(2), 58–66.
- LUDWIG, K. (1982): The Program System FGMOD for Calculation of Runoff Processes in River Basins. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 23, S. 25–37.
- MOOG, D.B. & G.H. JIRKA (1998): Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. Journal of Environmental Engineering, 125(1): 104–110.
- PELOSI, C., GRANDEAU, G. & Y. CAPOWIEZ (2017): Temporal dynamics of earthworm-related macroporosity in tilled and non-tilled cropping systems. Geoderma 289: 169–177. DOI:10.1016/j.geoderma.2016.12.005.
- PESCHKE, G. (1985): Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss. Wissensch. Zeitschrift der TU Dresden, Nr. 34(4), 195–200.
- RECK, A., JACKISCH, C., HOHENBRINK, T., SCHRÖDER-ESSELBACH, B., ZAN-GERLÉ, A. & L. VAN SCHAIK (2018): Impact of temporal macropore dynamics on infiltration: field experiments and model simulations. VZJ. DOI: 10.2136/vzj2017.08.0147.
- STEINBRICH, A. & M. WEILER (2012): Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlastafel 6.5) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2001): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.
- STEINBRICH, A., LEISTERT, H. & M. WEILER (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environ. Earth Sci. (2016)75, 1423. DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.
- TANG, X., ZHU, B. & H. KATOU (2012): A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: processes and mitigation strategies, J. Environ. Sci., 24, 351–361.
- TODINI, E. (1996): The ARNO rainfall-ruoff modell. Journal of Hydrology, 175, 339–382.
- VILLINGER, F., EHRET, U., NEUPER, M., IHRINGER, J. & H. GYSI (2017): Einfluss der räumlichen Niederschlagsheterogenität auf Hochwasserscheitel: Untersuchungen mit Niederschlagsradar. KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft (2017), Heft 11, S. 693–698.
- VOGELBACHER, A. (2006): Hochwasservorhersage an Donau und Inn in Bayern. Wiener Mitteilungen Band 199 Teil 3: Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität. ÖWAV – Seminar am 19./20.10.2006.
- WEILER, M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration. Dye tracer experiments and simulations. Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich, Nr. 7, S. 150.
- WEILER, M. (2005): An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications. Journal of Hydrology, Nr. 310, S. 294–315.

- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M. & M. RENGER (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese, Heft 40.
- WINTERRATH, T., BRENDEL, C., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWEN-DER, E., HAFER, M. & E. WEIGL (2017): Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag) – Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz "Anpassung an den Klimawandel" von UBA, THW, BBK, BBSR und DWD, Abschlussbericht. 72 Seiten.
- WINTERRATH, T., BRENDEL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E. & A. BECKER (2018): RADKLIM Version 2017.002: Reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), 5-Minuten-Niederschlagsraten (YW). DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_YW_V2017.002.
- ZHAO, R.J. (1977): Flood forecasting method for humid regions of China. East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China.

Aktuelles

EU-Projekt unterstreicht Bedeutung von Auen

Hochwasser macht nicht an Grenzen halt. Deshalb hat – gefördert von der EU – ein internationales Forschungskonsortium mit Beteiligung des Aueninstituts Neuburg der Universität Eichstätt-Ingolstadt (KU) untersucht, welches Potenzial die Renaturierung von Auen entlang der Donau hat, um die Folgen von extremem Hochwasser zu mildern. Die Forschenden kommen anhand von fünf Pilotregionen zu dem Ergebnis, dass Auengebiete einen nachweisbaren Effekt haben, um die Spitzen von Fluten zu kappen und den Wasserabfluss zu verlagern.

Am Projekt "Danube Floodplain" haben 22 internationalen Projektpartner aus Deutschland, Österreich, Bulgarien, Kroatien, der Tschechischen Republik, Ungarn, Rumänien, Serbien, der Slowakei und Slowenien als Anrainerstaaten im Einzugsgebiet der Donau mitgewirkt. Ihre Ergebnisse präsentierten die Beteiligten während einer Online-Abschlusskonferenz.

Das Hauptziel des Projekts war die Verbesserung der transnationalen Wasserbewirtschaftung und die Prävention von Hochwasser – verbunden mit der Schaffung und Bewahrung von Artenvielfalt in den Auen. Denn in den letzten Jahrzehnten sei die Landnutzung von einer starken Veränderung von Feuchtgebieten als Ökosysteme geprägt gewesen. Seit 1970 seien weltweit 90 % der Feuchtgebiete verschwunden und mit ihnen 84 % der Wirbeltierarten. Entlang der Donau seien 70 % der Auengebiete vom Fluss abgetrennt worden.

Besonders die internationale Ausrichtung des Projektes sollte Grundlagen dafür schaffen, um in den Anrainerstaaten das Wissen über integratives Wassermanagement durch die Wiederherstellung von Flussauen zu verbreiten – ebenso über die Kombination von grauer (also baulicher) und grüner Infrastruktur. Das Aueninstitut hat dabei viel Wissen zusammengetragen, mit dem auch donauabwärts die Auswirkungen untersucht werden sollten. Gleichzeitig hat das Projekt Gelegenheit zum intensiven Austausch mit den Experten vor Ort geboten.

Anliegen war es, dabei alle beteiligten Akteure einzubeziehen, deren Zusammenarbeit bei der Planung und Umsetzung solcher Projekte sehr wichtig ist. Denn bei Renaturierungsprojekten sind die Perspektiven vieler Interessensgruppen zu berücksichtigen – wie etwa von anliegenden Gemeinden, Waldbesitzern, Fischereiverbänden oder landwirtschaftlichen Betrieben. Hier hat das Aueninstitut der KU Stakeholderanalysen vorgenommen, um daraus sogenannte Ökosystemleistungen von Auen abschätzen zu können. Dabei handelt es sich um Effekte der Auen für Mensch und Natur – als Lebensraum für Pflanzen und Tiere, als Erholungsraum, als Filter für Schadstoffe oder als Beitrag zum Hochwasserschutz.

In fünf sogenannten Pilotgebieten entlang der Donau und ihrer Nebenflüsse (Hodonín-Holič/Tschechische Republik und Slowakei, Kostanjevica na Krki/Slowenien, Fokorúpuszta/Ungarn, Begečka Jama/Serbien und Bistreț/Rumänien) wurde das im Rahmen des Projekts entwickelte "Danube Floodplain Evaluation Tool" getestet und Machbarkeitsstudien erstellt, die auch Wasserstandsprognosen modellieren. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vergrößerung der Auenfläche die Wasserspeicherkapazität erhöht, während der Hochwasserspiegel sinkt. Die Wiederanbindung und Reaktivierung von Auengebieten hat einen nachweisbaren Effekt auf die Hochwasserspitzen und die Verlagerung des Wasserabflusses, was auch bei extremen Hochwassern eine abmildernde Wirkung hat. Die Wiederherstellungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen sollten auf der Grundlage der besonderen Merkmale der Pilotgebiete und der jeweiligen Aue ausgewählt werden. Die wiederhergestellten Auen bieten nicht nur der Öffentlichkeit, sondern auch der Landwirtschaft ein breiteres Spektrum an Ökosystemleistungen.

Das Danube Floodplain Evaluation Tool und seine Ergebnisse wurden in den dritten Managementplan für das Donaueinzugsgebiet und den zweiten Hochwasserrisikomanagementplan integriert. Als nächster Schritt ist in den Pilotregionen eine weitere Zusammenarbeit mit den Landeigentümern und -bewirtschaftern erforderlich, um im engen Austausch Renaturierungsprojekte auf den Weg zu bringen.

Weitere Informationen:

Danube Floodplain – Reducing the flood risk through floodplain restoration along the Danube River and tributaries www.interreg-danube.eu/approved-projects/danube-floodplain/outputs

(aus: Pressemitteilung Universität Eichstätt vom 8. November 2021)

Climate Adaption Platform for the Alps – CAPA

Die Plattform CAPA – "Climate Adaptation Platform for the Alps" – ist ein transnationales Portal für die Wissenserweiterung zur Klimaanpassung in der alpinen Makroregion. Als ein ausgelegtes Expertensystem stellt es ein überaus zweckdienliches System dar, das Zugang zu einer qualitätsgesicherten Informationsplattform eröffnet, um die gesamte alpine Region in einem umfassenden Rahmen für Entscheidungsprozesse darzustellen. Alle Inhalte sind in den im Alpenraum gesprochenen Sprachen enthalten (FR, IT, SI, D).

Die Expertenplattform CAPA ermöglicht die Adaptation aller im Alpenbereich befassten Einrichtungen zum Nutzen aller dortigen verschiedenen Länder, um transnational die betreffenden Wissenskenntnisse zu erweitern. Dies umfasst Klimaszenarien ebenso wie Untersuchungen zur Schadensanfälligkeit sowie auch die Auswirkungen und Gefahrensberechnungen.

Der Benutzer kann über eine bedienerfreundliche Oberfläche dedizierte Suchwerkzeuge anwenden oder auch Ergebnisse aus zuvor eingestellten Erfassungen generieren, um zielgerichtet und umfassend bestimmte Themengebiete zu analysieren. Nach Registrierung können Benutzer aktiv Beitragende zu dem System werden, um selbst als Editor Kenntnisse, Messungen sowie Erfahrungen innerhalb der Gemeinschaft alpiner Regionen einzugeben.

Weitere Informationen:

Internetplattform "Climate Adaptation Platform for the Alps" www.capa-eusalp.eu

(aus: Informationsbroschüre EUSALP, EU Strategy for the Alpine Region)

Mehr Wissen für ein nachhaltiges Management des Ozeans

Um den Ozean besser zu verstehen, zu schützen, nachhaltig zu nutzen und seine lebenserhaltenden Funktionen zu erhalten, sind verlässliche Informationen über wichtige Prozesse und das Leben im Meer entscheidend. Daher haben sich zehn von der Europäischen Union geförderte Projekte zusammengeschlossen, um ein gemeinsames Strategiepapier für eine nachhaltige Ozeanbeobachtung und entsprechendes Management zu entwickeln. Die wichtigsten Empfehlungen betreffen die langfristige Finanzierung von Beobachtungen und den Zugang zu standardisierten Daten für verschiedene Nutzungen sowie Kapazitätsaufbau inklusive politischer Prozesse.

Von der Luft, die wir atmen, über das Wasser und die Nahrung, die wir zu uns nehmen, bis hin zu den anorganischen Ressourcen und der Energie, die wir nutzen: Der Ozean ist die Grundlage unserer Existenz auf dem Planeten Erde. Die Blue Economy ("Blaue Wirtschaft") – eine umweltgerechte Wirtschaft, die auf den vielfältigen Leistungen des Ozeans aufbaut – hat das Potenzial, sich bis zum Jahr 2030 zu verdoppeln. Allerdings beeinträchtigen menschliche Aktivitäten den Ozean und seine lebenswichtigen Funktionen. Eine nachhaltige Bewirtschaftung und Nutzung erfordert ein tieferes Verständnis der Prozesse im Meer und der marinen Ökosysteme. Ein solches Wissen beruht auf zuverlässigen, zeitnahen und zweckmäßigen Ozeanbeobachtungen.

Um nutzungsorientierte, interdisziplinäre, effektive und nachhaltige Systeme für Informationen über den Ozean aufzubauen und die Nachhaltigkeit der Blue Economy zu erhöhen, haben sich zehn von der Europäischen Union finanzierte Projekte zusammengeschlossen. Unter der Leitung des Projekts EuroSea entwickelte die Gruppe das gemeinsame Strategiepapier "Nourishing Blue Economy and Sharing Ocean Knowledge. Ocean Information for Sustainable Management" ("Die Blaue Wirtschaft stärken und Meereswissen teilen. Ozean-Informationen für nachhaltiges Management").

Das Strategiepapier enthält Empfehlungen für fünf verschiedene, miteinander verknüpfte Bereiche:

- Um eine nachhaltige und angemessene langfristige Finanzierung für kontinuierliche wissenschaftliche Beobachtungen und die Bereitstellung von Informationen in ganz Europa sicherzustellen, empfehlen die Autoren, auf eine europäische Rahmenrichtlinie hinzuarbeiten.
- Um die wachsende Nachfrage nach hochqualifizierten Fachkräften zu befriedigen und die Beschäftigungsfähigkeit sowohl im akademischen als auch im industriellen Meeressektor zu verbessern, muss eine neue Generation von "blauem Personal" angeworben, ausgebildet und über Ländergrenzen und soziale Gruppen hinweg unterstützt werden.

- Um Wissenslücken in Bezug auf die Ökologie, die biologische Vielfalt, die Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel und das Potenzial für eine nachhaltige Nutzung der Meeresressourcen zu schließen, sollten verschiedene Technologien kombiniert werden, um unterschiedliche Arten von Daten zu sammeln und in verwertbares Wissen umzuwandeln.
- Um die Datenqualität zu verbessern und eine effizientere Nutzung der verfügbaren Informationen zu gewährleisten, müssen globale Standards und Praktiken für die Interoperabilität festgelegt werden.
- Um den politischen Prozess transparenter und zugänglicher zu machen und öffentliche Beiträge zur Meeresbeobachtung zu ermöglichen, sollten der Bevölkerung mehr Möglichkeiten zur aktiven Beteiligung angeboten werden.

Mit ihren Empfehlungen wollen die zehn Projekte aufzeigen, wie die Meereswissenschaften und die Blue Economy die Ziele des Europäischen Green Deals, des Übereinkommens von Paris und der Dekade für eine nachhaltige Entwicklung der Ozeane der Vereinten Nationen unterstützen können. Basierend auf den unterschiedlichen Perspektiven und Fachkenntnissen soll dadurch der Wert der wissenschaftlichen und innovativen Aktivitäten so gebündelt werden, dass sie eine hohe gesellschaftliche Wirkung erzielen können.

Die zehn teilnehmenden Projekte wurden durch das Forschungsund Innovationsprogramm Horizont 2020 (H2020) der Europäischen Union finanziert (EuroSea Grant Agreement: 862626). Das Strategiepapier "Nourishing Blue Economy and Sharing Ocean Knowledge. Ocean Information for Sustainable Development" wurde mit Unterstützung von Trust-IT Services erstellt, dem Anbieter des Horizon Results Booster, der von der Europäischen Kommission, Generaldirektion Forschung und Innovation, Referat J5, Common Service for Horizon 2020 Information and Data, finanziert wird.

Weitere Informationen:

Fachbereich Marine Biogeochemie, GEOMAR www.geomar.de/forschen/fb2/ueberblick

Projekt EuroSea www.eurosea.eu

> (aus: Pressemitteilung GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung vom 27. Oktober 2021)

Neues Portal für Meeres-, Küsten- und Polargebiete

Unsere Ozeane bilden das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde und sind Lebensraum für mehr als zwei Millionen Arten. Klimawandel, Verschmutzung und Überfischung gefährden das sensible ökologische Gleichgewicht jedoch zunehmend. Der Schutz und die nachhaltige Nutzung der Ozeane sind Gegenstand zahlreicher Aktivitäten in Bildung, Forschung und Innovation weltweit. Kooperation international greift diese auf und stellt ab sofort eine eigene Themenseite "Meeres-, Küsten- und Polargebiete" mit einem umfangreichen Informationsangebot bereit. Kooperation international ist eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Gemeinsame Betreiber sind der DLR-Projektträger und das VDI Technologiezentrum.

Die Bedeutung der Forschung zu Schutz und nachhaltiger Nutzung unserer Meere sowie der Küsten- und Polarregionen erfährt aktuell besondere Aufmerksamkeit durch die multilaterale Wissenschaftsdiplomatie: Anfang 2021 haben die Vereinten Nationen die "Dekade Ozeanforschung für nachhaltige Entwicklung" ausgerufen. Unter dem Motto "The Science we need for the ocean we want" sollen Ozeane und Meere bis zum Jahr 2030 sauber, gesund, produktiv, vorhersehbar, sicher, zugänglich und inspirierend werden. Eine zentrale Rolle spielen dabei auch die durch Forschung und Innovation gewonnenen Daten ("Ocean Data") sowie die Bildung ("Ocean Literacy"). Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft weltweit können sich mit ihren Aktivitäten an der Dekade beteiligen.

Zudem hat die Europäische Kommission die "Wiederbelebung unserer Ozeane und Gewässer" als eine von fünf Missionen ausgewählt, die ebenfalls bis zum Jahr 2030 Lösungen für die wichtigsten globalen Herausforderungen erarbeiten sollen. Zusätzlich will die EU eine nachhaltige maritime Wirtschaft fördern, welche auf innovative neue Technologien sowie die Zusammenarbeit von Forschung und Industrie setzt. Küsten haben dabei als Lebens-, Natur- und Wirtschaftsräume eine große Bedeutung.

Zunehmend in den internationalen Fokus gerückt sind die Auswirkungen des Klimawandels auf Polargebiete. Eis und Kälte schwinden vor allem in der Arktis. Die maßgeblich vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte MOSAiC-Expedition zeigt den Stellenwert des Themas auf: Über 300 Forschende aus 80 Instituten aus 20 Nationen nahmen an der größten Arktisexpedition aller Zeiten teil. Die während der Expedition gewonnen Daten und Erkenntnisse sind ein Meilenstein für die internationale Klima- und Polarforschung. Deren weitere Auswertung fördert das BMBF unter dem Dach des Forschungsprogramms der Bundesregierung "MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit" im Rahmenprogramm "Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA3)".

Darüber hinaus unterstützt das BMBF die Durchführung der UN-Dekade und war Gastgeber der offiziellen Eröffnungsveranstaltung im Juni 2021. Gemeinsam mit der Zwischenstaatlichen Kommission der UNESCO für Ozeanografische Forschung (UNESCO-IOC) organisiert das BMBF im Rahmen der Dekade sieben Ocean Laboratories, an denen sich noch bis zum Mai 2022 Forschende aus aller Welt beteiligen können.

Kooperation international bietet umfassendes Wissen zur internationalen Zusammenarbeit in Bildung und Forschung und ist Kommunikationsplattform für Informations- und Kooperationssuchende aus dem In- und Ausland. Das Internetportal trägt ferner dazu bei, die internationale Zusammenarbeit zwischen Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie forschenden Unternehmen zu stimulieren. Darüber hinaus stellt Kooperation international ein Instrument zur Vernetzung deutscher Regierungsstellen, Wissenschafts-, Mittler- und Wirtschaftsorganisationen dar.

HW 66. 2022, H.1

Weitere Informationen:

Portal "Meeres-, Küsten und Polargebiete", Kooperation international www.kooperation-international.de/themen/meeres-kuestenund-polargebiete

(aus: Pressemitteilung VDI Technologie Zentrum vom 4. November 2021)

Neue Studie zu Mikroplastiktransport in die Atmosphäre

Ozeane, Seen und Flüsse enthalten an ihrer Oberfläche oft eine große Zahl von Mikroplastik-Partikeln. Einschlagende Regentropfen bewirken, dass viele Tröpfchen mit einer fast ebenso hohen Mikroplastik-Konzentration in die Luft geschleudert werden. Verdunsten sie in der Luft, gelangen die Partikel in die Atmosphäre. Diese Prozesse beschreiben Forscher der Universität Bayreuth in einer neuen Studie.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen: Schlägt ein Regentropfen auf eine Wasseroberfläche auf, werden Tröpfchen aus einem kleinen ringförmigen Bereich um die Einschlagsstelle in die Luft geschleudert. Sie stammen aus einer Tiefe von wenigen Millimetern unterhalb der Wasseroberfläche. Die in den Tröpfchen enthaltenen Mikroplastik-Partikel haben fast die gleiche Konzentration wie in dieser schmalen Wasserschicht. Auch ihre Flugbahnen in der Luft sowie ihre Flugdauer haben die Bayreuther Wissenschaftler berechnet. Daraus ergibt sich ein klares Bild: Das Wasser von Regentropfen, das frei von Mikroplastik ist, landet in den Ozeanen, während plastikhaltiges Wasser aus den Ozeanen in die Luft gelangt. Wenn die Tröpfchen so lange in der Luft fliegen, bis sie verdunsten, entlassen sie die Mikroplastik-Partikel in die Atmosphäre. Dies geschieht besonders häufig oberhalb der Wasseroberflächen von Ozeanen, wo Windverhältnisse und Temperaturen eine vergleichsweise lange Flugdauer und eine rasche Verdunstung begünstigen. Die meisten der in die Luft geschleuderten Mikroplastik-Partikel fallen allerdings aufgrund einer kurzen Flugdauer wieder zurück ins Wasser.

Es war eine besondere Herausforderung für die Forschergruppe festzustellen, wie viele Tröpfchen durch einen einzigen einschlagenden Regentropfen hochgeschleudert werden, wie groß und wie schnell diese Tröpfchen sind und wie viele Mikroplastik-Partikel sie möglicherweise enthalten. Experimente allein hätten zu wenige Informationen geliefert. Deshalb hat sich das Wissenschaftlerteam für Simulationen dieser Prozesse einen völlig neuen Code erarbeitet und ein Computermodell entwickelt, das es erlaubt, diese Fragen mit hoher Genauigkeit und in einer noch nie dagewesenen Detailtiefe zu beantworten. Wie realistisch die neu gewonnenen Simulationen sind, zeigt sich beim Vergleich mit technisch anspruchsvollen Experimenten: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von einschlagenden Regentropfen bestätigen die auf dem Modell basierenden Berechnungen.

Um herauszufinden, wie viele Mikroplastik-Partikel durch diese Prozesse letztlich in der Atmosphäre landen, haben die Bayreuther Forscher eine Vielzahl empirisch verfügbarer Daten zusammengeführt und in ihre Berechnungen einbezogen. Diese Daten betreffen unter anderem die Mikroplastik-Konzentrationen an Meeresoberflächen, die jährlichen Niederschlagsmengen, die von der Regenintensität abhängige Größe der Regentropfen und die zeitliche Verteilung der Regenintensität. Eine erste Abschätzung führt zu dem Ergebnis, dass durch die Einschläge von Regentropfen auf Wasseroberflächen weltweit bis zu 100 Billionen Mikroplastik-Partikel pro Jahr in die Atmosphäre gelangen könnten.

Die Autoren betonen, dass diese Abschätzung noch mit zahlreichen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten behaftet ist: Turbulenzen im Wind, welche die Einschlagskraft von Regentropfen beeinflussen können, wurden in die Berechnungen noch nicht einbezogen. Zudem weisen die Meeresoberflächen auf der Erde nicht überall eine gleich hohe Konzentration von Mikroplastik-Partikeln auf – im Gegenteil, die Unterschiede sind sehr groß. Satellitenmessungen in Verbindung mit Wettermodellen könnten aber schon bald genaueren Aufschluss über die "Hotspots" geben, an denen besonders viele Mikroplastik-Partikel aus dem Ozean in die Atmosphäre transportiert werden.

Fachartikel:

Lehmann, M., Oehlschlägel, L.M., Häusl, F.P., Held, A., Gekle, S. (2021): Ejection of marine microplastics by raindrops: a computational and experimental study. Microplastics and Nanoplastics 1, Article No. 18. DOI: 10.1186/s43591-021-00018-8

Weitere Informationen:

Biofluid Simulation and Modeling, Universität Bayreuth www.physik.uni-bayreuth.de/de/forschung

(aus: Pressemitteilung Universität Bayreuth vom 17. November 2021)

Neue Vorhersagemethodik für Wetter- und Klimaphänomene mit extremen Auswirkungen

Die Vorhersage von Klimaphänomenen mit extremen Folgen kann durch einen neuen mathematischen Ansatz, der Verbindungen und Muster zwischen geografischen Standorten analysiert, erheblich verbessert werden. Dadurch können zukünftig sogar möglicherweise Menschenleben gerettet und wirtschaftliche Verluste in Milliardenhöhe vermieden werden. Die Vorhersagen für Ereignisse wie El Niño, Monsun, Dürren oder extreme Regenfälle könnten erheblich früher erfolgen, je nach Art des Ereignisses einen Monat oder sogar ein Jahr im Voraus. Die neue Vorhersagemethode könnte somit ein Schlüssel für eine bessere Anpassung an die globale Klimakrise sein.

Die neue Herangehensweise hat sich in den letzten Jahren in mehreren Fällen als sehr effizient erwiesen, um verschiedene Klimaphänomene viel früher als bisher vorherzusagen. El Niño zum Beispiel konnte bis zu einem ganzen Jahr früher vorhergesagt werden, im Vergleich zu etwa sechs Monaten mit den Methoden, die heute Standard sind. Der Beginn des indischen Sommermonsuns in Zentralindien, der für die Wirtschaft in dieser Region lebenswichtig ist, wurde Dank des neuen Ansatzes mehr als einen Monat im Voraus vorhergesagt, erheblich früher als die derzeit verwendeten Prognosen.

Extremereignisse wie Überschwemmungen, Hitzewellen oder Dürren treten oft ohne oder mit nur geringer Vorwarnzeit auf, was eine wirksame kurzfristige Anpassung schwierig, wenn nicht unmöglich macht. Der neue Vorhersagerahmen verbessert dies grundlegend. Derzeit gibt es zum Beispiel keine verlässliche Vorhersage von Starkregenfällen in den östlichen Zentral-Anden, die zu Überschwemmungen und Erdrutschen mit verheerenden Auswirkungen für die Bewohner in diesem Teil Südamerikas führen. Der neue netzwerkbasierte Ansatz kann solche Ereignisse bis zu zwei Tage im Voraus vorhersagen – das ist eine entscheidende Zeit für die Menschen, um sich vorzubereiten, Leben zu retten und Schäden zu begrenzen.

Herkömmliche Wetter- und Klimavorhersagen beruhen in erster Linie auf numerischen Modellen, die atmosphärische und ozeanische Prozesse nachbilden. Diese Modelle sind zwar im Allgemeinen sehr nützlich, können aber nicht alle zugrundeliegenden Prozesse perfekt simulieren - und Phänomene wie das Einsetzen des Monsuns, Überschwemmungen oder Dürren werden möglicherweise zu spät vorhergesagt. An dieser Stelle kommt die netzwerkgestützte Vorhersage ins Spiel. Im Gegensatz zur Betrachtung einer Vielzahl lokaler Wechselwirkungen, die physikalische Prozesse wie Wärme- oder Feuchtigkeitsaustausch darstellen, visualisiert die neue Methodik direkt die Verbindungen zwischen verschiedenen geografischen Orten, die sich über Kontinente oder Ozeane erstrecken können. Diese Verbindungen werden ermittelt, indem die Ähnlichkeit in der Entwicklung physikalischer Größen wie der gemessenen Lufttemperaturen an diesen Orten bestimmt wird. Im Falle von El Niño beispielsweise bauen sich im tropischen Pazifik starke Verbindungen im Kalenderjahr vor dem Einsetzen des Ereignisses auf. Das ist ein grundlegend anderer Ansatz als die traditionelle numerische Modellierung. Es wird nicht das gesamte Erdsystem simuliert, sondern es werden großräumige Verbindungsmuster in Beobachtungsdaten analysiert.

Diese Muster, also die Struktur der Verbindungen zwischen den Orten und ihre zeitliche Entwicklung, können entscheidende neue Informationen für die Vorhersage liefern – und die jeweiligen Regionen sicherer machen. Mit dieser Perspektive haben die Forscher mehrere Erfolgsgeschichten zusammengetragen, welche die wissenschaftliche Kraft des Netzwerkansatzes für die Vorhersage demonstrieren.

Fachartikel:

Ludescher, J., Martin, M., Boers, N., Bunde, A., Ciemer, C., Fan, J., Havlin, S., Kretschmer, M., Kurths, J., Runge, J., Stolbova, V., Surovyatkina, E., Schellnhuber, H.J. (2021): Network-based forecasting of climate phenomena. PNAS, November 23, 2021 118 (47). DOI: 10.1073/pnas.1922872118

Weitere Informationen:

Department Erdsystemanalyse, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/erdsystemanalyse

(aus: Pressemeldung Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung vom 16. November 2021)

Seegraswiesen als Vibrionen-Fänger – Kieler Forschende beweisen eine weitere Leistung des Ostsee-Ökosystems

Sie helfen, den Klimawandel zu mindern und Algenblüten zu verhindern – und sie können laut neuesten Forschungsergebnis-

sen auch die Konzentrationen potenziell gesundheitsschädlicher Bakterien im Meerwasser senken: Seegraswiesen erbringen einer jetzt veröffentlichten Studie von Kieler Forschenden zufolge eine weitere Ökosystemleistung für uns Menschen. Die Ergebnisse liefern einen weiteren Anreiz für den Schutz und die Wiederherstellung dieser lange unterschätzen Ökosysteme in der deutschen Ostsee.

Schon länger ist bekannt, dass Seegraswiesen Nährstoffe aufnehmen und so die Überdüngung der Meere und damit Algenblüten verhindern können. Außerdem wird auch zunehmend ihre wichtige Rolle als mariner Kohlenstoffspeicher wahrgenommen, wodurch sie dem Treibhauseffekt entgegenwirken können. Ein Team aus Forschenden des GEOMAR Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel hat in einer veröffentlichten Studie nachgewiesen, dass heimische Seegraswiesen auch die Wasserqualität in Bezug auf potenziell gefährliche Bakterien verbessern können: Wasser aus den dicht bewachsenen untermeerischen Flächen enthält weniger Vibrionen – natürlich vorkommende Bakterien, die in hohen Konzentrationen gesundheitsschädlich sein können.

An fünf Standorten der Kieler Bucht nahmen Taucher gezielt Wasserproben aus bewachsenen und vegetationsfreiem Sandgrund. Im Labor wurden diese auf einer mit Nährlösung bestrichenen Platte aufgebracht. Nach einigen Tagen wurden die sich bildenden Vibrio-Kolonien gezählt. Die Analysen zeigten, dass Wasser aus Seegraswiesen im Vergleich zu unbewachsenen Flächen durchschnittlich von 39 % weniger Vibrionen und 63 % weniger des potenziell gesundheitsschädlichen Typs *Vibrio vulnificus/ cholerae* enthielt.

Der zugrundeliegende Wirkmechanismus soll zukünftig genauer untersucht werden. Denkbar ist sowohl, dass die erhöhte Sedimentation in der dichten Wiese zum Absetzen feiner Partikel führt, an welchen auch Vibrionen anhaften. Aber es könnte auch sein, dass chemische Substanzen aus den Seegrasblättern das Wachstum der Bakterien hemmen.

Die Pilotstudie war motiviert von einer vorherigen Untersuchung aus dem Jahr 2017, die für tropische Wiesen eine Reduktion von Korallen- und Humanpathogenen überall dort gezeigt hat, wo dichte Seegraswiesen zwischen menschlichen Siedlungen und Riffen wachsen. Nun konnten die Forscher ähnliche Funktionen erstmals für unsere heimischen Gewässer nachweisen.

Die neuen Ergebnisse sind von besonderer Bedeutung, weil alle Klimamodelle für die Zukunft eine überdurchschnittliche Erwärmung in Verbindung mit einer Aussüßung der Ostsee vorhersagen. Dies sind exakt die Umweltbedingungen, die zur weiteren Ausbreitung von Vibrionen auch an Badestränden im Sommer führen werden. Die Studie unterstreicht außerdem die entscheidende Bedeutung von Seegraswiesen als naturbasierte Lösung für die Gesundheit von Flachwasser-Ökosystemen und ihrer Wasserqualität. Damit liefert sie weitere Anreize für den Schutz und die Wiederherstellung dieser lange unterschätzten Küstenökosysteme.

Fachartikel:

Reusch, T.B.H., Schubert, P.R., Marten, S.M., Gill, D., Karez, R., Busch, K., Hentschel, U. (2021): Lower Vibrio spp. abundances in Zostera

marina leaf canopies suggest a novel ecosystem function for temperate seagrass beds. Marine Biology. DOI: 10.1007/s00227-021-03963-3

Weitere Informationen:

Forschungsbereich Marine Ökologie, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung www.geomar.de/forschen/fb3/ueberblick

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung vom 15. September 2021)

Sich verlagernde Flussläufe sind effizientere Kohlenstoffsenken als begradigte Flüsse

Rund 8.500 Jahre dauert es, bis ein Sandkorn aus den Anden über das argentinische Tiefland in den Río Paraná gespült wird. Die 1.200 Kilometer weite Reise in dem Fluss namens Río Bermejo wird von vielen Pausen in Flussauen unterbrochen, wo das Körnchen zum Teil über Jahrtausende abgelagert und dann wieder weiter transportiert wird. Begleitet wird der Sand von organischem Kohlenstoff, eingespült aus Boden und Pflanzen. Damit gewinnt der Transport im Wasser Relevanz für das Klima: Flüsse tragen den Kohlenstoff, der zuvor über Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen wurde, als Sediment ins Meer, wo er über Jahrtausende unschädlich für das Klima eingelagert wird.

Forscher des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ haben jetzt die einzelnen Prozesse der Reise erstmals quantifiziert. Wichtiges Ergebnis der Arbeit: Es sind insbesondere ungestört mäandrierende Abschnitte eines Flusses, die Sediment zusammen mit dem Kohlenstoff ablagern und wieder aufnehmen und dann weiter ins Meer transportieren. In Flussabschnitten mit gerader, stabiler Uferlinie wird die mitgeführte Sedimentfracht einfach durchgeschleust, während der Kohlenstoff in den Flussauen daneben langsam von Mikroorganismen wieder als CO₂ freigesetzt wird. Der Rio Bermejo war für die Forschergruppe ein ideales natürliches Labor, weil er keine nennenswerten Zuflüsse hat. Dies bedeutet, dass natürliche Flussläufe, die Raum zur Abtragung der Flussauen haben, der Atmosphäre mehr Kohlenstoff entziehen können als gerade Flussabschnitte. Insofern könnten auch Begradigungen von Flüssen durch den Menschen zum Anstieg der CO₂-Konzentration der Atmosphäre beitragen. Spannend ist jetzt die Beantwortung der Frage, ob man dem Klima helfen könne, wenn den Flüssen wieder mehr Raum geben wird und die natürlichen Flussschleifen nicht behindert werden.

Das internationale Team vom GFZ untersuchte die Prozesse im Fluss und seinen Auen mit einem vielfältigen Instrumentarium. Analysen des kosmogenen Beryllium-10-Gehalts zeigten an, wie lange der Transport von Sediment im Fluss dauert. Datierungen auf der Basis des instabilen Kohlenstoffisotops C-14 wiederum ließen Rückschlusse auf das Alter der Partikel organischen Ursprungs zu. Bei den Feldarbeiten in Argentinien wurden Proben aus dem Fluss entlang der "Kette" von Sedimentquelle bis zur Sedimentsenke genommen. Natürlich mäandrierende Flüsse erodieren Material aus den Flussauen und transportieren es ins Meer, wo es lange Zeit verbleibt. Dagegen sind künstlich stabilisierte Flussläufe weit weniger effektive Kohlenstoffsenken.

Fachartikel:

Repasch, M., Scheingross, J.S., Hovius, N., Lupker, M., Wittmann, H., Haghipour, N., Gröcke, D.R., Orfeo, O., Eglinton, T.I., Sachse, D. (2021): Fluvial organic carbon cycling regulated by sediment transit time and mineral protection. Nature Geoscience, 2021. DOI: 10.1038/s41561-021-00845-7

Weitere Informationen:

Sektion Geomorphologie, GFZ www.gfz-potsdam.de/sektion/geomorphologie/ueberblick

> (aus: Pressemitteilung GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam vom 29. Oktober 2021)

Untersuchungen zur Eisschmelze der Gletscher in Patagonien

Seit Jahrzehnten schrumpfen die Gletscher der großen patagonischen Inlandeise – eine Folge des zunehmenden Klimawandels. Ein internationales Team unter der Beteiligung von Wissenschaftlern des Geographischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin hat nun entschlüsselt, wie vor der Gletscherfront des Grey-Gletschers in Chile das Kalben von Eisbergen und die Eisschmelze an der Gletscherfront durch stabile thermische Schichtung des Sees und durch die Geometrie des Seebodens dominiert werden.

Der Lago Grey ist ein viele Quadratkilometer großer, typischer "proglazialer See", der heute das ehemalige Zungenbecken des Grey-Gletschers ausfüllt. Durch das Zurückweichen des Grey-Gletschers nahm der vor der Gletscherzunge liegende See im Laufe der Jahrtausende eine immer größere Fläche ein. Nach dem Jahr 1997 wich die Gletscherfront in einem Jahr abrupt aufgrund einer ausgedehnten Vertiefung im Untergrund um über 1,5 km zurück. Seither geht wegen des kalten Seewassers und ansteigenden Seebodens im Bereich der Gletscherfront das Zurückweichen langsam und stetig weiter. Durch die Auswertung von Daten experimenteller Wetterstationen und Messungen von Temperatur und Trübung im See in verschiedenen Tiefen konnte durch die Forschergruppe das Zusammenspiel zwischen Atmosphäre, Gletscher und See interpretiert und entschlüsselt werden.

Der See wird, wie erwartet, durch das Schmelzwasser vom Gletscher beeinflusst, aber das Ausmaß dieses Einflusses ist viel größer als zuvor gedacht. Das bedeutet zugleich, dass der See im Sommer in der Tiefe am kältesten ist – anders als man eigentlich annehmen würde. Denn dem See fließen dann große Mengen an sehr kaltem Schmelzwasser zu.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Zurückschmelzen der Gletscher in Patagonien im Zusammenhang mit dem Klimawandel nicht gleichmäßig, sondern je nach Geometrie der Seen vor der Gletscherfront quasi ruckartig und in jedem Fall nichtlinear abläuft.

Interessant dabei ist, dass sich der Gletscher – anders als beim Kalben ins Meer – aufgrund des kalten Tiefenwassers dorthin vorschieben kann, während im oberen Bereich das Abschmelzen durch den Kontakt mit dem warmen Oberflächenwasser viel rascher vor sich geht. Aufgrund des Auftriebs können dann subaquatische Eisabbrüche auftreten, die das Eis abrupt nach oben in wärmeres Oberflächenwasser gelangen lassen, wo diese Eisberge dann allmählich schmelzen. Das Verständnis dieser Vorgänge ist deshalb von hoher Bedeutung, da ähnliche wie jetzt am Lago Grey in Patagonien nachgewiesene Effekte in vielen Gebirgen der Erde auftreten können, wo solche proglazialen Seen mit den von und an ihnen ausgelösten Flutereignissen zu den größten Naturgefahren zählen.

Für das Forscherteam ist das jetzt erzielte Ergebnis vor allem Ausdruck langjähriger internationaler Zusammenarbeit: In so entlegenen Gebieten der Erde ist es wichtig, dass man die Kräfte bündelt, internationale Zusammenarbeit und Arbeitsteilung sucht und dann, wie es seitens des Wissenschaftlerteams gemacht wurde, gemeinsam Daten analysiert und Modelle dazu entwickelt.

Fachartikel:

Sugiyama, S., Minowa, M., Fukamachi, Y., Hata, S., Yamamoto, Y., Sauter, T., Schneider, C., Schaefer, M. (2021): Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia. Nature Communications 12, 6301. DOI: 10.1038/s41467-021-26578-0

Weitere Informationen:

Geographisches Institut, Humboldt-Universität Berlin www.geographie.hu-berlin.de

> (aus: Online-Mitteilung Humboldt-Universität Berlin vom 2. November 2021)

Studie zu schmelzenden Gletschern

Schmelzende Gletscher tragen erheblich zum globalen Meeresspiegelanstieg bei. Um diesen exakt vorhersagen zu können, müssen alle relevanten Prozesse in Modellen realitätsnah nachgebildet werden. In den meisten Simulationen wird das Eis ausschließlich als fließender Körper betrachtet. Wie eine Modellierungsstudie unter Leitung des Alfred-Wegener-Instituts nachweist, wurden die Festkörpereigenschaften des Eises zu stark vernachlässigt. Die AWI-Wissenschaftlergruppe konnte an einem Gletscher an der Küste Grönlands zeigen, dass die Gezeiten das Eis noch in mehreren Kilometern Entfernung landeinwärts elastisch verformen.

Der gigantische Nioghalvfjerdsfjorden-Gletscher im Nordosten Grönlands liegt auf 79 Grad nördlicher Breite und wird deshalb auch kurz als "79° NG" bezeichnet. Der Koloss fließt direkt in die Grönlandsee und beinhaltet ein Eisvolumen, das den globalen Meeresspiegel um etwa 1,1 Meter steigen lassen würde, wenn es komplett abschmilzt. In Folge des Klimawandels hat sich der Eisverlust am 79° NG deutlich erhöht. So werden zum Beispiel die vom Gletscher gekalbten Eisberge immer größer. Im September 2020 etwa brach ein Brocken ab, der größer war als Paris mit 112 km².

Wenn die Forscher den mit dem Eisverlust verbundenen Meeresspiegelanstieg noch genauer prognostizieren wollen, muss in den Computermodellen das Fließen von Gletschern wie dem 79° NG möglichst exakt abgebildet werden. Damit die benötigte Rechenleistung nicht zu groß wird, werden die Bewegungen von Gletschern oft stark vereinfacht dargestellt. Die Simulationen beschreiben das Eis dann nur fließend. Aber Gletschereis hat auch Festkörpereigenschaften, die in den Modellen so gut wie nie betrachtet werden. Die Studie zeigte, dass genau diese Festkörpereigenschaften eine wichtige Rolle spielen und dass es sich lohnt, sie in die Simulationen zu integrieren.

Zusammen mit ihrem internationalen Studienteam aus Deutschland, Dänemark und den USA entwickelten die AWI-Forscher eine Simulation des 79° NG, die das "elastische" Festkörperverhalten und das "viskose" Fließverhalten des Gletschers kombiniert. Dabei wird auch das subglaziale Wasser unter dem Gletscher berücksichtigt, für das die AWI-Glaziologen das Hydrologiemodell des AWI angewendet haben. Um zu prüfen, wie gut diese "viskoelastische" Simulation den wirklichen 79° NG nachbildet, verglichen die Forschenden die Computerdaten mit den realen GPS-Bewegungsdaten des Eises aus einer AWI-Feldforschungskampagne und Satellitenfernerkundungsdaten.

Die Forschergruppe konnte zeigen, dass die elastische Komponente unter anderem dort wichtig ist, wo der Gletscher ins Meer fließt. Dort befindet sich unter dem Eis Meerwasser, der Gletscher hat also keinen Kontakt mehr zum Boden. Ebbe und Flut heben und senken die schwimmende Eisplatte. Außerdem drückt das Ozeanwasser auf das damit verbundene subglaziale Wasser unter dem Eis an Land und verändert dort die Gleitgeschwindigkeit des Gletschers. Das elastische Gezeitensignal verformt den Gletscher noch 10 km landeinwärts von der Aufsetzlinie, an der das Eis noch auf dem Boden aufliegt. Diese Fernwirkung der Gezeiten auf das Inlandeis war zwar aus der Antarktis bekannt, wurde jedoch in Grönland bislang kaum berücksichtigt.

Eine weitere überraschende Erkenntnis: Auch jenseits des Gezeitensignals, weit im Landesinnern, tritt die Festkörperverformung auf. Und zwar immer dort, wo der Gletscher mit relativ hoher Geschwindigkeit – über 70 cm pro Tag – über "Berge" und große Bodenwellen unter dem Eis fließt. Das erzeugt hohe Spannungen und führt zur elastischen Deformation des Eises. Genau diese Orte hoher Spannung im Modell der AWI-Forscher passen erstaunlich gut mit Satellitendaten zusammen. Denn genau hier sind in ganz Grönland riesige Felder mit unzähligen Spalten im Eis zu finden. Es wird klar, warum sich ein Gletscher ohne Festkörperkomponente nicht korrekt beschreiben lässt. Denn ein reines Fluid kann keine Spalten und Risse haben.

Beide Phänomene – Gezeitensignal und elastische Deformation im Inlandeis – treten nach Einschätzung des Studienteams an vielen mit dem 79° NG vergleichbaren Auslassgletschern weltweit auf. Deshalb lohnt es sich, die elastischen Komponente in die Modelle zu integrieren, auch wenn sie dadurch komplexer werden. Denn auch von den Festkörpereigenschaften hängt ab, wie schnell ein Gletscher zum Meer fließt und wieviel Eis er dort in einem wärmeren Klima verliert. Die Prognosen zum Meerspiegelanstieg könnten also noch exakter werden.

Fachartikel:

Christmann, J., Helm, V., Khan, S.A., Kleiner, T., Müller, R., Morlighem, M., Neckel, N., Rückamp, M., Steinhage, D., Zeising, O., Humbert, A. (2021): Elastic deformation plays a non-negligible role in Greenland's outlet glacier flow. Nature Communications: Earth & Environment, 2, article No. 232. DOI: 10.1038/s43247-021-00296-3

Weitere Informationen:

Portal "Gletscher und Eisschilde", Alfred-Wegener-Institut www.awi.de/im-fokus/eisschilde.html

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung vom 9. November 2021)

Regionaler Klimawandel: Die Rolle von Landnutzung und Wassermanagement

Der menschengemachte Klimawandel hat bereits die Häufigkeit von Extremereignissen wie Hitzewellen, Dürren und Starkniederschlägen erhöht – Expertinnen und Experten prognostizieren eine Fortsetzung dieses Trends für den weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts. Die Folgen davon, zum Beispiel austrocknende Böden in manchen Regionen und zunehmende Überflutungen in anderen, bedrohen das Zusammenleben und die Existenz zukünftiger Generationen. Sie stellen erhebliche Risiken dar, unter anderem für eine nachhaltige landwirtschaftliche Erzeugung und somit auch für die Nahrungsmittelversorgung.

Der weitreichende Einfluss von Klimagasen, vor allem von CO₂ und Methan, auf das globale Klima ist unbestritten. Im Sonderforschungsbereich 1502 "Regionaler Klimawandel: Die Rolle von Landnutzung und Wassermanagement" untersuchen die Forschenden die Hypothese, dass auch der vom Menschen verursachte Landnutzungswandel und ein intensiviertes Wassermanagement das regionale Klima beeinflussen – und dadurch zu unbeabsichtigten Veränderungen im natürlichen regionalen Wasser- und Energiekreislauf führen. Die im Sonderforschungsbereich (SFB) zu untersuchende Hypothese geht sogar so weit, dass derartige Veränderungen bereits maßgeblich zu den beobachteten Trends im regionalen Wasserkreislauf beigetragen haben.

Um dieser Annahme weiter nachzugehen, kommen Forschende aus einem breiten Spektrum von Disziplinen zusammen – darunter die Hydrologie, Meteorologie, Geodäsie, Erdsystem-Modellierung, Fernerkundung, Agrarökonomie und die Sozialwissenschaften. Gemeinsam wollen sie ein Modellsystem entwickeln, das in der Lage sein wird, insbesondere diejenigen Interaktionen von Menschen und Klima abzubilden, die mit Veränderungen des kontinentalen Wasserkreislaufs verbunden sind.

Die Projektgruppen des SFB werden sich in der ersten, vierjährigen Förderphase zunächst auf Europa konzentrieren. Ziel ist es, ein gekoppeltes Modellsystem zu entwickeln, das neben der Dynamik der einzelnen Komponenten des Erdsystems auch deren Wechselwirkungen untereinander abbildet und insbesondere dazu dienen soll, die menschengemachten Einflüsse auf den natürlichen regionalen Wasserkreislauf zu quantifizieren. Die im SFB erzielten Forschungsergebnisse sollen als Grundlage für die Entwicklung von Kriterien für eine nachhaltige Land- und Wassernutzung dienen, im Sinne des regionalen Klimas.

Weitere Partner sind das Forschungszentrum Jülich, der Deutsche Wetterdienst (DWD) und die Universitäten Köln und Göttingen. Der Sonderforschungsbereich ist thematisch in die Transdisziplinären Forschungsbereiche "Modelling" sowie "Sustainable Futures" der Universität Bonn eingebettet. Die Fördersumme beträgt rd. 10 Mio. €.

Weitere Informationen:

Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG), Universität Bonn www.igg.uni-bonn.de

(aus: Pressemitteilung Universität Bonn vom 25. November 2021)

Mehr langanhaltende Wetterlagen im europäischen Sommer

Die globale Erwärmung macht es wahrscheinlicher, dass Wetterlagen in den Sommermonaten der Nord-Halbkugel länger anhalten, was dann zu mehr extremen Wetterereignissen führt. Dies zeigt eine neuartige Analyse von langjährigen Atmosphärendaten des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Zu diesen Ereignissen gehören Hitzewellen, Dürreperioden und intensive Regenfälle. Vor allem in Europa, aber auch in Russland, haben die anhaltenden Wetterlagen in den letzten Jahrzehnten an Zahl und Stärke zugenommen. Dabei treten die Wetterextreme oft an verschiedenen Orten gleichzeitig auf.

In der Studie zeigen die Forscher, dass sich langanhaltende Wetterlagen im Sommer über dem Nordatlantik, Europa und Sibirien immer ähnlicher werden und letztlich extreme Wetterereignisse begünstigen. Allein in Europa sind bereits rd. 70 % der Landfläche von länger an einer Stelle verharrenden Wetterlagen betroffen. Das bedeutet, dass die Menschen, vor allem im dicht besiedelten Europa, wahrscheinlich mehr und auch stärkere und gefährlichere Wetterereignisse erleben werden.

Um dies zu belegen, analysierten die Wissenschaftler die sogenannte Persistenz bestimmter Wetterbedingungen. Sie wendeten bewährte Bildvergleichsmethoden auf Atmosphärendaten an und verglichen Millionen aufeinander folgender Wetterzirkulationsmuster weltweit aus den vergangenen 40 Jahren. Sie untersuchten insbesondere zwei einzelne Extremereignisse, die Hitzewelle im Jahr 2010 in Russland und den außergewöhnlich trockenen Sommer im Jahr 2018 in Europa. Das Wissenschaftlerteam hat festgestellt, dass die Wettermuster im Allgemeinen heute beständiger sind als noch vor einigen Jahrzehnten. Vor allem im Sommer dauern Hitzewellen jetzt oft länger, und auch Niederschlagsereignisse neigen dazu, länger zu dauern und intensiver zu sein. Je länger diese Wetterlagen andauern, desto intensiver können die Extreme werden, sowohl auf der warmen und trockenen Seite als auch auf der Seite des Dauerregens.

Die Zunahme der langanhaltenden Wetterbedingungen ist zu einem großen Teil auf dynamische Veränderungen in der Atmosphäre zurückzuführen. Westwinde werden in den oberen Atmosphärenschichten schwächer und können Wettersysteme nicht mehr so stark vorantreiben. Sie verharren daher mal länger an einer Stelle. Dann gibt es in der betroffenen Region statt ein paar sonnigen Tagen eine mehrwöchige Hitzewelle, oder Regenfälle halten so lange an, dass es zu Überschwemmungen kommen kann.

Wie das Auge eines kundigen Beobachters tastet die neue Bilddaten-Vergleichsmethode systematisch Muster in Atmosphärendaten ab und hilft abzuschätzen, inwieweit aufeinander folgende Wetterzirkulationsmuster sich im Laufe der Zeit verändern oder stabil bleiben. Die angewandte Methode verbessert die Interpretation langfristiger Klimaauswirkungen entscheidend. Wenn die gleiche Methode auf die Ergebnisse von Klimamodellen angewendet wird, also Computersimulationen, ist keine vergleichbare Zunahme langanhaltender Wetterlagen festzustellen, insbesondere nicht über Europa. Möglicherweise waren die Klimamodelle etwas zu konservativ und haben den Anstieg der Wetterpersistenz unterschätzt – und damit auch die Wetterextreme über Europa. Dies wird angesichts des fortschreitenden Klimawandels immer wichtiger.

Jüngste Ereignisse und laufende Forschungen haben gezeigt, dass die Menge und Stärke von Extremereignissen aufgrund des globalen Temperaturanstiegs zugenommen hat. Um diesem besorgniserregenden Trend entgegenzuwirken, muss es das Ziel sein, die globalen Treibhausgasemissionen zu reduzieren und damit den Klimawandel zu begrenzen.

Fachartikel:

Hoffmann, P., Lehmann, J., Fallah, B.J., Hattermann, F.F. (2021): Atmosphere similarity patterns in boreal summer show an increase of persistent weather conditions connected to hydroclimatic risks. Scientific Reports 11, Article number: 22893. DOI: 10.1038/s41598-021-01808-z

Weitere Informationen:

Arbeitsgruppe Klimaresilienz, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/klimaresilienz/ arbeitsgruppen

(aus: Pressemitteilung Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung vom 6. Dezember 2021)

Neuartige Plastikverschmutzungen in Gewässern

Plastikmüll in Ozeanen und Flüssen gehört zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Im Jahr 2019 wurden weltweit ca. 368 Mio. t Kunststoff produziert – 18 Mio. t davon in Deutschland. Hierzulande verbraucht jeder Einwohner alleine rund 39 kg Verpackungsabfall aus Plastik. Der Anblick von Plastikmüll in Gewässern oder den zugehörigen Auen ist daher leider schon fast zu einem gewohnten Anblick geworden. Im Fokus der Forschung stehen insbesondere Herkunft, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Makroplastik in den Gewässern. Daneben entdeckten Wissenschaftler der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zunehmend neuartige Formen der Plastikverschmutzung.

Die BfG-Biologen untersuchten dabei bisher wenig beachtete Formen von Plastikverschmutzung in Gewässern. Sie haben erstmalig sogenanntes Plastiglomerat und Pyroplastik in Kieselstein geprägten Lebensräumen erfasst und nachgewiesen, wie aus Plastiglomerat Pyroplastik entstehen kann. Bislang war diese Form der Verschmutzung lediglich an anderen Ufertypen bekannt. Für ihre Untersuchung wählten die Forschenden daher die Insel Madeira im Atlantischen Ozean, die für ihre Kieselstrände berühmt ist.

Plastiglomerat und Pyroplastik sind zwei neuartige Formen von Plastikmüll, die ursprünglich an Sandstränden auf Hawaii und in Großbritannien entdeckt wurden. Während Plastiglomerat aus mit Steinen oder Kieselsteinen verschmolzenem Kunststoff besteht, handelt es sich bei Pyroplastik um geschmolzenen Kunststoff. Beide Formen von Plastikmüll entstehen vermutlich als Überreste durch absichtliche oder unabsichtliche Verbrennung von Kunststoffen z. B. bei Lagerfeuern. Beide Plastikmüllvarianten lassen sich häufig nur auf den zweiten Blick von echten, bzw. unbelasteten Steinen unterscheiden. Sie werden daher oft bei Plastiksammlungen an Stränden übersehen. Eine weitere neuartige Form der Plastikverschmutzung sind krustenartige Flecken geschmolzenen Plastiks auf Felsen, auch Plastikkrusten genannt. Diese konnten die BfG-Wissenschaftler bei vorangegangenen Studien ebenfalls bereits auf der italienischen Insel Giglio und auf Madeira nachweisen. Solche Krusten entstehen vermutlich durch das Zusammenspiel von Meer und Sonne: die Forschergruppe fand zusammen mit italienischen Kollegen heraus, dass Plastikkrusten aus marinen Seilen entstehen, die durch Wellenschlag an den Küstenfelsen entlanggerieben werden. Dieser Abrieb durch Wellen zusammen mit hohen Temperaturen des durch die Sonne erhitzten Gesteins sorgen dann dafür, dass sich das Plastik mit dem Gestein verbindet. Die entdeckten "Plastiksteine" bestanden aus Polyethylen und Polypropylen – zwei der am häufigsten genutzten Kunststoffsorten. Witterung und Reibung sorgen allmählich dafür, dass sich die Plastikklumpen sukzessive zerkleinern, bis letztlich Mikroplastikpartikel (< 5 mm) entstehen.

Die ökologischen Wirkungen, die von diesen Formen des Plastikmülls ausgehen, sind noch weitestgehend unbekannt. Bei den Plastikkrusten sei die Wahrscheinlichkeit jedoch groß, dass bestimmte Organismen, etwa Schnecken oder Krabben, Partikel aufnehmen und der Kunststoff so in die Nahrungskette gelangt.

Plastikkrusten-ähnliche Spuren wurden schon im limnischen Bereich in einem trockenen Flussbett in Spanien gefunden. Die Wissenschaftler halten es daher für möglich, dass sich Plastikkrusten auch in den Bundeswasserstraßen befinden. Sie gehen davon aus, dass auch hierzulande Pyroplastik z. B. bei einem Lagerfeuer entsteht und dann auch in die Fließgewässer gelangt. Potenziell bergen Plastikkrusten und Pyroplastik ein ökologisches Risiko. So kann Pyroplastik giftiges Blei und Cadmium enthalten. Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf. Gleichzeitig müssen jedoch auch Wege gefunden werden, wie sich die Einträge von Kunststoffen in die Gewässer wirksam und nachhaltig reduzieren lassen.

Fachartikel:

Ellrich, J.A., Ehlers, S.M. (2021): Field observations in pebble beach habitats link plastiglomerate to pyroplastic via pebble clasts. Marine Pollution Bulletin, Vol. 174. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.113187

Weitere Informationen:

Referat Tierökologie, Bundesanstalt für Gewässerkunde www.bafg.de/DE/08_Ref/U4/U4_node.html

(aus: Pressemitteilung Bundesanstalt für Gewässerkunde vom 8. Dezember 2021)

Studie zum Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser des Ozeans

Die Bewegung der Wassermassen im Ozean ist ein wesentlicher Baustein des globalen Klimasystems. In einer aktuellen Studie konnten Forschende des Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung nachweisen, dass die Zirkulation im tiefen Ozean während kalter Phasen in der Erdgeschichte deutlich verlangsamt war. Analysen von Sedimentproben zeigen, dass der Abbau organischen Kohlenstoffs in den Wassermassen der Tiefsee den dort verfügbaren Sauerstoff aufzehrte.

Als natürliche Senke für Kohlenstoff ist der Ozean ein zentraler Baustein des Klimasystems auf der Erde. Wie viel Kohlenstoff dem System für lange Zeit entzogen wird, hängt davon ab, wie viel kohlenstoffhaltige Partikel im Meeresboden erhalten bleiben. Hierbei ist die Verfügbarkeit von gelöstem Sauerstoff von zentraler Bedeutung, da dieser beim mikrobiellen Abbau zuvor gebildeter Biomasse verbraucht wird. Die Verteilung von Sauerstoff in der Wassersäule wird in erster Linie durch die vertikale Zirkulation bestimmt. Zur Beantwortung der Frage, ob die entsprechenden Bedingungen im tiefen Ozean in der jüngeren Erdgeschichte Veränderungen unterlagen, haben die Autoren der neuen Studie Sedimentproben untersucht. Dabei wurden chemische Elemente analysiert, die sich als Anzeiger sauerstofffreier Bedingungen eignen und deren Signale sich über Jahrtausende bis Jahrmillionen im Sediment erhalten können.

Die Sedimentkerne, die dem Team zur Verfügung standen, stammen aus dem Kapbecken vor der Westküste des südlichen Afrikas, aus Wassertiefen zwischen 1.000 und 2.500 Metern. Hier liegt aufgrund der Strömungsverhältnisse eines der biologisch produktivsten Gebiete: Kaltes, nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe erhöht die Produktivität pflanzlichen Planktons. Stirbt organisches Material ab, werden diese Partikel während ihres Absinkens durch die Wassersäule und am Meeresboden durch Mikroorganismen abgebaut. Bei diesem Prozess wird vorzugsweise Sauerstoff verbraucht. Sinken große Mengen organischen Materials ab, kann dies dazu führen, dass mehr Sauerstoff benötigt wird, als durch Strömungen nachgeliefert werden kann. Die Wassersäule wird "anoxisch", also sauerstofffrei.

Anhand von geochemischen Signaturen in den Sedimenten konnten Forschende nun nachweisen, dass während der letzten Kaltzeit sehr viel weniger Sauerstoff im tiefen Ozean verfügbar gewesen sein muss als in den wärmeren Phasen. Bislang wusste man, dass während kalter Perioden der stärkere Temperaturgradient zwischen den Polen und dem Äquator mit einer Verstärkung der Windzirkulation, damit einem stärkeren Auftrieb nährstoffreichen Wassers und damit wiederum einer intensiveren biologischen Produktion in direktem Zusammenhang steht. Auch war bekannt, dass sich aufgrund der Bildung polarer Eiskappen und des sich damit einhergehenden tieferen Meeresspiegels in kalten Perioden der küstennahe Auftrieb in Richtung des Kontinentalhangs, also über tiefere Bereiche des Ozeans, verschoben hat. Neu an der aktuellen Studie ist, dass die Verarmung an Sauerstoff sich nicht auf Wassertiefen von wenigen hundert bis tausend Metern beschränkt, sondern jetzt auch am Grund des Ozeans nachgewiesen werden konnte. Dies lässt sich im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückführen.

Intensive Zersetzungsprozesse der in Kaltzeiten vermehrt produzierten Biomasse haben sehr viel Sauerstoff verbraucht. Der erhöhte Gehalt organischen Kohlenstoffs in den untersuchten Sedimenten kann als klares Indiz dafür angesehen werden, dass zeitgleich die Verfügbarkeit von Sauerstoff stark eingeschränkt gewesen sein muss. Heute findet man sauerstofffreie Zonen auf dem wenige hundert Meter flachen Schelf, also dem Übergang des Festlandssockels zum Meer. In der Eiszeit hingegen war das Wasser des offenen Ozeans in größeren Tiefen anoxisch.

Aus den Sedimentproben konnten die Forschenden ablesen, dass in Kaltzeiten im tiefen Ozean organisches Material weniger effektiv abgebaut und demzufolge mehr organischer Kohlenstoff in der Senke "Meeresboden" vergraben wurde. Indem sie diese Prozesse aus der Erdgeschichte genauer analysieren, können sie besser abschätzen, ob auch in der Zukunft eine verlangsamte Zirkulation zu einer erhöhten Speicherung des vom Menschen freigesetzten Kohlenstoffs in Tiefseesedimenten führen könnte. Vor dem Hintergrund des von Menschen verursachten Anstiegs der Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre und des fortschreitenden Klimawandels ist es von entscheidender Bedeutung, Prozesse und Mechanismen zu bestimmen und zu bewerten, die den Sauerstoffgehalt des ozeanischen Bodenwassers beeinflussen.

An den Untersuchungen waren die Institute Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel/GEOMAR, Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen/MARUM, Oklahoma State University (USA) sowie Valley City State University (USA) beteiligt.

Fachartikel:

Riedinger, N., Scholz, F., Abshire, M.L., Zabel, M. (2021): Persistent deep water anoxia in the eastern South Atlantic during the last ice age. PNAS 2021.

DOI: 10.1073/pnas.2107034118

Weitere Informationen:

Marine Biogeochemie, GEOMAR www.geomar.de/forschen/fb2/ueberblick

(aus: Pressemitteilung Universität Bremen vom 8. Dezember 2021)

Fund einer extrem seltenen Insektenart weist auf Bedeutung der Auwälder hin

Forschende und Biologiestudierende der Universität Leipzig haben bei einer zoologischen Freilandexkursion im Leipziger Auwald ein extrem seltenes Insekt entdeckt, den Mückenhaft *(Bittacus hageni)*. Gleich mehrere Exemplare gingen ihnen im Blätterdach des Leipziger Auwalds ins Netz. Diese Art von Schnabelfliegen ist in Europa nur an wenigen Stellen zu finden. In Deutschland galt sie bis zum Jahr 2003 als ausgestorben. Der Fund unterstreicht die Bedeutung des Leipziger Auwaldes als einzigartigen, aber bedrohten Lebensraum. Er zeigt aber auch, welche wertvollen Entdeckungen durch ausgearbeitete Exkursionen möglich werden.

Der im Juli des Jahres 2021 gefundene Mückenhaft ist eine nicht mehr als Fünf-Cent große Schnabelfliege, die mit ihren langen Beinen an eine Schnake erinnert. Nach seinem Erstfund Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland galt der Mückenhaft für über 130 Jahre als ausgestorben, bis ihn ein Göttinger Zoologe am Rand des Harzes im Jahr 2003 wiederentdeckte. Der erneute Fund ist nicht nur ein absolut seltenes Ereignis, sondern auch ein Erstnachweis für den östlichen Teil Deutschlands. Einige Tage später gelang es dem Wissenschaftlerteam bei einer intensiven Nachsuche noch weitere Exemplare der Art zu finden. Die Insektenexperten und wissenschaftlichen Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Molekulare Evolution und Systematik der Tiere an der Universität Leipzig waren beeindruckt, als er die taxonomische Ersteinschätzung unter dem Binokular bestätigen konnte. Es gilt als sehr schwierig und als ein glücklicher Zufall, diese Art nachzuweisen, da sie extrem versteckt lebt und nur vereinzelt vorzukommen scheint.

Allerdings ist der Leipziger Auwald auch ein ganz besonderer Ort, an dem viele Insektenarten vorkommen, darunter auch viele seltene. Aus diesem Grund erforscht die Universität Leipzig in Verbund mit dem Deutschen Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) hier auch das Vorkommen und die Verbreitung bedrohter Insektenarten. So analysieren die Leipziger Forscher die Diversität von über 500 Käferarten, die am Boden, aber auch im Kronenraum der Auwaldbäume vorkommen. Dabei setzen die Forschenden den 40 m hohen Auwaldkran des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung und der Universität Leipzig ein. Der Fund bestätigt zudem auch die herausragende Bedeutung des Leipziger Auwalds als Refugium für bedrohte Arten und besonderen Lebensraum in Europa, den es unbedingt in seiner jetzigen Größe und Ausprägung zu erhalten gilt.

Für Studierende bietet der Auwald nicht nur die Chance, einen spannenden Einblick in die Diversität der Insekten und Forschungsaktivitäten zu erleben, sondern auch während der Freilandexkursionen die Arten in ihrem natürlichen Habitat zu erleben. Da es innerhalb der Universität und auch der Fakultät jedoch immer schwieriger wird, Mittel für Freilandexkursionen zu erhalten, freut es die Wissenschaftler besonders.

Der Fund wird auch den ersten genetischen Fingerabdruck der Art liefern, der dann diese Art auch in DNA-Datenbanken für die Forschung zugänglich machen wird. Hierzu wird eine in der Arbeitsgruppe bereits etablierte Methode angewendet, bei der die untersuchten Tiere nicht beschädigt werden und im Anschluss als Belegexemplar in einer öffentlichen Sammlung verbleiben können.

Fachartikel:

Hahn, L., Schaffer, S., Wolf, R., Bernhard, D. (2021): Erstnachweis von Bittacus hageni Brauer, 1860 (Mecoptera, Bittacidae) für Sachsen. Entomologische Nachrichten und Berichte, 65, 2021/3.

Weitere Informationen:

Institut für Biologie, Universität Leipzig www.lw.uni-leipzig.de/institut-fuer-biologie

(aus: Pressemitteilung Universität Leipzig vom 14. Dezember 2021)

Brandenburg

Niedrigwasserkonzept für das mittlere Spreegebiet veröffentlicht

Die Erfahrungen der Trockenjahre 2018 bis 2020 sowie die Erarbeitung des Landesniedrigwasserkonzeptes Brandenburg, das diese Erfahrungen stärker berücksichtigt, erforderten auch eine grundlegende Überarbeitung des bereits seit dem Jahr 2006 bestehenden Niedrigwasserkonzeptes für das mittlere Spreegebiet. Im Auftrag des Umweltministeriums Brandenburgs erarbeitete das Landesamt für Umwelt zusammen mit den zuständigen unteren Wasserbehörden sowie den Gewässerunterhaltungsverbänden eine angepasste Strategie, um künftig auftretenden Niedrigwassersituationen im mittleren Spreegebiet zu begegnen.

Niedrigwasserphasen im mittleren Spreegebiet traten bereits in der Vergangenheit auf. Deshalb hat das Landesamt für Umwelt Brandenburg schon in 2006 ein Niedrigwasserkonzept für dieses Gebiet erarbeitet, in dem Maßnahmen in Abhängigkeit der Abflusssituation am Pegel Leibsch (Unterpegel) verankert waren. Die Zuspitzung von Trockenwetterphasen wie in den Jahren 2018 bis 2020 sowie die erforderlichen Anpassungen an das im Februar 2021 veröffentlichte Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg verlangten eine grundlegende Überarbeitung des bestehenden Niedrigwasserkonzeptes für das mittlere Spreegebiet.

Während der Trockenjahre 2018 bis 2020 wurden zur Sicherstellung der Mindestabflüsse im Spreegebiet bereits eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen: Neben der Erhöhung der Abgaben der Talsperren im Einzugsgebiet wurden auch die Ausleitungen aus der Spree reduziert und zum Teil geschlossen, Schleusen mussten gesperrt sowie die Wasserführung im Spreewald auf einige Fließe konzentriert werden.

Das Landesamt für Umwelt Brandenburg hat das Konzept in enger Zusammenarbeit mit den im Gebiet zuständigen unteren Wasserbehörden und Gewässerunterhaltungsverbänden erarbeitet. Dieses Niedrigwasserkonzept ist damit auch das erste flussgebietsbezogene Niedrigwasserkonzept im Sinne des Landesniedrigwasserkonzeptes. Weitere flussgebietsbezogene Konzepte sind in Vorbereitung. In dem Niedrigwasserkonzept sind, neben einer detaillierten Beschreibung des Gebietes sowie der relevanten Einflussfaktoren auf den regionalen Wasserhaushalt, Maßnahmen zur Wasserbewirtschaftung in Niedrigwasserphasen dargelegt. Dabei wird untergliedert in Maßnahmen der Niedrigwasservorsorge und des Niedrigwassermanagements bis hin zur Rückführung der ergriffenen Maßnahmen. Auch die künftige Umsetzung der Maßnahmen wird in Absprache mit den unteren Wasserbehörden erfolgen.

Das überarbeitete Niedrigwasserkonzept bildet den aktuellen Rahmen für die Niedrigwasserbewirtschaftung im mittleren Spreegebiet. Im Zuge der Umsetzung der Maßnahmen werden diese bewertet und gegebenenfalls angepasst.

Es ist davon auszugehen, dass vor dem Hintergrund des bevorstehenden Braunkohleausstiegs und des sich zuspitzenden Klimawandels häufiger Niedrigwasserphasen auftreten werden. Das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz und das Landesamt für Umwelt arbeiten deshalb weiterhin – auch gemeinsam mit den Ländern Sachsen und Berlin – an Strategien, um Niedrigwasser, den Auswirkungen des Klimawandels und des Braunkohleausstiegs auf den Wasserhaushalt zu begegnen.

Das Niedrigwasserkonzept für das mittlere Spreegebiet ist im Internet unter der folgenden Adresse einsehbar: https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Niedrigwasserkonzept-Mittlere-Spree.pdf

Weitere Informationen:

Niedrigwassermanagement in Brandenburg https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/wassermengenbewirtschaftung/niedrigwasser

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg vom 23. November 2021)

Ausbildung

Förderprogramm "Wasser – Forschung für eine nachhaltige Ressourcennutzung"

Die Kurt-Eberhard-Bode-Stiftung im Stifterverband schreibt ihr Förderprogramm 2022 aus: Gefördert wird eine Juniorforschungsgruppe, die interdisziplinär und praxisorientiert Modelle für die nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser entwickelt. Dazu wird die Gruppe für einen Zeitraum von bis zu drei Jahren mit bis zu 160.000 € pro Jahr ausgestattet. Bewerbungen sind bis zum 7. Februar 2022 möglich.

Mit ihrem Förderprogramm möchte die Kurt-Eberhard-Bode-Stiftung zur Vernetzung der Leitdisziplinen innerhalb der Naturwissenschaften beitragen und einen fachübergreifenden und transdisziplinären Dialog anregen, um die Wasserressourcen-Forschung als Schlüsseldisziplin für eine globale nachhaltige Entwicklung zu stärken.

Wasser gilt als der wichtigste Rohstoff des 21. Jahrhunderts. Bis zum Jahr 2050 wird die Weltbevölkerung auf 9 Mrd. Menschen anwachsen. Die weltweit und regional unterschiedlichen Wasserprobleme erfordern vielfältige Forschungsbemühungen. Während in den entwickelten Ländern primär die Wasserqualität im Fokus steht, sind die ariden und semiariden Regionen Asiens, Afrikas und Südamerikas von einer Verknappung ihrer Wasserressourcen betroffen. Für Küstenregionen und Flusseinzugsgebiete wird die Zunahme von hydrologischen Extremereignissen wie Hochwasser und Überflutungen prognostiziert.

Zentrale Forschungsthemen des Stiftungsprogramms sind Strategien und Konzepte für ein gesellschaftlich tragfähiges, nachhaltiges Management der Ressource Wasser. Exemplarische Themenfelder sind:

- Wasser und Gesundheit
- Wasser und Ernährung
- Wasser und Ökotoxikologie
- Wasser und Landnutzung
- Wasser und Boden
- Wasser und Klima

Die Kurt-Eberhard-Bode-Stiftung im Stifterverband fördert eine durch eine Jury ausgewählte Juniorforschungsgruppe und stattet sie für einen Zeitraum von bis zu drei Jahren mit insgesamt bis zu 160.000 € p.a. aus. Die Gruppe soll in interdisziplinärer, praxisorientierter Forschungsarbeit an der Schnittstelle von Wissenschaft und Gesellschaft herausragende Strategien und Konzepte für die nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser entwickeln. Die Mittel werden für die Finanzierung von Postdoktoranden/innen und/oder Doktoranden/innen sowie Reiseund Sachmittel zur Verfügung gestellt.

Die Juniorforschungsgruppe muss an einem ausgewiesenen universitären oder außeruniversitären Forschungsinstitut eingerichtet werden, das eine Integration in ein aktives wissenschaftliches Umfeld garantiert. Angesprochen sind Vertreter/innen der natur- und lebenswissenschaftlichen Disziplinen im interdisziplinären Austausch. Die Beantragung erfolgt gemeinsam mit dem/ der verantwortlichen Hochschullehrer/in.

Interessenten werden gebeten, für die Antragstellung das entsprechende Merkblatt bei Stifterverband anzufordern. Über die Vergabe der Förderung entscheidet die Stiftung auf der Grundlage der Empfehlungen externer Gutachten.

Weitere Informationen:

Website des Stifterverbandes www.stifterverband.org

(aus: Pressemitteilung Stifterverband vom 11. November 2021)

Projektbericht

Hochwasser der Ahr im Juli 2021 – Abflussabschätzung und Einordnung

Das verheerende Hochwasser, welches sich im Juli 2021 im Ahrtal ereignet hat, zerstörte entlang des Flusses auch die Pegelmessstationen, wodurch eine Messung von Wasserstand und Abfluss nicht mehr möglich gewesen ist. Anhand einer Methode, welche bislang zur Rekonstruktion historischer Hochwasser angewandt wurde, soll der Scheitelabfluss des Hochwassers vom Juli 2021 quantifiziert werden. Dies erfolgt durch die Auswertung und Einmessung von Wasserstandsanzeigern sowie der Topographie des Hochwasserbetts. Entlang der Ahr ist der Scheitelabfluss an acht Standorten rekonstruiert und weist einen maximalen Wert zwischen 1.000 bis 1.200 m³/s auf. Zusätzlich werden die Scheitelabflüsse der neun größeren Nebenbäche der Ahr rekonstruiert. Es zeigt sich, dass die Bäche aus dem nördlichen Einzugsgebiet einen deutlich höheren Anteil am Gesamtabfluss der Ahr aufweisen als jene im südlichen Einzugsgebiet. Die historische Einordnung des Hochwassers vom Juli 2021 zeigt, dass sich im Ahrtal bereits im Jahr 1804 ein Hochwasser von ähnlicher Magnitude ereignet hat und es somit zwar ein seltenes, jedoch kein einmaliges Ereignis war.

1 Einführung

Am 13. und insbesondere 14. Juli 2021 ergossen sich große Niederschlagsmengen über weite Teile Westdeutschlands, das südliche Belgien und angrenzende Regionen der Niederlande. Weiträumig wurden Niederschlagssummen von über 100 mm beobachtet, an mehreren Orten Extremwerte von 150 bis 250 mm erreicht (JUNGHÄNEL et al. 2021; KREIENKAMP et al. 2021). Zwar stellen diese Werte keine absoluten Rekordniederschläge dar, doch sind sie durch ihre flächenhafte Verbreitung

außergewöhnlich. Ursache war ein stationäres Tiefdruckgebiet, das fortwährend feuchtigkeitsgesättigte Luftmassen heranführte, die regional zum Aufstieg gezwungen waren. Die Kombination von extremen Niederschlagsmengen, Vorfeuchte in den geringmächtigen Böden und das Relief führten u. a. im Einzugsgebiet der Ahr zu katastrophalen Hochwasserabflüssen mit verheerenden Schäden und über 200 Todesopfern in Deutschland und Belgien. Die Abflüsse in der Ahr überschritten durchgängig die Kapazität der Pegel, zerstörten diese sogar (Abb. 1), was die außergewöhnliche Dimension des Abflusses unabhängig von einer statistischen Parametrisierung illustriert.

Ohne Pegeldaten ist die Abschätzung der Abflüsse, insbesondere der Scheitelabflüsse zur Dimensionierung eines angemessenen Hochwasserschutzes erschwert. Ergänzend kommt die Beschreibung betroffener Anwohner im Ahrtal von wiederholten Schwankungen des Wasserstandes beim Durchgang der Hochwasserwelle hinzu. (Eine Zusammenstellung der Beobachtungen wurde im Herbst 2021 am Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz begonnen.) Filmaufnahmen und Schadensbilder illustrieren wiederholte Verklausungen mit entsprechendem Rückstau bzw. pulsierendem Abfluss nach Bruch der Barriere, die die Abschätzung des Abflusses weiter erschweren.

Um dennoch zu Abschätzungen des Abflusses zu kommen, ist eine Methode zur Abflussabschätzung von Hochwasserständen aus historischer Zeit, namentlich bei fehlenden Pegeldaten, angewandt worden. Diese Methode und ihre Anwendung auf die Wasserstandsindikatoren im Einzugsgebiet der Ahr wird nachfolgend vorgestellt. Dabei werden die Abflüsse in Bezug zu historischen Hochwasserereignissen gesetzt, sodass eine Einordnung des Ereignisses möglich wird.

2 Abflussabschätzung historischer Hochwasserstände

Die Abschätzung des Abflusses entlang der Ahr und ihrer Zuflüsse erfolgt über einen Ansatz, der entwickelt worden ist, um historische Wasserstände in entsprechende Abflüsse zu überführen (HERGET et al., 2014). Die konkrete Anwendung und Quantifizierung für die Verhältnisse im Einzugsgebiet der Ahr im Juli 2021 nach dem Durchgang des Hochwassers folgen im nächsten Abschnitt, hier zunächst einige allgemeine Erläuterungen.

Der Abfluss Q wird über die Kontinuitätsgleichung als Produkt aus der Fließgeschwindigkeit v und der durchströmten Fläche A bestimmt:

 $Q = v \times A$



Abbildung 1

Der Pegel Altenahr (links intakt) wurde während des Hochwassers am 14./15. Juli 2021 zerstört. Messdaten wurden lediglich bis 20:45 Uhr, deutlich vor Erreichen des Höchstwasserstandes, verzeichnet (Bildquelle: Thomas Roggenkamp, 2012 u. 2021). Während die Fläche A sich vergleichsweise offensichtlich aus der Höhe des Wasserstandes, konkret der überlieferten, verifizierten Wasserstandanzeiger innerhalb der durchströmten Fläche ergibt, wird für die Fließgeschwindigkeit die empirische Formel in der Schreibweise nach Manning angewandt:

$$v = R^{2/3} \times S^{1/2} \times n^{-1}$$

wobei R für den hydraulischen Radius (Quotient aus durchströmter Fläche A zum benetzten Umfang U) und S für das Gefälle stehen; n bildet einen Rauhigkeitsbeiwert.



Abbildung 2

Ablaufschema der Abfluss- und Parameterabschätzung für historische Hochwasser (vereinfacht verändert aus HERGET et al., 2014). Das Prozedere zur Abflussbestimmung lässt sich an dem Ablaufschema in Abbildung 2 nachvollziehen. Zunächst ist ein Wasserstandsindikator zu identifizieren (HERGET, 2020). Für historische Hochwasser kann dieser aus Wasserstandsmarken an Gebäuden, aber auch schriftlichen Überlieferungen bestehen. Im Falle des Ahrtals sind es natürliche Anzeiger wie die Höhenlage eines Treibgutsaums am Ufer oder der Lehmschleier an Baumstämmen und Hauswänden.

In der Regel ist die Topographie in einem Querprofil heterogen. So ist beispielsweise die Rauhigkeit innerhalb eines Gerinnes anderen Einflüssen ausgesetzt als in einem landwirtschaftlich genutzten Abschnitt des Hochwasserbettes oder einem Auwald. Dem entsprechend wird das gefundene Querprofil in homogene Teilflächen mit einheitlicher Beschaffenheit unterteilt. Bei Unsicherheiten werden in Form einer Szenarienbildung verschiedene Annahmen getroffen, die Abschätzungen durchgeführt und geprüft, ob die Ergebnisse deutlich voneinander abweichen oder Unsicherheiten und Unschärfen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Ergebnis zu vernachlässigen sind. Eine Veränderung der Topographie der Komponenten des Querschnittprofils seit historischer Zeit sowie Erosions- und Akkumulationsraten von Auenlehm bzw. im Gerinne spielen für die hier betrachtete Anwendung keine Rolle.

Nach dieser Ausdifferenzierung des Querprofils kann es nun ausgemessen werden, sei es geodätisch im Gelände oder bei angemessener räumlicher Auflösung anhand von topographischen Karten in großen Maßstäben bzw. Geländemodellen. Die Gesamtfläche wird auf die Teilkomponenten des Querprofils proportional aufgeteilt. Entsprechend wird aus diesen Daten der benetzte Umfang U ausgerechnet und der hydraulische Radius R berechnet. Wegen der zuvor erfolgten Absicherung des freien Wasserspiegelgefälles ohne Rückstau kann das Gefälle über die Veränderung der Höhenlage durchgängiger Wasserstandanzeiger wie einem Treibgutsaum am Ufer bzw. dem aktuellen rückstaufreien Wasserspiegel geodätisch erfasst werden. Bei sehr ausgedehnten Hochwasserbetten wie etwa am Niederrhein können auch Berechnungen über Wasserstandsangaben aus topographischen Karten erfolgen, wobei natürlich auch hier die Rückstaufreiheit gegeben sein muss.

Für die Bestimmung des hydraulischen Rauhigkeitsbeiwertes n werden tabellierte Werte herangezogen (Übersichten in CHOW, 1959; HERGET, 2012, S. 27; vertiefend: ARCEMENT & SCHNEIDER, 1989). HERGET et al. (2014) stellen einen weitergehenden analytischen Ansatz vor, bei dem die relevanten Rauhigkeitskomponenten wie Vegetation, Korngröße der Sedimente, Gerinnebettund Uferformen u. a. m. individuell quantifiziert und zu einem Gesamtwert für die jeweiligen in sich homogenen Teilflächen summiert werden. Diese tabellierten Werte weisen durchweg Spannweiten auf, denn die Ausprägungen der Rauhigkeitskomponenten lassen sich nicht scharf trennen. Entsprechend der auf jahrzehntelangen Erfahrungen basierenden Werte werden im Abgleich zu den Beschreibungen jeweils minimale (n_{min}), mittlere plausible (np) und maximale (nmax) Werte bestimmt. Hierdurch ergeben sich je Teilfläche 3 Fließgeschwindigkeiten und letztendlich nach Aufaddierung eine Spannweite des Abflusses für das gesamte Profil. Wie die nachfolgende Anwendung im Ahrtal veranschaulicht, bildet dabei der Wert für einen plausiblen n_p-Wert durchaus nicht das Mittel aus Minima und Maxima.

3 Berechnung des Scheitelabflusses an Ahr und Nebenbächen

Unter Anwendung der oben vorgestellten Methode soll der Scheitelabfluss des Hochwassers vom 14./15. Juli 2021 rekonstruiert werden. Gegenüber der Berechnung historischer Hochwasser ergibt sich der Vorteil, dass die jeweiligen Parameter nicht über abschätzende Rekonstruktionen der Verhältnisse in der Vergangenheit erfolgen, sondern direkt im Gelände erhoben werden können. Insbesondere für die Abschätzung des Rauhigkeitswertes ergibt sich eine engere Spannweite.

Im Fokus stehen nicht nur Untersuchungen an der Ahr selbst, sondern auch an den größeren Nebenbächen. Das Ahr-Einzugsgebiet (Abb. 3) weist eine Gesamtgröße von 897 km² auf. Vergangene Hochwasser zeigten bereits, dass insbesondere in den größeren Bächen am Oberlauf ein Großteil des Gesamtabflusses generiert wurde – so zum Beispiel der Adenauerbach sowie der Trierbach bei den großen Hochwasserereignissen der Jahre 1804 und 1910 (JANTA & POPPELREUTER, 2010). Durch die vorliegenden Rekonstruktionen soll überprüft werden, welchen Anteil die jeweiligen Nebenbäche am Gesamtabfluss hatten und ob sich einzelne Bäche herausstellen, welche einen überproportional hohen Anteil am Gesamtabfluss der Ahr aufweisen. Nicht zuletzt ist dies für die Planung zukünftiger Hochwasserschutzmaßnahmen von Interesse.

3.1 Auswahl der Untersuchungsstandorte

Um das Hochwasser in seiner räumlichen Gesamtheit fassen zu können, erfolgt die Rekonstruktion sowohl an den neun größeren Nebenbächen (Ah-Bach, Trierbach, Dreisbach, Ahrmuthsbach, Adenauerbach, Liersbach, Kesselinger Bach, Sahrbach und Vischelbach) als auch an der Ahr selbst. Um eine Differenzierung des Scheitelabflusses im Längsprofil zu ermöglichen, werden an der Ahr sieben weitere Standorte untersucht.

Um mögliche Fehler in der Rekonstruktion gering zu halten, stellen sich an die Wahl der genauen Untersuchungsstandorte mehrere Ansprüche:

3.1.1 Auswahlkriterium Wasserstandsanzeiger

Das Hochwasser vom Juli 2021 hatte entlang der Ahr und der Zuflüsse deutliche Spuren hinterlassen, an denen sich der Höchstwasserstand ablesen lässt. Entsprechende Kartierungen fanden im Laufe des Sommers 2021 statt, denn durch Witterungseinflüsse und Aufräumarbeiten werden diese mit der Zeit undeutlicher oder gar gänzlich beseitigt. So fanden sich im gesamten Einzugsgebiet entsprechende Spuren an Hauswänden. Allerdings können der kapillare Aufstieg des Wassers sowie ein Auflaufen der



Abbildung 3 Einzugsgebiet der Ahr. Lage der einzelnen Untersuchungsstandorte und Pegel an der Ahr und den Nebenbächen.

Welle an der Häuserwand für eine Überschätzung des tatsächlichen Höchstwasserstandes sorgen.

Während des Hochwassers traf mitgeführtes Treibgut beispielweise auf Bäume und ließ beim Aufschlag Rinde abplatzen. Derartige Schlagmarken geben Hinweise auf den Wasserstand, sind aber nicht eindeutig in der Zuordnung. So ist es möglich, dass der Aufprall nicht zum Zeitpunkt des Höchstwasserstandes erfolgte und die Marke einen zu niedrigen Wasserstand abbildet. Doch auch eine Überschätzung ist denkbar, wenn zum Beispiel größere mitgeführte Gegenstände (Baucontainer, Wohnwagen etc.) auf dem Wasser schwimmend beim Aufprall eine Schlagmarke oberhalb des Wasserstandes erzeugt haben.

Neben größerem Treibgut werden bei Hochwasser auch kleinere Materialien, wie Gräser transportiert. Diese verfangen sich als Treibgut in Büschen oder Ästen und verbleiben auch nach Absenken des Wasserspiegels auf der ursprünglichen Höhe. Auch hier gibt es einen gewissen Unsicherheitsfaktor, denn insbesondere dünnere Zweige können durch die Strömung nach unten gedrückt werden. Heben sich diese samt getrocknetem und damit leichterem Treibgut nach Durchgang der Hochwasserwelle wieder an, besteht die Gefahr der Überschätzung des Höchstwasserstandes.

Im Zuge des Hochwassers wurden Sedimente aller Korngrößenfraktionen mobilisiert. Analog zum sinkenden Abfluss verringert sich auch die Transportkompetenz des Flusses und es kommt zur Akkumulation der Sedimentfracht in Form von Auenlehmen. Die darin erkennbaren charakteristischen frischen Trockenrisse ließen die entsprechenden Stellen schnell als aktuelle Wasserstandsanzeiger identifizieren.

Für alle Standorte wurde beachtet, dass die verwendeten Wasserstandsanzeiger eine signifikante Über- oder Unterschätzung des Höchstwasserstandes ausschließen. Schlagmarken sowie Wasserstandsmarken an Häusern werden daher nicht berücksichtigt. Im Idealfall kann der Höchstwasserstand an einem Standort anhand mehrerer Indikatoren bestimmt werden.

3.1.2 Auswahlkriterium Einfluss von Bauten

Verschiedene Faktoren können den tatsächlichen Höchstwasserstand verfälschen. Darunter fallen insbesondere Brückenbauten und Gebäude. Neben den oben genannten Unsicherheitsfaktoren, welche Wasserstandsanzeiger an Bauten im Allgemeinen aufweisen, kann es zu weiteren möglichen Verfälschungen kommen. So kam es an Hindernissen zu Aufstauungen (zum Beispiel durch Verklausungen zwischen Brückenpfeilern), welche einen überhöhten Wasserstand generierten. Im Gegensatz zu Rekonstruktionsstandorten historischer Hochwasser, welche aufgrund der Quellen zum Wasserstand meistens zu Teilen in Siedlungen liegen, lässt sich für die Rekonstruktion des Hochwassers vom Juli 2021 auf alternative Wasserstandsanzeiger zurückgreifen. Die Untersuchungsstandorte werden somit außerhalb von Siedlungen sowie mit ausreichendem Abstand zu Brücken gewählt.

3.1.3 Auswahlkriterium für Nebenbäche: Entfernung zur Mündung

Ein zusätzliches Kriterium betrifft die Untersuchungsstandorte an den Nebenbächen. Um den Scheitelabfluss des jeweiligen Baches möglichst genau abzubilden, soll der Standort in Nähe zur Mündung in die Ahr liegen. Zu beachten gilt dabei, dass der unmittelbare Mündungsbereich ausgeklammert wird, da das Eindringen der Hochwasserwelle der Ahr in den Nebenlauf durch Rückstau für verfälschte Wasserstände sorgen könnte. Ein Mindestabstand von einem Kilometer zur Mündung wird angesichts der vergleichsweise hohen Gefälle in den Tälern als angemessen angenommen.

3.2 Rekonstruktion des Ahr-Scheitelabflusses zwischen Rech und Dernau

Entlang der Ahr erfolgt die Rekonstruktion des Scheitelabflusses an insgesamt acht Standorten. Bedingt durch die dichte Bebauung befindet sich ahrabwärts zwischen den Orten Rech und Dernau der letzte Untersuchungsstandort (Untersuchungsstandort 17). Hier sind die größten Bäche bereits in die Ahr eingemündet. Für diesen Standort wird exemplarisch das Rekonstruktionsverfahren im Detail dokumentiert.

Auf Höhe des Untersuchungsstandortes weist die Aue keine Bebauung auf, lediglich ein Bahndamm prägt die Topographie. Der Abstand zur nächsten Brücke beträgt ca. 1.000 m flussaufwärts und ca. 800 m flussabwärts.

Als Wasserstandsanzeiger fungieren hier zum einen Treibgutablagerungen in Bäumen entlang der Ahr sowie Auenlehm, welcher bis in Weinhänge an den ansteigenden Ufern zu finden ist (Abb. 4). Das Flussbett weist hier, bei normalem Wasserstand, eine Breite von 14,5 m auf. Zum Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes war die Talsohle auf einer Breite von 439 m durchströmt.



Abbildung 4 Wasserstandsanzeiger am Untersuchungsstandort 17. Auenlehm mit frischen Trockenrissen am unteren Weinhang. (Bildquelle: Jürgen Herget, 2021)

Da die Untersuchungsstandorte bewusst außerhalb von Ortschaften gewählt sind, fehlen oftmals Höhenfestpunkte als Referenz zum gemessenen Höchstwasserstand. Die Angabe der Wasserhöhe erfolgt daher als Höhe über dem tiefsten Punkt der ebenfalls geodätisch vermessenen Gerinnesohle. Nachfolgend werden die einzelnen Parameter quantifiziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

3.2.1 Durchströmte Fläche (A)

Die Vermessung des Querprofils erfolgt mithilfe eines elektronischen Tachymeters (Geodätische Totalstation). Die Lage der Wasserstandsanzeiger begrenzt die durchströmte Fläche lateral wie vertikal. Aufgrund der Heterogenität des Querprofils wird dieses in vier homogene Abschnitte unterteilt (Abb. 5). Abschnitt A und B weisen mit einer fast durchgehenden Bepflanzung von Wein-

reben sehr ähnliche Verhältnisse auf, sind allerdings durch einen Bahndamm voneinander getrennt. Die rechtsseitig der Ahr selbst (Abschnitt C) liegende Aue (Abschnitt D) ist durch Grasbewuchs mit vereinzelten Bäumen gekennzeichnet.

Wie die Situation während und unmittelbar nach dem Hochwasser zeigte, wurde in der Ahr in hohem Maße Material mitgeführt, welches von natürlichem Geröll über Bäume bis hin zu Autos, Wohnwagen, Baucontainer, Hausrat etc. reichte. Im gewählten Querprofil wird derlei Fracht einen signifikanten Teil der durchströmten Fläche eingenommen haben. Wie Ortsbegehungen sowie die Auswertung von Fotoaufnahmen zeigten, waren die Auen in diesem Bereich der Ahr praktisch flächendeckend mit abgelagertem Treibgut und Sedimenten bedeckt. Die Höhe schwankt dabei und lässt sich für den Untersuchungsraum lediglich näherungsweise auf einen Meter abschätzen. Die tatsächlich durchströmte Fläche verringert sich dadurch und weist insgesamt einen Wert von 981 m² auf (Tab. 1).

3.2.2 Hydraulischer Radius (R)

Der Hydraulische Radius ist der Quotient aus der Durchströmten Fläche (A) und des benetzten Umfangs (U). Anhand des gemesse-

_				п		
	-	n	0		0	
	α	v	c		-	

Parameter der Teilflächen und resultierender Scheitelabfluss für Untersuchungsstandort 17
(Ahr zwischen Rech und Dernau).

	A	В	С	D	gesamt					
A [m ²]	320,2	383,4	82,4	195,2	981					
U [m]	180	170	25,4	82,5	457,9					
R [m]	1,78	2,26	3,25	2,36	2,14					
S [m/m]	0,00358	0,00358	0,00358	0,00358	0,00358					
n _{min}	0,09	0,09	0,043	0,09						
n _p	0,1	0,1	0,045	0,1						
n _{max}	0,11	0,11	0,048	0,11						
v _{min} [m/s]	0,80	0,94	2,73	0,96						
v _p [m/s]	0,88	1,03	2,92	1,06						
v _{max} [m/s]	0,98	1,14	3,05	1,18						
Q _{min} [m ³ /s]	256	360,5	225,2	187,2	~ 1.030					
$Q_p [m^3/s]$	281,6	395	240,9	206,7	~ 1.120					
Q _{max} [m ³ /s]	313,6	437,2	251,6	230,1	~ 1.230					

nen Querprofils sowie des eingemessenen Wasserstandsniveaus lassen sich die Parameter für alle Teilabschnitte des Querprofils berechnen (Tab. 1).

3.2.3 Gefälle (S)

Das Gefälle der Ahr wird vom Rheinlandpfälzischen Landesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität mit 0,4 % am Mittel- und Unterlauf angegeben (Quelle: https://wasser. rlp-umwelt.de/servlet/is/1210/). Da dieser Wert über einen sehr großen Teil der Ahr gemittelt ist und lokale Abweichungen zu erwarten sind, wird das Gefälle des Hochwasserspiegels durch eigene Messungen mithilfe des Tachymeters durchgeführt, indem das Gefälle des aktuellen Wasserspiegels über den Höhenunterschied 50 m vor sowie hinter dem Querprofil ausgemessen wird. Aus der gemessenen Höhendifferenz lässt sich das Gefälle als 0,358 % berechnen. Für die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit wird das Gefälle mit 0,00358 m/m angegeben.

3.2.4 Rauhigkeitsbeiwert (n)

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung wird der Rauhigkeitsbeiwert für jeden Teilabschnitt separat ermittelt. Als Quelle dienen die empirischen Werte nach CHOW (1959), wel-



Abbildung 5

Querprofil des Untersuchungsstandortes 17 zwischen den Ortschaften Rech und Dernau.

Rauhigkeitsteilwerte für Untersuchungsstandort 17 (Ahr zwischen Rech und Dernau) hergeleitet aus tabellarischen Angaben in CHOW (1959).										
Teilwerte	Abschnitt A und B	Abschnitt C	Abschnitt D							
n _o Oberfläche	Lehm – 0,02	Grobkies – 0,028	Lehm – 0,02							
n ₁ Unebenheiten	Gering – 0,005	Gering – 0,005	Gering – 0,005							
n ₂ Unregelmäßigkeiten Ränder	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant							
n ₃ Hindernisse	Massiver Einfluss – 0,04-0,06	Geringer Einfluss – 0,01-0,015	Massiver Einfluss – 0,04-0,06							
n ₄ Vegetation	Hoch – 0,025	Nicht relevant	Hoch – 0,025							
m Grad des Mäandrierens	Gerader Verlauf – 1	Gerader Verlauf – 1	Gerader Verlauf – 1							
n	0,09-0,11 n _p = 0,1	0,043-0,048 n _p = 0,45	0,09-0,11 n _p = 0,1							

cher sowohl für Gerinnebetten als auch Aueflächen Rauhigkeitsteilwerte quantifiziert hat. Für die vorliegende Untersuchung sind die Teilwerte der Rauhigkeit der Oberfläche (n₀), topographische Unregelmäßigkeiten der überströmten Fläche (n1), Unregelmäßigkeiten der Uferränder (n₂), der Effekt durch Hindernisse (n₃) sowie die Vegetation (n₄) von Relevanz (vgl. zur Herleitung HERGET et al., 2014). Hinzu kommt der Korrekturfaktor m, welcher den Effekt des Mäandrierens auf die Fließgeschwindigkeit berücksichtigt. Da für die Untersuchungen weitgehend gerade verlaufende Abschnitte gewählt wurden, ist der Faktor zu vernachlässigen. Die Rauhigkeitsteilwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Teilabschnitte A und B mit Weinreben sind in Bezug auf die Beschaffenheit als homogen zu betrachten und werden lediglich aufgrund des Bahndammes in zwei Abschnitte gegliedert. Hinsichtlich der Vegetation weisen die Teilabschnitte A und B eine durchgehende Bepflanzung mit Weinreben auf, welche Höhen von etwa zwei Metern erreichen. Aufgrund dieser Homogenität wird mit 0,025 der unterste Wert der von CHOW (1959) genannten Spannweite für "Hohe Vegetation" angenommen. Hindernisse in Form von Treibgut, welches sich in den Weinreben verfangen hat, wird ebenfalls einen signifikanten Effekt auf die Rauhigkeit gehabt haben. Der Rauhigkeitsbeiwert liegt für diese Abschnitte damit zwischen 0,09 (n_{min}) und 0,11 (n_{max}) mit einem mittleren Rauhigkeitsbeiwert (n_p) von 0,1.

Teilabschnitt C umfasst das Gerinnebett der Ahr. Die signifikanten Einflussgrößen auf die Rauhigkeit sind die Gerinnebettoberfläche und, in geringerem Maße, der Effekt durch Hindernisse. Treibgut konnte sich, anders als auf der Aue, kaum verklausen und hat somit nur geringen Einfluss auf die Rauhigkeit ausgeübt. Der Rauhigkeitsbeiwert liegt für das Gerinnebett zwischen 0,043 (n_{min}) und 0,048 (n_{max}) mit einem mittleren Wert (n_{p}) von 0,045.

Teilabschnitt D weist weitgehend ähnliche Verhältnisse wie die Teilabschnitte A und B auf. Es ergibt sich somit ebenfalls ein Spektrum zwischen 0,09 (n_{min}) und 0,11 (n_{max}) mit einem mittleren Rauhigkeitsbeiwert von 0,1 (n_p).

3.2.5. Rekonstruktionsergebnisse

Nachdem die benötigten Parameter quantifiziert sind, lassen sich die mittleren Fließgeschwindigkeiten für die Teilabschnitte berechnen. Analog zum Spektrum des Rauhigkeitsbeiwertes ergeben sich jeweils Spannweiten der Fließgeschwindigkeit (v_{min} bis v_{max}) sowie des Abflusses (Q_{min} bis Q_{max}). Die Ergebnisse sowie die Parameter für Standort 17 sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Rekonstruktion des Scheitelabflusses des 3.3. Vischelbaches (Standort 16)

Die Quantifizierung des Scheitelabflusses der Nebenbäche verläuft nach dem gleichen Prozedere wie am Hauptlauf. Eine Aufteilung der Querprofile in mehrere Teilabschnitte ist allerdings nicht notwendig, da die Gerinnebetten der Bachläufe Breiten von maximal drei Metern aufweisen und damit lediglich zwischen 2,5 und 10 % des gesamten Querprofils einnehmen. Deutlich wird dies am Beispiel des Vischelbaches (Abb. 6). Hier ragen Bäume über den Bachlauf und nehmen somit direkt Einfluss auf die Rauhigkeit im Gerinnebett. Die einzelnen Parameter werden somit für das gesamte Querprofil quantifiziert. Als Wasserstandsanzeiger fungieren hier Treibgutablagerungen, welche sich in großer Zahl an Bäumen und Sträuchern finden. Aus der vermessenen Topographie lassen sich die durchströmte Fläche (A), der benetzte Umfang (U) sowie der hydraulische Radius (R) ableiten. Das Gefälle ist ebenfalls gemessen und beläuft sich auf 0,01386 m/m (entspricht 1,386 %); ein deutlich höheres Gefälle als an der Ahr. Der Rauhigkeitsbeiwert liegt zwischen 0,05 (n_{min}) und 0,07 (n_{max}) mit einem mittleren n_p von 0,06 - prägend ist hier die Vegetation. Die im Sommer dicht belaubten Bäume entlang des Baches hatten maßgeblichen Anteil an der Rauhigkeit. Die Parameter sowie die daraus berechneten Fließgeschwindigkeiten und Abflusswerte sind in Tabelle 3 aufgeführt.



Abbildung 6 Vischelbach nach dem Hochwasser vom Juli 2021 (Bildquelle: Thomas Roggenkamp 2021).

Tabelle 3

Parameter sowie Spannweite des Scheitelabflusses für Untersuchungsstandort 16 (Vischelbach).

Parameter	Standort 16 Vischelbach
A [m ²]	38,2
U [m]	25,8
R [m]	1,48
S [m/m]	0,01386
n _{min}	0,05
n _p	0,06
n _{max}	0,07
v _{min} [m/s]	2,18
v _p [m/s]	2,55
v _{max} [m/s]	3,06
Q _{min} [m ³ /s]	~ 85
$Q_p [m^3/s]$	~ 95
Q _{max} [m ³ /s]	~ 115

4 Ergebnisse

Analog zu den Standorten 16 und 17 wurde der Scheitelabfluss für die 14 weiteren Standorte an der Ahr bzw. an den Nebenbächen rekonstruiert. Alle Parameter sowie die Rekonstruktionsergebnisse sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass, neben dem Ah-Bach, die nördlichen Zuflüsse in der Spitze deutlich größere Abflussmengen verzeichnen. Alleine der Ahrmuthsbach erreichte mit seinem Spitzenabfluss von etwa 200 m³/s einen Abfluss, der auch in der Ahr selber nur selten erreicht wird. Die Ahr wies bereits am Oberlauf einen extrem hohen Scheitelabfluss auf. So wurde der bisherige durch Pegel erfasste Spitzenabfluss in Müsch (132 m³/s am 2. Juni 2016) um den Faktor vier übertroffen, wodurch es bereits an den dort gelegenen Orten zu massiven Zerstörungen kam. Es zeigt sich, dass das Hochwasser insbesondere im Einzugsgebiet der oberen Ahr entstanden ist.

Die rekonstruierten Abflüsse sind zeitlich nicht synchron, sodass sich die Scheitelabflüsse der Nebenbäche nicht zum Scheitelabfluss der Ahr aufaddieren lassen.

Standort	1	2	5	7	9	11	14	17
	Oberhalb	Unterhalb	Unterhalb	Unterhalb	Oberhalb	Unterhalb	Unterhalb	Unterhalb
	Ah-Dorf	Ah-Dorf	Müsch	Fuchshofen	Dümpelfeld	Dümpelfeld	Pützfeld	Rech
Wasserhöhe	3,42	3,59	4,51	3,49	4,92	4,55	6,06	5,87
über Talweg [m]								
A [m ²]	Aa: 41,5	Aa: 44,8	AA: 89,2	Aa: 96,8	AA: 13,1	Aa: 148	Aa: 219,1	Aa: 320,2
	Ав: 21,8	Ав: 45,6	Ав: 18,3	Ав: 41,3	Ав: 31,2	Ав: 108,5	Ав: 236,4	Ав: 383,4
	Ac: 131,7	Ac: 69	Ac: 150,1	Ac: 60	Ac: 311	Ac: 105,3	Ac: 78,2	Ac: 82,4
	Ages. 195	Ages. 159,4	Ages. 257,6	Ages. 198,1	Ages. 355,3	Ages. 361,8	Ages. 533,7	Ad: 195,2
								Ages. 981,2
U [m]	Ua: 40	UA: 25	Ua: 44,9	Ua: 75,8	UA: 12	Ua: 43,4	UA: 92,3	Ua: 180
	Uв: 7,9	Uв: 13,5	Uв: 4,2	Uв: 12,4	Uв: 6,6	Uв: 24,5	Uв: 41,8	Uв: 170
	Uc: 103,8	Uc: 47,2	Uc: 63,6	Uc: 82,4	Uc: 181,5	Uc: 97,3	Uc: 28,6	Uc: 25,4
	Uges. 151,7	UGES. 85,7	UGES. 112,7	Uges. 170,6	Uges. 200,1	UGES. 165,2	Uges. 162,7	UD: 82,5
								Uges. 457,9
R [m]	Ra: 1,04	Ra: 1,79	Ra: 1,99	Ra: 1,28	Ra: 1,09	Ra: 3,41	Ra: 2,37	Ra: 1,78
	Rв: 2,76	Rв: 3,38	Rв: 4,36	Rв: 3,33	Rв: 4,73	Rв: 4,43	Rb: 5,66	Rв: 2,26
	Rc: 1,27	Rc: 1,46	Rc: 2,36	Rc: 0,73	Rc: 1,71	Rc: 1,08	Rc: 2,73	Rc: 3,25
	Rges. 1,29	Rges. 1,86	RGES. 2,29	RGES. 1,16	RGES. 1,78	Rges. 2,19	Rges. 3,28	RD: 2,36
								RGES. 2,14
S [m/m]	0,00284	0,00312	0,00228	0,00744	0,00189	0,00269	0,000969	0,00358
n	namin 0,03	namin 0,03	namin 0,04	namin 0,03	namin 0,04	namin 0,04	namin 0,03	namin 0,09
	nAp 0,033	nap 0,033	nap 0,06	nAp 0,033	nAp 0,06	nap 0,06	nAp 0,033	nAp 0,1
	namax 0,035	namax 0,035	namax 0,08	namax 0,035	nAmax 0,08	namax 0,08	namax 0,035	nAmax 0,11
	nвmin 0,073	nвmin 0,034	nвmin 0,043	nвmin 0,038	nBmin 0,043	nвmin 0,043	nвmin 0,043	nBmin 0,09
	пвр 0,083	пвр 0,036	пвр 0,046	пвр 0,04	пвр 0,046	пвр 0,046	пвр 0,046	пвр 0,1
	пвтах 0,093	пвтах 0,039	пвтах 0,048	пвтах 0,043	пвтах 0,048	nвmax 0,048	пвтах 0,048	пвтах 0,11
	ncmin 0,03	ncmin 0,04	ncmin 0,043					
	ncp 0,033	ncp 0,06	ncp 0,045					
	ncmax 0,035	ncmax 0,08	ncmax 0,048					
								nomin 0,09
								nop 0,1
								nomax 0,11

Standort	1	2	5	7	9	11	14	17
Standort	Oberhalb	_ Unterhalb	Unterhalb	Unterhalb	Oberhalb	Unterhalb	Unterhalb	Unterhalb
	Ah-Dorf	Ah-Dorf	Müsch	Fuchshofen	Dümpelfeld	Dümpelfeld	Pützfeld	Rech
v [m/s]	vamin 1,56	vamin 2,35	vamin 0,94	vamin 2,91	vamin 0,58	vamin 1,47	vamin 1,58	vamin 0,8
	vap 1,66	vap 2,5	vap 1,26	vap 3,08	vap 0,77	vap 1,96	vap 1,68	vap 0,88
	vamax 1,82	vamax 2,74	vamax 1,89	vamax 3,39	vamax 1,15	vamax 2,94	vamax 1,85	vamax 0,98
	vBmin 1,13	vBmin 3,23	vBmin 2,65	vBmin 4,47	vBmin 2,55	vBmin 2,92	vBmin 2,06	vBmin 0,94
	vвр 1,26	vвр 3,49	vвр 2,77	vвр 4,81	vвр 2,66	vвр 3,04	vвр 2,15	vвр 1,03
	vBmax 1,44	vBmax 3,7	vBmax 2,96	vBmax 5,06	vвmax 2,85	vвтах 3,25	vBmax 2,3	vвmax 1,14
	vcmin 1,79	vcmin 2,05	vcmin 2,42	vcmin 1,99	vcmin 1,78	vcmin 1,56	vcmin 0,76	vcmin 2,73
	vcp 1,89	vcp 2,18	vcp 2,56	vcp 2,12	vcp 1,88	vcp 1,66	vcp 1,01	vcp 2,92
	vcmax 2,08	vcmax 2,4	vcmax 2,82	vcmax 2,33	vcmax 2,07	vcmax 1,82	vcmax 1,52	vcmax 3,05
								vomin 0,96
								vop 1,06
								vomax 1,18
Q [m ³ /s]	Qamin 64,7	Qamin 105,3	Qamin 83,8	Qamin 281,7	Qamin 7,6	Qamin 217,6	Qamin 346,2	Qamin 256
	Qap 68,9	Qap 112	Qap 112,4	Qap 298,1	Qap 10,1	Qap 290,1	Qap 368,1	Qap 281,6
	Qamax 75,5	Qamax 122,8	Qamax 168,6	Qamax 328,2	Qamax 15,1	Qamax 435,1	Qamax 405,3	Qamax 313,6
	Opmin 24.6	Ormin 147.2	Osmin 48 E	Opmin 1946	Osmin 70.6	Opmin 216.9	Osmin 497	Osmin 260 E
	QBIIIII 24,0	QBIIIII 147,5	QBIIIII 40,5	QBIIIII 104,0	QBIIIII 79,0	QBITIII 5 10,0	QBITIIT 467	QBIIIII 500,5
	QBP 27,5	QBP 159,1	QBP 50,7	QBP 196,7	QBP 65	QBP 529,6	QBP 506,5	QBP 395
	QBIIIAX 51,4	QBITIAX TOO,7	QBIIIAX 54,2	QBIIIAX 209	QBIIIAX 00,9	QBIIIAX 552,0	QBIIIdX 545,7	QBIIIdX 457,2
	Qcmin 235,7	Qcmin 141,5	Qcmin 363,2	Qcmin 119,4	Qcmin 553,6	Qcmin 164,3	Qcmin 59,4	Qcmin 225,2
	Qcp 248,9	Qcp 150,4	Qcp 384,3	Qcp 127,2	Qcp 584,7	Qcp 174,8	Qcp 79	Qcp 240,9
	Qcmax 273,9	Qcmax 165,6	Qcmax 423,3	Qcmax 139,8	Qcmax 643,8	Qcmax 191,6	Qcmax 118,9	Qcmax 251,6
								Qomin 187,2
								QDp 206,7
								QDmax 230,1
Q gesamt	Qmin 325	Qmin 395	Qmin 495	Qmin 585	Qmin 640	Qmin 700	Qmin 890	Qmin 1.030
(gerundet)	Qp 345	Qp 420	Qp 545	Qp 625	Qp 680	Qp 795	Qp 955	Qp 1.120
	Qmax 380	Qmax 460	Qmax 645	Qmax 675	Qmax 750	Qmax 980	Qmax 1.070	Qmax 1.230

Tabelle 5 Parameter und rekonstruierter Scheitelabfluss für die Untersuchungsstandorte an den Nebenbächen.												
Standort	2 Ah-Bach	4 Trierbach	6 Dreisbach	8 Ahrmuths- bach	10 Adenauer Bach	12 Liersbach	13 Kesselinger Bach	15 Sahrbach	16 Vischel- bach			
Wasserhöhe über Talweg [m]	4,82	3,51	3,72	3,46	2,73	2,51	1,05	2,43	3,13			
A [m ²]	211,9	85,5	70,9	115,3	27,7	45,3	13	90,3	38,2			
U [m]	87,3	68,7	61,8	79,2	15,4	35,4	14,5	91,4	25,8			
R [m]	2,43	1,24	1,15	1,46	1,8	1,24	0,9	0,99	1,48			
S [m/m]	0,000794	0,00061	0,03866	0,002883	0,00587	0,02359	0,0012	0,00591	0,01386			
n	nmin 0,035	nmin 0,03	nmin 0,09	nmin 0,35	nmin 0,035	nmin 0,09	nmin 0,025	nmin 0,035	nmin 0,05			
	np 0,04	np 0,035	np 0,1	np 0,04	np 0,04	np 0,1	np 0,03	np 0,04	np 0,06			
	nmax 0,045	nmax 0,04	nmax 0,11	nmax 0,45	nmax 0,045	nmax 0,11	nmax 0,033	nmax 0,045	nmax 0,07			
v [m/s]	vmin 1,13	vmin 0,71	vmin 1,96	vmin 1,54	vmin 2,52	vmin 1,61	vmin 0,98	vmin 1,7	vmin 2,18			
	vp 1,27	vp 0,81	vp 2,16	vp 1,73	vp 2,83	vp 1,77	vp 1,08	vp 1,91	vp 2,55			
	vmax 1,45	vmax 0,95	vmax 2,4	vmax 1,97	vmax 3,24	vmax 1,97	vmax 1,29	vmax 2,18	vmax 3,06			
Q [m ³ /s]	Qmin 240	Qmin 60	Qmin 140	Qmin 180	Qmin 70	Qmin 75	Qmin 13	Qmin 155	Qmin 85			
(gerundet)	Qp 270	Qp 70	Qp 155	Qp 200	Qp 80	Qp 80	Qp 14	Qp 170	Qp 95			
	Qmax 305	Qmax 80	Qmax 170	Qmax 225	Qmax 90	Qmax 90	Qmax 17	Qmax 195	Qmax 115			

5 Schlussfolgerungen und Einordnung

Der rekonstruierte Scheitelabfluss von 1.000 bis 1.200 m³/s zwischen Rech und Dernau übersteigt den bis dato größten direkt gemessenen Abfluss (236 m³/s am 2. Juni 2016 am Pegel Altenahr (LFU RHEINLAND-PFALZ, 2021)) um ein Vielfaches. Dennoch sind derartige Abflussgrößen im Ahrtal nicht unbekannt. So haben sich im Ahrtal bereits in der jüngeren Geschichte Hochwasser von bemerkenswerter Magnitude ereignet (Abb. 7). Der Scheitelabfluss des Hochwassers vom Juli 1804 wurde zwischen Dernau und Walporzheim mit einem Wert von ca. 1.200 m³/s rekonstruiert (ROGGENKAMP & HERGET, 2014a; ROGGENKAMP & HERGET, 2014b). Derartige Magnituden wurden somit bereits vor anthropogenen Einflüssen in Form von Flächenversiegelungen, Flussbaumaßnahmen oder dem anthropogen induzierten Klimawandel erreicht. Der entscheidende Faktor zur Entstehung des Hochwassers des Jahres 1804 war, ebenso wie 2021, der extreme Niederschlag. Auch für das Hochwasser von 1804 wird von einem Starkregenereignis nach tagelang anhaltenden Niederschlägen berichtet (JANTA & POPPELREUTER, 2010). Unabhängig von der Flächennutzung wurde dabei weiträumig die Infiltrationskapazität der Böden überschritten, sodass zwischenzeitliche anthropogene Veränderungen zwar eine weitere Verstärkung verursacht haben können, nicht aber ursächlich für die extreme Hochwassermagnitude anzusehen sind.

Das Niederschlagsgebiet könnte möglicherweise 1804 etwas weiter südlich gelegen haben, denn es werden in den vorliegenden Schriftquellen der Trierbach sowie der Adenauerbach als besonders wasserführend hervorgehoben (FRICK, 1955). Diese Bäche verzeichneten während des Hochwassers von 2021 dagegen einen vergleichsweise geringeren Scheitelabfluss (Tab. 5).

Eine derartige räumliche Variabilität der Niederschlagsverbreitung sollte auch bei der anstehenden Frage nach einem angemessenen Hochwasserschutz Berücksichtigung finden. Ein intensiver Ausbau der Schutzmaßnahmen – wegen der Besiedlung im Ahrtal und der Hochwasserentstehung wohl bevorzugt in den Nebentälern der Ahr – geht dann bei einer Wiederholung eines entsprechenden Ereignisses ins Leere, wenn das Niederschlagsgebiet sich einige Kilometer entfernt jenseits der Wasserscheiden befinden sollte. Nachhaltig(er) könnte eine kritische Prüfung weiterer Ortslagen in Mittelgebirgstälern auch außerhalb der Region um das Ahrtal sein, die historisch gewachsen mittlerweile ebenfalls in weiten Teilen im Überschwemmungsgebiet für extreme Hochwasser liegen.

> Dr. Thomas Roggenkamp, Prof. Dr. Jürgen Herget Geographisches Institut, Universität Bonn troggen@uni-bonn.de

Literaturverzeichnis

- ARCEMENT, G.J. & V.R. SCHNEIDER (1989): Guide for selecting Manning's roughness coefficient for natural channels and floodplains. Water Supply Paper 2339.
- CHOW, V.T. (1959): Open-Channel Hydraulics. Boston (The Blackburn Press).
- FRICK, H. (1955): Das Hochwasser von 1804 im Kreise Ahrweiler. In: Landkreis Ahrweiler (Hrsg.): Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler 1955, S. 43-51.
- HERGET, J. (2012): Am Anfang war die Sintflut Hochwasserkatastrophen in der Geschichte. Darmstadt (WBG).
- HERGET, J., ROGGENKAMP, T. & M. KRELL (2014): Estimation of peak discharges of historic floods. Hydrology and Earth System Sciences 18, S. 4029-4037.
- HERGET, J. (2020): Palaeostage indicators in rivers an illustrated review. In: Herget, J. & A. Fontana (Hrsg.): Palaeohydrology – traces, tracks and trails of extreme events. Springer (Cham), S. 187-211.
- JANTA, L. & H. POPPELREUTER (2010): "... Das Elend übersteigt jeden Begriff ..." In: Landkreis Ahrweiler (Hrsg.): Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler 2010, S. 188-197.
- JUNGHÄNEL, T., BISSOLLI, P., DASSLER, J., FLECKENSTEIN, R., IMBERY, F., JANSSEN, W., KASPAR, F., LENGFELD, K., LEPPELT, T., RAUTHE, M., RAUTHE-SCHÖCH, A., ROCEK, M., WALAWENDER, E. & E. WEIGL (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet "Bernd" vom 12. bis 19. Juli 2021. Deutscher Wetter-



Vergleich der rekonstruierten Hochwasser (historisch sowie 2021) mit den höchsten vom Pegel Altenahr erfassten Hochwassern.

dienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt. https://www.dwd.de/ DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.html 29 Nov 2021.

KREIENKAMP, F., PHILIP, S.Y., TRADOWSKY, J.S., KEW, S.F., LORENZ, P., ARRIGHI, J., BELLEFLAMME, A., BETTMANN, T., CALUWAERTS, S., CHAN, S.C., CIAVARELLA, A., DE CRUZ, L., DE VRIES, H., DEMUTH, N., FERRONE, A., FISCHER, E.M., FOWLER, H.J., GOERGEN, K., HEINRICH, D., HENRICHS, Y., LENDERINK, G., KASPAR, F., NILSON, E., OTTO, F.E.L., RAGONE, F., SENEVIRATNE, S.I., SINGH, R.K., SKÅLEVÅG, A., TERMONIA, P., THALHEIMER, L., VAN AALST, M., VAN DEN BERGH, J., VAN DE VYVER, H., VANNITSEM, S., JAN VAN OLDENBORGH, G., VAN SCHAEYBROECK, B., VAUTARD, R., VONK, D., & N. WANDERS (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World Weather Attribution. https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/ uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution. pdf.

- LFU RHEINLAND-PFALZ (Hrsg.) (2021): Übersicht des Pegels Altenahr. https://www.hochwasser-rlp.de/karte/einzelpegel/flussgebiet/ rhein/teilgebiet/mittelrhein/pegel/ALTENAHR.
- ROGGENKAMP, T. & J. HERGET (2014a): Reconstructing peak discharges of historic floods of the River Ahr, Germany. In: Erdkunde 68, S. 49-59.
- ROGGENKAMP, T. & J. HERGET (2014b): Historische Hochwasser an der Ahr. In: Landkreis Ahrweiler (Hrsg.): Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler 2015, S. 150-154.

Deutsche Hydrologische Gesellschaft

Wahlen des Geschäftsführenden Präsidiums und des Erweiterten Präsidiums der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft

Am 8. November 2021 fanden in einer Online-Sitzung die Mitgliederversammlung der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft (DHG) sowie die Wahlen zum Präsidium der DHG statt. Die Wahl musste wiederholt werden, da die Mitgliederversammlung bei der ursprünglichen Wahl am 31. August 2021 beim Tag der Hydrologie in Potsdam aufgrund der 20%-Regelung nicht beschlussfähig war. Bei der Online-Wahl wählten die Mitglieder als neue Präsidentin der DHG Frau Prof. Dr. Britta Schmalz (TU Darmstadt). Neuer Vizepräsident wurde Herr Prof. Dr. Axel Bronstert (Uni Potsdam). Des Weiteren wurden Herr Prof. Dr. Markus Casper (Uni Trier) in seinem Amt als Schatzmeister bestätigt und Herr Prof. Dr. Peter Chifflard (Uni Marburg) für das Amt des Schriftführers gewählt. In das Erweiterte Präsidium wurden Frau Dr. Theresa Blume (GFZ Potsdam), Frau Prof. Dr. Mariele Evers (Uni Bonn), Frau Prof. Dr. Nicola Fohrer (Uni Kiel), Herr Dr. Stephan Hannappel (HYDOR Consult Berlin), Herr Prof. Dr. Bruno Merz (GFZ Potsdam) und Frau Prof. Dr. Dörthe Tetzlaff (Humboldt Universität und IGB Leibniz Institut Berlin) gewählt. Das neue Präsidium hat seine Arbeit im November 2021 aufgenommen.

"Tag der Hydrologie 2021" in Potsdam

Unter dem Motto "Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen" fand dieses Jahr der "Tag der Hydrologie 2021" vom 30. August bis zum 1. September 2021 in Potsdam statt. Dem Aufruf der Ausrichter Prof. Dr. Axel Bronstert (Uni Potsdam), Dr. Björn Guse und Dr. Theresa Blume (beide GFZ Potsdam) sind knapp 200 Teilnehmer/-innen gefolgt. Die Expert/-innen diskutierten aktuelle Herausforderungen, die sich aus der Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis ergeben. Aus aktuellem Anlass lag zudem ein besonderer Schwerpunkt auf der Diskussion des aktuellen Wissenstands zum Hochwasser 2021 aus der Sicht von Wissenschaft und Praxis. Die durchgeführte Podiumsdiskussion fand hohen Anklang und es entstand eine rege Diskussion der Teilnehmer/-innen. Zu den einzelnen Themenbereichen 1) Disziplinübergreifende Praxisbeispiele, 2) Interdisziplinäre methodische Innovationen, 3) Wechselwirkungen zwischen Sphären, 4) Hydrologische Extreme und Risiken und 5) Analysen zu den aktuellen Hochwasser- und Dürreereignissen in Deutschland sorgten 31 Vorträge, 46 Poster und 4 Impulsvorträge für ein vielfältiges Programm.

Die Posterpreise der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft (DHG) gingen in diesem Jahr nach Stuttgart, Potsdam und Kaiserslautern. Herr Micha Eisele (Uni Stuttgart) erhielt den Preis für die innovativste Studie, Frau Jenny Kröcher (ZALF, Uni Potsdam) für das beste Design und Herr Rupesh Shrestha (TU Kaiserslautern, AvH Stipendiat) für den besten Themenbezug. Die preisgekrönten Poster stehen auf der Website der DHG zur Ansicht zur Verfügung.

Vorausgehend sorgte die "Nacht der Hydrologie" wieder für einen guten Start. Nach langer Pause der Konferenzen in Präsenz

bot dieser Abend schon die ersten spannenden Diskussionen und die Möglichkeit, Kontakte zu knüpfen und zu intensivieren, und rundete das wissenschaftliche Programm ab.

Am Ende der sehr gelungenen Veranstaltung wurde traditionell der Staffelstab an die Ausrichter des nächsten Tags der Hydrologie 2022 übergeben, der das Thema "Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft" behandelt und am 22./23. März in München gemeinsam von Prof. Dr. Markus Disse, Prof. Dr. Markus Reisenbüchler (TU München) und Prof. Dr. Ralf Ludwig (Ludwig-Maximilian-Universität) organisiert wird. Die Organisatoren betonen, dass nicht zuletzt die extremen Flut- und Dürreereignisse in Europa, aber auch der sechste Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) klar vor Augen geführt hat, dass Wasserressourcen und gesellschaftliches Handeln voneinander abhängig sind und sich gegenseitig beeinflussen. Daher werden Vorträge oder Poster zu diesem Themenbereich gesucht, die sich mit folgenden wissenschaftlichen Fragen auseinandersetzen: 1) Modellierung und Vorhersage von extremen Ereignissen, 2) Nicht-stationäres Verhalten hydrologischer Prozesse, 3) Auenreaktivierung – Synergien von Hochwasser- und Naturschutz und 4) Water-Food-Energy-Nexus. Weitere Informationen: http://tdh2022.hydrologie.ed.tum.de

Workshop für junge Hydrolog/-innen am 21. März 2022 in München

Der Workshop richtet sich an Studierende und graduierte Hydrolog/-innen ("Early Career Scientists") und verfolgt das Ziel, den Austausch und die Vernetzung der neuen Generation an Hydrolog/-innen über die Grenzen der unterschiedlichen Fächer mit Wasserbezug hinweg zu fördern. Dabei bietet sich die Möglichkeit zum gegenseitigen Kennenlernen und zur Präsentation von Forschungsarbeiten in einer ungezwungenen Atmosphäre. Im Zentrum der Veranstaltung steht insbesondere die Diskussion von Herangehensweisen, Ergebnissen, Stolpersteinen, kritischen Punkten oder gar Sackgassen. Der Workshop findet am Vortrag des "Tag der Hydrologie 2022" statt, sodass sich beide Veranstaltungen gut miteinander verbinden lassen. Weitere Informationen: https://www.dhydrog.de/news/veranstaltungen

DHG Aktuell 2021 Nr. 01

Der neue Newsletter der DHG "DHG | Aktuell" ist im Dezember 2021 erschienen und unter www.dhydrog.de/news/aktuelles abrufbar.

DHG-Kalender 2022 – Große Ströme

Wir freuen uns, allen Mitgliedern zu Beginn des Jahres 2022 wieder einen sehr illustrativen Kalender präsentieren zu können, der monatliche Eindrücke zum Thema "Große Ströme" vermittelt. Große Ströme schlängeln sich nicht nur als Transportadern für Wasser, Stoffe oder Menschen durch die Landschaft, sondern es sind auch vielfältige Ökosysteme, die zusammen mit den Auenlandschaften einen großartigen Lebensraum für Flora und Fauna darstellen. Der Kalender wurde unter Mithilfe der DHG-Mitglieder gestaltet, die zahlreiche Fotovorschläge eingesendet haben und somit wesentlich zum Gelingen des Kalenders beigetragen haben. Hierfür gebührt allen Einsender/-innen ein großer Dank. Aus der Vielzahl der Zusendungen hat das Erweiterte Präsidium 12 Fotos ausgewählt, die durch Andreas Bauer von der Universität Potsdam in der vorliegenden Reihung zusammengestellt wurden. Ausgehend vom Oberlauf des Amazonas in Kolumbien über Darstellungen, u. a. aus Deutschland, Ägypten, Indien, China und Chile, schließt ein Bild von der Spree in Berlin das kommende Jahr 2022 eindrucksvoll ab.

Prof. Dr. rer. nat. Peter Chifflard, DHG

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

in der DWA (FgHW)

Einladung zur Mitgliederversammlung und Berichte aus der Facharbeit

Die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW) in der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) bietet ihren Mitgliedern im Rahmen der regelmäßigen Beiträge in der Zeitschrift für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HyWa neben den bisherigen Rubriken auch die Möglichkeit, über aktuelle Forschungsaktivitäten im wissenschaftlichen und technischen Umfeld der Hydrologie zu informieren. Damit sollen aktuelle Entwicklungen einem breiteren Fachpublikum zur Kenntnis gegeben werden. Die Inhalte der Fachbeiträge liegen in der Verantwortung der Forschenden bzw. Forschergruppen, die uns diese zur Verfügung stellen.

Einladung zur FgHW-Mitgliederversammlung am 22. März 2022 in München

Traditionell findet die Mitgliederversammlung der FgHW im Rahmen des "Tags der Hydrologie" statt. In diesem Jahr ist der Termin der 22. März 2022. Die Versammlung wird nach den Fachvorträgen in den Räumen der Technischen Universität München (Konferenzzentrum Galileo in Garching) stattfinden. Genauere Informationen folgen, sobald das Tagungsprogramm feststeht. Hiermit laden wir bereits jetzt die FgHW-Mitglieder recht herzlich zur Teilnahme ein.

In diesem Jahr stehen die Tätigkeitsberichte des Leiters der Fachgemeinschaft und des Vorsitzenden des DWA-Hauptausschusses "Hydrologie und Wasserbewirtschaftung" auf der Tagesordnung. Das neue Leitungsteam der Fachgemeinschaft, Herr Prof. Dr. Robert Jüpner (TU Kaiserslautern) als neuer Leiter der FgHW und Herr Prof. Dr. Konrad Miegel (Uni Rostock) werden Ihre Gedanken für die Weiterentwicklung der Aktivitäten der FgHW vorstellen. Im Rahmen der Veranstaltung wird der Gewinner des Siegfried-Dyck-Preises geehrt, den die FgHW ausgeschrieben hat. Wir freuen uns auf viele interessante Begegnungen mit Ihnen! Link zum Tagungsprogramm: https://tdh2022.hydrologie.ed.tum.de/

13. Forum Hochwasserrisikomanagement am 23. Juni 2022 in Jena mit Studentischem Forum am 22. Juni 2022

Das 13. Forum Hochwasserrisikomanagement wird von den Ländern Rheinland-Pfalz, Bayern, Sachsen und Thüringen veranstaltet. Institutionell zeichnen dafür das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU), das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Freistaates Sachsen (LFULG), das Bayerische Landesamt für Umwelt (LFU) und das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Kaiserslautern als Veranstalter verantwortlich. Als Mitveranstalter fungieren die FgHW, der Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) sowie die TU Kaiserslautern, in deren Händen die Organisation der Präsenzveranstaltung liegt. Die Fachvorträge konzentrieren sich in drei Themenblöcken auf folgende Aspekte des Hochwasserrisikomanagements: "Hochwasser 2021 – hydrologische und hydraulische Aspekte", "Hochwasserrisikokommunikation" und "Operativer Hochwasserschutz".

Am Vortag des Forums, am 22. Juni 2022, findet das studentische Forum statt. Hier werden neben Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten auch ausgewählte Studienprojekte vorgestellt. Die FgHW übernimmt für bis zu 20 Studierende die Reisekosten und den Teilnahmebeitrag für das Forum Hochwasserrisikomanagement am Folgetag. Bewerbungen für diese Kostenübernahme erfolgen über die Organisatoren an der TU Kaiserslautern. Die Übernahme von Reisekosten ist an die Mitgestaltung des Studentischen Forums gebunden. Es muss dafür ein Vortrag gehalten oder ein Posterbeitrag vorgestellt werden. Näheres erfahren Sie auch auf den Seiten der FgHW unter "Aktuelles" (www.fghw.de).

FgHW-Kalender 2023 "Hydrologie von oben" – der Countdown für Ihre Bildbeiträge läuft!

Die FgHW möchte auch im Jahr 2023 ihre Mitglieder wieder mit ihrem traditionellen Wandkalender durch das Jahr begleiten. Dazu greifen wir zum zweiten Mal in Folge unter dem Motto "von Mitgliedern für Mitglieder" das Thema "Hydrologie von oben" auf. Als Leserinnen und Leser sind Sie herzlich aufgefordert, uns ihre beeindruckenden Bilder zum genannten Thema zur Verfügung zu stellen. Alle hydrologischen Themen, von der Messung/ Erhebung bis zur Steuerung und Dokumentation, sind wieder herzlich willkommen. Oft zeigen gerade Bilder aus "luftiger Höhe" (aus Fluggeräten, von Multikoptern oder von Anhöhen, Türmen, hohen Gebäuden) eindrucksvoll die Arbeitsfelder und die Forschungsgegenstände der Hydrologie auf. Wir freuen uns auf Ihre Bild-Beiträge mit entsprechenden Erläuterungen.

Als besonderen Anreiz belohnt die FgHW in diesem Jahr jedes in den Kalender aufgenommene Bild mit einem Gutschein über eine Veröffentlichung aus der DWA-Schriftenreihe Ihrer Wahl!

Ein Redaktionsteam des FgHW-Beirats trifft aus Ihren Einsendungen eine Auswahl von insgesamt 13 Bildern. Wir sind sehr gespannt auf Ihre Zusendungen.

BMBF-Forschungsverbundvorhaben zur wissenschaftlichen Begleitung des Wiederaufbauprozesses nach dem Hochwasser 2021 gestartet

Nach dem Hochwasser 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen stellt der Wiederaufbau die betroffenen Regionen vor gewaltige Herausforderungen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat bereits kurz nach der Katastrophe eine Initiative gestartet, den Prozess des Wiederaufbaus wissenschaftlich zu begleiten. Das dreijährige Forschungsprojekt, an dem insgesamt 13 Projektpartner mitarbeiten, wird von Prof. Dr.-Ing. Jörn Birkmann (Uni Stuttgart) und Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf (RWTH Aachen) koordiniert und mit ca. 5,2 Mio. € vom BMBF gefördert. Ziel der Sofortmaßnahme ist es, neueste wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel und zur Klima-Anpassung für die Prozesse des Wiederaufbaus und für die beteiligten Handelnden zur Verfügung zu stellen. Die Regionen werden mit wissenschaftlicher Expertise dabei unterstützt, zukunftssichere, resiliente und klimafeste Strukturen zu gestalten (https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/KAHR.php).

> Prof. Dr. Robert Jüpner, Prof. Dr. Konrad Miegel, Dipl.-Geogr. Dirk Barion für die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

Neue Publikationen

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2021): Erlebnis Wasser – Handreichung für Jugendgruppen. Broschüre, 58 Seiten.

Download: www.grundwasserschutz.bayern.de/doc/erlebniswasser.pdf

IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (Hrsg.) (2021): Die Biologie des Rheins: Synthesebericht zum Rhein-Messprogramm Biologie 2018/2019 und nationale Bewertungen gemäß WRRL. Fachbericht 280. 57 Seiten. Download: www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/ fachberichte

IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (Hrsg.) (2021): Fische im Rhein 2018/2019. Fachbericht 279. 96 Seiten.

Download: www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/fachberichte

Kissling, T. (ed.) (2021): Fest, Flüssig, Biotisch – Alpine Landschaften im Wandel. 208 S., 240 Abb. ISBN: 978-3-03778-690-1

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2021): Taxonomie für die Praxis Bestimmungshilfen – Makrozoobenthos (Teil 4) Chironomidenlarven. Arbeitsblatt 50, LANUV 2021.

Download: www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/ publikationen/arbeitsblaetter

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2021):

Gewässerchemische Untersuchungen an Ahr und Rhein nach der Hochwasserkatastrophe vom 14./15. Juli 2021. Messkampagne vom 02./03. August bis 13./14. September 2021. Stand 5. Oktober 2021, 15 Seiten.

Download: https://lfu.rlp.de/de/unser-amt-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2021):

Situation der Lebensgemeinschaft der aquatischen Wirbellosen (Makrozoobenthos) der Ahr in Rheinland-Pfalz nach der Hochwasserkatastrophe vom Juli 2021. Ergebnisse der Beprobungen vom 08. bis 16. September 2021. 27 Seiten.

Download: https://lfu.rlp.de/de/unser-amt-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2021):

Nährstoffe in Rheinland-Pfälzischen Oberflächengewässern. Trendbetrachtung 2000 – 2019. Darstellung der Nitrat-, Gesamtphosphor- und ortho-Phosphat-Phosphor-Jahreskonzentration von 2000 bis 2019. 52 Seiten.

Download: https://lfu.rlp.de/de/unser-amt-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/

Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2021): Talsperren

in Sachsen. Fachbuch, 336 Seiten. ISBN: 978-3000702853 Bestellen: www.wasserwirtschaft.sachsen.de/Termine.html

Norddeutsches Küsten- und Klimabüro, Helmholtz-

Zentrum Hereon (Hrsg.) (2021): Meeresspiegelanstieg an der deutschen Ostseeküste – Küstenentwicklung im Klimawandel. Autorin: Meinke, I. Broschüre, 13 Seiten. ISBN: 978-3-940923-10-3

Download: www.hereon.de/innovation_transfer/communication_media/news/103811/index.php.de

Stock, F., Reifferscheid, G., Brennholt, N., Kostianaia, E., (Eds.) (2021): Plastics in the Aquatic Environment – Part I: Current Status and Challenges. The Handbook of Environmental Chemistry, volume 111, 506 p., Springer-Verlag. ISBN: 978-3-030-84118-8

Stock, F., Reifferscheid, G., Brennholt, N., Kostianaia, E., (Eds.) (2021): Plastics in the Aquatic Environment – Part II: Stakeholders' Role Against Pollution. The Handbook of Environmental Chemistry, volume 112, 295 p., Springer-Verlag. ISBN: 978-3030841133

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Bewertung und Quantifizierung von Auswirkungen mariner Abfälle auf Meeresorganismen (gemäß Deskriptor 10 MSRL): Mikroplastik in pelagischen und demersalen Fischen in Nordsee (Niedersächsisches Wattenmeer) und Ostsee (Wismar-Bucht/nördl. Rügen). Autoren: Scholz-Böttcher, B., Fischer, M., Meyer, M., Gercken, J.; Texte 146/2021, 107 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: www.umweltbundesamt.de/ unter /publikationen

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Weiterentwicklung ausgewählter Indikatoren und Bewertungsansätze für die Meeresumwelt und Konkretisierung von Umweltzielen im Rahmen der Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Autoren: Eilers, S., Raabe, T., Ardelean, A., Schulz, M., Heyden, B.; Texte 145/2021, 143 Seiten, Verlag Umweltbundesamt. Download: www.umweltbundesamt.de/ unter /publikationen

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Methodik zur Anwendung von Non-Target Screening (NTS) mittels LC-MS/MS in der Gewässerüberwachung. Autoren: Jewell, K.S., Hermes, N., Ehlig, B., Thron, F., Köppe, T., Thorenz, U., Schlüsener, M.P., Dietrich, C., Wick, A., Ternes, T.A.; Texte 144/2021, 107 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: www.umweltbundesamt.de/ unter /publikationen

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Ökologische Typisierung der aquatischen Makrofauna und Flora Deutschlands: freshwaterecology.info-Handbuch für deutschsprachige Benutzer*innen. Autoren: Schmidt-Kloiber, A., Hartmann, A., Vogl, R.; Texte 139/2021, 52 Seiten, Verlag Umweltbundesamt. Download: www.umweltbundesamt.de/ unter /publikationen

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Online-Version der Systeme zur biologischen Fließgewässerbewertung. Autoren: Rolauffs, P., Strackbein, J., Hering, D., Schönfelder, I., Gutowski, A., Müller, A., Vogl, R., Mischke, U., Riedmüller, U., van de Weyer, K.; Texte 140/2021, 147 Seiten, Verlag Umweltbundesamt. Download: www.umweltbundesamt.de/ unter /publikationen

Termine

Die folgenden Ankündigungen entsprechen dem Wissensstand zum Redaktionsschluss am 30.12.2021.

3rd International Conference on Snow Hydrology

1. bis 4. Februar 2022 in Grenoble (Frankreich) Webseite: snowhydro2022.sciencesconf.org

55. Essener Tagung

9. bis 11. März 2022 in Aachen Webseite: www.essenertagung.de

45. Dresdner Wasserbaukolloquium

10./11. März 2022 Online-Veranstaltung Webseite: www.wasserbaukolloquium.de

Tag der Hydrologie 2022

22./23. März 2022 in Garching bei München Webseite: http://tdh2022.hydrologie.ed.tum.de

EGU General Assembly 2022

3. bis 8. April 2022 in Wien (Österreich) Hybrid-Veranstaltung Webseite: www.egu22.eu

19. Deutsches Talsperrensymposium

26. bis 28. April 2022 in Lindau Webseite: www.talsperrensymposium.de

Wasser 2022 – Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft

23. bis 25. Mai 2022 in Wiesbaden Webseite: www.wasserchemische-gesellschaft.de/termine

ICOLD 27th Congress – 90th Annual Meeting

27. Mai bis 3. Juni 2022 in Marseille (Frankreich) Webseite: cigb-icold2022.fr

World Canals Conference 2022

30. Mai bis 3. Juni 2022 in Leipzig Webseite: www.wccleipzig2022.com

13. Forum Hochwasserrisikomanagement

23. Juni 2022 in Jena Webseite: www.bauing.uni-kl.de/fww/veranstaltungen/13forum-hwrm-23062022

12th Water Research Horizon Conference

21./22. Juni 2022 in Essen Webseite: www.water-research-horizon.de

4th International Conference of I.S. Rivers

4. bis 8. Juli 2022 in Lyon (Frankreich) Webseite: www.isrivers.org

36th Congress of the International Society of Limnology (SIL)

7. bis 10. August 2022 in Berlin Webseite: www.sil2022.org

Quellen – die vergessenen Lebensräume

8. September 2022 in Basel (Schweiz) Webseite: https://scnat.ch/de/events unter "Aktuell"

HyWa und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management

Inhaltsverzeichnis Heft 1 bis 6, 65. Jahrgang 2021

4/156

6/272

Aufsätze

Ausmaß, Trends und Extrema von Dürren im urbanen Raur DOI: 10.5675/HyWa_2021.1_1	m 1/5
Anpassung und Anwendung einer Bewertungsmethode zur Beurteilung der Ökosystemleistungen siedlungs- dominierter Gewässerläufe DOI: 10.5675/HyWa_2021.2_1	2/46
Hochwassermuster im Einzugsgebiet der Isar DOI: 10.5675/HyWa_2021.3_1	3/89
Langjährige Trends der Niedrigwasserkennwerte in Deutschland DOI: 10.5675/HyWa_2021.4_1	4/137
Ein Konzept zur Förderung postamodromer Fischarten in staugeprägten Flüssen des Donaueinzugsgebiets am Beispiel der mittleren Iller DOI: 10.5675/HyWa_2021.4_2	4/156
Entwicklung der Tidekennwerte in den deutschen Nord- seeästuaren Ems, Weser und Elbe unter dem Einfluss der Tidedynamik in der Nordsee und den Oberwasser- zuflüssen DOI: 10.5675/HyWa_2021.5_1	5/210
Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klima- erwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion DOI: 10.5675/HyWa_2021.6_1	6/262
Hydrologische Prozesse in ostafrikanischen tropischen Einzugsgebieten unter dem Einfluss der Landnutzung DOI: 10.5675/HyWa_2021.6_2	6/272
Verfasser	
Bellinger, Johannes	3/89
Bender, Jens	5/210

Bronstert, Axel	6/262
Bürger, Gerd	6/262
Ebener, Andra	5/210
Eberle, Mailin	5/210
Epple, Thomas	4/156
Friedmann, Arne	4/156
Hack, Jochen	2/46
Hein, Hartmut	5/210
Jacobs, Suzanne R.	6/272
Jensen, Jürgen	5/210
Kluge, Björn	1/5
Lang, Tobias	3/89
Lehmann, Boris	2/46
Mudersbach, Christoph	4/137, 5/210
Nehls, Thomas	1/5
Oestermann, Florian	4/137
Paton, Eva,	1/5
Pfister, Angela	6/262
Rieken, Mareike	5/210
Rufino, Mariana C.	6/272
Sauerwein, Marie	2/46
Schneeberger, Klaus	3/89
Stamm, Moritz	3/89
Vogel, Johannes	1/5
Von Stackelberg, Matthias	3/89
Weeser, Björn	6/272
Wetzel, Karl-Friedrich	4/156

Born, Oliver

Breuer, Lutz

Aktuelles

Nationaler Wasserdialog entwickelt Empfehlungen für die Zukunft des Wassers in Deutschland	1/17
Bonn Water Network ist gestartet	1/17
Bundesumweltministerium erstellt Diskussionspapier zur Moorschutzstrategie	1/18
Der Boden als Retter des Klimas	1/19
Folgen von Gletscherschwund – Untersuchungen eines Gletschersee-Ausbruchs im Himalaya-Gebirge	1/20
Einwirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasser- versorgung im Harzer Stausee	1/20
Maritime sedimentologische Untersuchungen zur glazialen Klimaentwicklung	1/21
Naturbasierte Anwendungsmethoden für Flussland- schaften	1/22
Projekt "MedWater" zur Verminderung von Konflikt- potenzial für Israel und die Palästinensischen Autonomiegebiete	1/23
Neuer Satellit Sentinel-6 beobachtet den globalen Anstieg der Meeresspiegel	1/24
Untersuchungen der Schmelzwasserflüsse aus dem grönländischen Inlandeis	1/25
Studien zur Stabilität des Antarktischen Eisschilds	1/26
Hydrographische Untersuchungen zu den Verände- rungen im Bereich des Nordatlantiks	1/27
Deutsche Meeresforschung etabliert Zukunftsforum Ozean	1/27
Erste Analyse hydrologischer Datensätze der Referenzperiode 1991 bis 2020	1/28
Neuer DFG-Sonderforschungsbereich RESIST – Degradation und Erholung von Fließgewässer- ökosystemen unter multiplen Belastungen	1/28
Permafrostboden in der Arktis taut immer schneller	1/29
Auen im Fichtelgebirge sollen artenreicher werden	1/30
Gefährdung vieler Regionen Europas durch Nitrat- auswaschung aus dem Boden	1/30
Ausbleibende Niederschläge schädigen Bäume und Waldböden	1/31
Baden-Württemberg – Wirksamkeitsnachweis zum Integrierten Rheinprogramm bestätigt	1/32
Bayern – Der Klimawandel erwärmt das Grundwasser in Bayern	1/32
Niedersachsen – 25. Grundwasser-Workshop: Anpassungsstrategien an den Klimawandel	1/33
Rheinland-Pfalz – Engagement für Gewässerschutz weiter verbessert	1/34

Eisalgen verstärken Grönlands Eisschmelze	2/62
Klimakrise lässt Seen schrumpfen	2/63
Globale Niederschlagsveränderungen infolge des Klimawandels	2/64
Grundwasser beeinflusst die Chemie des Ozeans – GEOMAR-Studie korrigiert bisherige Vorstellungen des Transports ins Meer	2/64
Folgen des Klimawandels an der Küste – Forschungs- ergebnisse aus dem BMVI-Expertennetzwerk zum Einfluss des Klimawandels auf Seeschifffahrtstraßen	2/65
Schiffstransporte unter den Bedingungen des Klima- wandels	2/66
Sulfat in Gewässern stellt weiterhin ein Problem dar	2/66
Geplanter Ausbau der Oder gefährdet seltene Lebens- räume und Arten	2/67
Erster Bodenreport des Bundesamts für Naturschutz	2/68
Stress an den deutschen Flüssen: Der Klimawandel setzt Umwelt und Wirtschaft unter Druck	2/69
Neue Untersuchungen zur Wolkenbildung	2/70
Studie zur Situation der Hartholz-Auenwälder	2/70
Zentrum für Klimaresilienz an der Universität Augsburg gegründet	2/71
Baden-Württemberg – Hochwasserschutz und Gewässerökologie gehen Hand in Hand	2/72
Bayern – Welttag der Feuchtgebiete 2021 – Feucht- gebiete und Moore wiedergewinnen für Klima- und Artenschutz	2/72
Berlin – Wasserportal – Gewässerkundliche Mess- daten Berlins	2/73
Necklenburg-Vorpommern – Öffentliche Anhörung zu den Gewässermanagementplänen des Landes	2/73
Niedersachsen – Neu gegründetes Helmholtz-Institut für Funktionelle Marine Biodiversität	2/74
Deutsches Klimavorsorgeportal "KLiVO"	3/102
Extremste Sommer-Trockenperiode der letzten zwei Jahrtausende in Europa	3/102
Untersuchungen zum Rückgang der Schneebedeckung im Alpenraum	3/103
Neue Werkzeuge aus der Forschung machen Wert des Wassers sichtbarer	3/104
Bedeutung der Wasserknappheit für die Energiewende	3/105
Der ökologische Zustand von europäischen Gewässern verschlechtert sich	3/106
Studie belegt Anstieg von Erdrutschen in Hochgebirgs- lagen der Ostalpen	3/107

Gletscher und rätselhafte Steinstreifen im Äthiopischen Hochland	3/107
Stauseen: Die Ressource Wasser einfacher schützen	3/108
Auenzustandsbericht 2021 zeigt Handlungsbedarf bei Flussauen in Deutschland	3/109
Naturnahe Ufer in Ästuaren entwickeln – Gemeinsame Studie der BAW und der BfG	3/111
Mikroplastik in der Elbe	3/111
Die Mikroplastik-Belastung der Ostsee: Neue Ansätze für Monitoring und Reduktionsmaßnahmen	3/112
Schiffsanstriche als Quelle für Mikroplastik bislang unterschätzt	3/113
Ökologischer Zustand der Eckernförder Bucht soll verbessert werden	3/114
Untersuchungen zum Verbleib des Reifenabriebs von Fahrzeugen	3/115
Baden-Württemberg – Wasserentnahmeentgelt bringt Mittel für Hochwasserschutz und Gewässerökologie	3/116
Thüringen – Niedrigwasser und Trockenheit in Thüringen, Neuere Auswertungsergebnisse und aktualisierte Instrumente	3/116
Bundesumweltministerium legt Entwurf einer Nationalen Wasserstrategie vor	4/180
Von Gewittern über Starkregen bis Dürreperioden	4/181
KI-basiertes System warnt vor Starkregen und urbanen Sturzfluten	4/182
Schneller Transport von Schadstoffen ins Trinkwasser	4/183
Projekt BIOEFFEKT der Universität in Koblenz auf der Woche der Umwelt	4/184
Kohlenstoff-Emission von Talsperren bislang deutlich unterschätzt	4/184
Natürliche Ökosysteme nutzen Wasser nur bedingt effizient	4/185
Grundwasserüberwachung mit Erdbebenmessgeräten	4/186
Aufbau eines neuen Nationalen Umweltinformations- zentrums	4/187
Schrumpfende Gletscher verändern die Nährstoff- versorgung des Ozeans	4/187
Geplante Maßnahmen des Nationalen Hochwasser- schutzprogramms sind wirksam	4/188
Mikroplastik beeinflusst globalen Nährstoffkreislauf und Sauerstoffgehalt im Meer	4/189
Präzise Daten für besseren Küstenschutz	4/189
Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensräume in Seen	4/190

Neue Analyse zeigt Risiken der Erderhitzung für Deutschland	4/191
60 Prozent der Flüsse weltweit fallen zeitweise trocken – Tendenz steigend	4/192
Kleingewässer in Agrarlandschaften stark mit Pestiziden belastet	4/193
Wärmeattacken aus dem Meer: Ozean setzt arktischem Meereis zu	4/194
Gewässerschutz: Deutsche haben ökologische Grundwerte, aber wenig Bezug zu Fischen	4/195
Thüringen – Service für das Umsetzen von Dünge- verordnung und Wasserhaushaltsgesetz	4/196
Thüringen – Bessere Hochwasservorsorge und sauberere Gewässer durch neue Verbände	4/196
Nationale Forschungsdateninfrastruktur: TUD nimm1 Schlüsselrolle ein	t 5/223
Meeresströmung im Atlantik nähert sich möglicher- weise kritischer Schwelle	5/223
Forschungszentrum Nachbergbau entwickelt Wassermanagement im Ruhrgebiet weiter	5/224
Zukünftiger Schutz gegen Extremniederschläge: weitere Bebauungsverbote dürfen kein Tabu seir	n 5/225
Grundwasservorkommen vor der Küste Maltas – Forschende entdecken Trinkwasser im Mittelmee	er 5/225
Hochwasser mobilisieren Schadstoffe aus dem Flussbett	5/226
Hochwasserschutz: Die Stadt als Schwamm	5/227
Naturnahe Ufersicherungen an Wasserstraßen	5/227
Gesundheits-Check für Flüsse	5/228
Fließgewässermonitoring: BUND startet gemeinsam mit Wissenschaftlern von UFZ und iDiv ein Citize Science-Projekt	n- 5/228
Fadenalgen sind eine neue Bedrohung für klare Seer weltweit	n 5/229
Neuere Analysen von Wasser- und Sedimentproben zur Untersuchung von Salzwassereinbrüchen in der Ostsee	5/230
Neue Studienerkenntnisse können helfen, Hoch- wasser-Prognosen zu verbessern	5/231
Vermehrte Regenfälle im Sommer verändern den Kohlenstoffkreislauf in der Arktis	5/232
Leuchtturmprojekt BIGFE – Fernerkundungsdaten für die Erfassung der Wasserqualität in Seen und Flüssen	5/233
Studie zur Beeinträchtigung von Flüssen durch geplante Staudämme	5/234

Wasser ist Schlüsselressource für Klimavorsorge	5/234	Fracking kann Oberflächengewässer beeinträchtigen	6/288
Bundeskabinett beschließt 5. Bodenschutzbericht	5/235	Untersuchungen zum Vorkommen von Vibrionen in	
Bayern – Klimawandel erhöht Gefahr von Starkregen	5/235	Seegraswiesen	6/289
Mecklenburg-Vorpommern – Fließgewässer als wichtige Ökosysteme müssen besser geschützt		Freilandstudie zur Lichtempfindlichkeit von Insekten unter Wasser	6/289
werden	5/236	Neues Forschungsprojekt zum Transport von Mikro- organismen im Grundwasser	6/290
Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) – IKSR veröffentlicht Fachberichte zu		Modell zur Simulierung des globalen Wasserangebots	6/290
Okologie und Wasserqualität des Rheins	5/237	Schutz des Meeres mit neuartigen Verfahren der	
Landerubergreifender Raumordnungsplan für den Hochwasserschutz in Kraft getreten	6/284	Künstlichen Intelligenz	6/291
		Bundesregierung stärkt Moorbodenschutz	6/292
der Hochwasserkatastrophe an Ahr und Erft	6/284	Langzeitentwicklung der Belastung durch poly- zyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in	
Flutgebiete an den Klimawandel anpassen	6/285	der Ostsee	6/293
Mit naturbasierten Lösungen zu mehr Hochwasser- schutz	6/286	Brandenburg – Oderaltarm im Nationalpark wird wieder angeschlossen	6/294
Forschung empfiehlt eine nachhaltigere Gewässer- politik	6/287	Mecklenburg-Vorpommern – Moorschutz ist Klima- schutz	6/294
Projektvorhaben zur Renaturierung von Süßwasser- Ökosystemen	6/287	Mecklenburg-Vorpommern – Natura 2000-Gebiete in der Ostsee werden HELCOM-Meeresschutz-	
		gebiete	6/295



Herausgeber BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und der Länder

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Am Mainzer Tor 1 56068 Koblenz

Redaktion: Dr. Thomas Lüllwitz E-Mail: redaktion@hywa-online.de Telefon: 0261/1306-5879

www.hywa-online.de

Erläuterung zur Titelseite

Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Das Zusammenspiel zwischen Niederschlag und Infiltration kann darüber entscheiden, ob es in der Folge von Starkregen zu Infiltrationsüberschuss, Oberflächenabfluss mit Abschwemmung sowie Erosion, wild abfließendem Wasser und im Extremfall zu einer Sturzflut kommt. Selbstverständlich spielen bei der Entstehung von Sturzfluten in den Außengebieten von Siedlungsflächen auch weitere Faktoren eine Rolle, die Infiltration steht aber in jedem Fall am Anfang der Prozesskette. Diese zentrale Rolle des kleinräumig differenzierten und komplexen Prozesses der Infiltration soll durch das Titelbild veranschaulicht werden.

Der zentralen Rolle der Infiltration wird im Modell RoGeR durch ein physikalisch basiertes Infiltrationsmodul Rechnung getragen, welches die Infiltration über die Bodenmatrix, Makroporen und ggf. Trockenrisse berücksichtigt. Dieser Berechnungsansatz wurde auf das großräumige Wasserhaushalts- und Hochwasservorhersagemodell LARSIM übertragen. Für großräumige Modellanwendungen kann der Berechnungsansatz auf der Basis von mittelmaßstäblichen Bodenkarten und der Landnutzung räumlich differenziert parametrisiert werden. Selbstverständlich können die heterogenen Prozesse und realen Fließwege bei der Infiltration, wie sie beispielsweise durch einen Farbtracer sichtbar gemacht werden, mit diesem Ansatz und der pauschalen Parametrisierung nur vereinfacht abgebildet werden. Trotz der für eine großräumige Simulation notwendigen Pauschalierung lieferte die bisherige Validierung des Ansatzes mit RoGeR und LARSIM vielversprechende Ergebnisse. Im besten Fall bildet die verbesserte Abbildung des kleinräumigen Infiltrationsprozesses in großräumigen Modellen somit die Grundlage für zukünftige hydrologisch basierte Vorhersagen zur Warnung vor Sturzfluten.

> Dr. Ingo Haag, Julia Krumm, Dirk Aigner HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe

Prof. Dr. Markus Weiler, Andreas Steinbrich Professur für Hydrologie der Universität Freiburg



Bild oben links: Verschlämmung durch fehlende Bodenstruktur (Quelle: picture alliance);

Bild oben rechts: Von einer konventionell gepflügten Ackerfläche stammender Oberflächenabfluss während eines extremen Niederschlagsereignisses (Quelle: Dr. Olaf Nitzsche);

Bild unten links: Überschwemmter kantonaler Werkhof von Schaffhausen am 2. Mai 2013 (Quelle: Urs Gyseler);

Bild unten rechts: Dernau (Kreis Ahrweiler) als Beispiel einer überfluteten Ortschaft im Ahrtal am 15. Juli 2021 nach heftigem Dauerregen (Quelle: picture alliance/Geisler-Fotopress/Christoph Hardt/Geisler-Fotopress). Kleines Bild Mitte links: Grafische Darstellung des Horton'schen Oberflächenabflusses (Quelle: Autoren).

Kleines Bild Mitte rechts: Boden-Infiltrationsversuch mit Indikatorfarbstoff (Quelle: Soil and water lab, Cornell University).