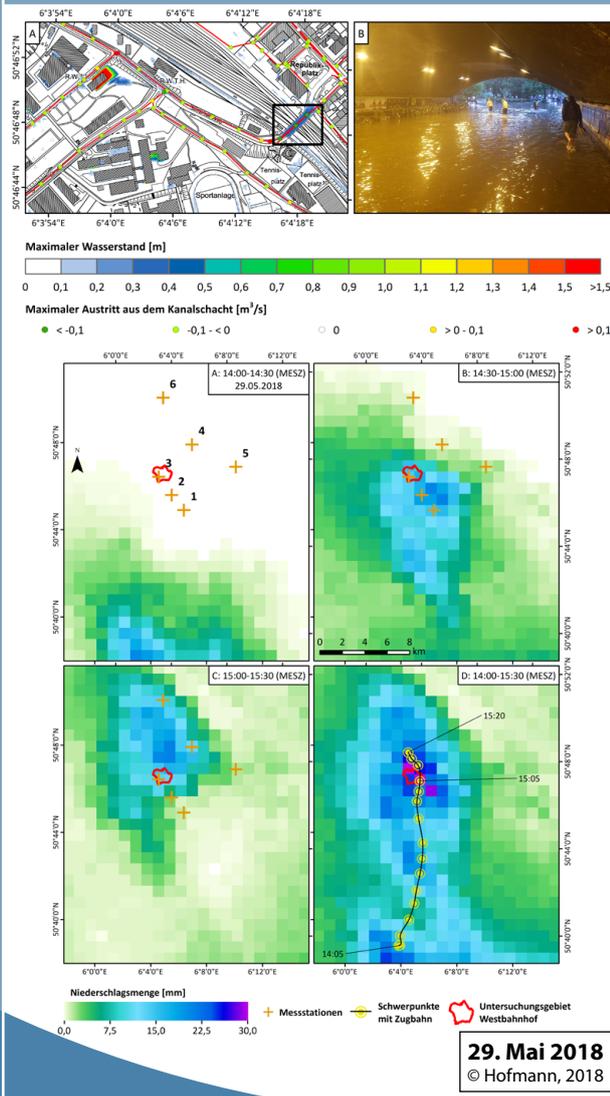




Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management



Fachartikel

Vom Regen bis zur Maßnahme: Analyse und Modellierung eines lokalen Starkregenereignisses zeigen die Chancen interdisziplinärer Forschung im Rainwater Living Lab

Kontinuierliche, räumlich verteilte Langzeitsimulation zur Abschätzung des Hochwasser-risikos für Deutschland

Projektbericht

Extreme Nässe und Hochwasser in Deutschland – Eine hydrologische und meteorologische Betrachtung der Ereignisse von Herbst 2023 bis Fröhsommer 2024

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 und sie im Hinblick auf qualitative, quantitative sowie ökologische Gesichtspunkte betrachten:

- Hydrologische Prozesse und Kreislaufgeschehen von Binnen- und 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: Juni 2024)

Markus Anhalt,
Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Prof. Dr. Axel Bronstert,
Universität Potsdam
Prof. Dr.-Ing. Markus Disse,
Technische Universität München
Stephanie Gudat,
Stadtentwässerung Hannover
Prof. Dr. Bruno Merz,
Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam
Dr. Heike Puhlmann,
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg
Prof. Dr. Britta Schmalz,
Technische Universität Darmstadt
Dr. Natalie Stahl-van Rooijen,
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Dr. Jeanette Völker,
Umweltbundesamt
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
Dr. Jasmin Böhm, Redaktion, Telefon: 0261/1306-5514
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 willigen die Autoren ein, das eingereichte Manuskript nicht unverändert in einer anderen Zeitschrift zu veröffentlichen.

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), Buchhandelbestellung 25 % Rabatt. Kündbar jeweils drei Monate vor Jahresende.

Herausgeber:

BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und der Länder

Satz und Druck:

Druckerei des BMDV, Bonn
ISSN 1439-1783
Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

The journal Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) (Hydrology and Water Resources Management) is a German-language 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 considered from qualitative, quantitative and ecological viewpoints:

- 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, 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: Februar 2024)

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
Prof. Dr. Svenja Fischer,
Universität Wageningen/NL
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. Elisabeth I. Meyer,
Universität Münster
Dr. Volker Mohaupt,
Potsdam (ehem. UBA)
Prof. Dr. Heribert Nacken,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Dr. Enno Nilson,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Angela Pfister,
Emschergerossenschaft
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. Markus Weiler,
Universität Freiburg
Prof. Dr. Rolf Weingartner,
Universität Bern

Inhalt | Contents

Vorwort | Foreword

Analyse und Modellierung lokaler Starkregenereignisse – Forschung im Rainwater Living Lab	200
---	------------

Fachartikel | Scientific reports

DOI: 10.5675/HyWa_2024.4_1 Julian Hofmann, Peter Schleiffer, Niels Döscher, Loisa Welfers, Tim Franke, Roger Häußling, Andreas Witte, Gunnar Ketzler, Michael Leuchner, Thomas Wintgens & Holger Schüttrumpf Vom Regen bis zur Maßnahme: Analyse und Modellierung eines lokalen Starkregenereignisses zeigen die Chancen interdisziplinärer Forschung im Rainwater Living Lab From Rain to Action: A Model-Based Analysis of an Extreme Rainfall Events Revealing Opportunities of Interdisciplinary Research at the Rainwater Living Lab	202
--	------------

DOI: 10.5675/HyWa_2024.4_2 Bruno Merz, Dung Nguyen, Björn Guse, Heidi Kreibich, Nivedita Sairam, Heiko Apel, Mostafa Farrag, Li Han & Sergiy Vorogushyn Kontinuierliche, räumlich verteilte Langzeitsimulation zur Abschätzung des Hochwasserrisikos für Deutschland Continuous, spatially distributed long-term simulation for assessing river flood risk in Germany.	220
---	------------

Hydrologische Notizen | Hydrological notes

Aktuelles Latest news	234
Ausbildung Education	251
Projektberichte – Workshops – Konferenzen Project reports – Workshops – Conferences	
Projektbericht Extreme Nässe und Hochwasser in Deutschland – Eine hydrologische und meteorologische Betrachtung der Ereignisse von Herbst 2023 bis Frühsommer 2024	252

Nachrichten | News

Deutsche Hydrologische Gesellschaft German Hydrological Society	256
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften Association for Hydrological Sciences	257
Neue Publikationen New publications	258
Termine Events	259

Die Fachzeitschrift Hydrologie und Wasserbewirtschaftung ist gelistet im:
Science Citation Index Expanded (SCIE), Journal Citation Reports/Science Edition, Scopus und Geobase.

Analyse und Modellierung lokaler Starkregenereignisse – Forschung im Rainwater Living Lab

Global betrachtet verringert sich die Zahl der Tage im Jahr, an denen in den Nachrichten nicht von hydrologischen Extremereignissen berichtet wird. Drei Jahre nach der verheerenden Flutkatastrophe 2021 im Ahrtal ist nicht nur die Wissenschaft mit der Rekonstruktion der Ereignisse und der Optimierung ihrer Vorhersageinstrumente beschäftigt. Auch Zivilbevölkerung, Politik und Justiz bemühen sich weiterhin um eine Aufarbeitung der Flutkatastrophe und eine Entschädigung der Betroffenen.

Bis zum Juni 2024 sind weltweit mindestens fünf zum Teil extreme Hochwasserereignisse zu verzeichnen. Im Januar und Februar 2024 führten langanhaltende Regenfälle während des Winterhochwassers insbesondere in den mittelgroßen Flüssen wie der Weser und Werra (Niedersachsen), Helme und Wipper, aber auch in der größeren Elbe und Saale (Sachsen-Anhalt bis Thüringen) sowie der schwarzen Elster (Brandenburg) zu Überschwemmungen.

In Russland brach am 5. April des Jahres der überlastete Damm des Irikliniski-Stausees und führte zu Überschwemmungen entlang des Ural, sodass tausende Menschen evakuiert werden mussten. Wenig später im April 2024 erreichten die hydrologische Gemeinschaft Berichte aus dem Perflussdelta im Südosten Chinas: Insbesondere in der wirtschaftsstarke Metropolregion Guangdong sorgten heftige Regenfälle für großflächige Hochwasserlagen. Schäden und Folgen beider Ereignisse werden noch zu bestimmen sein.

Am 2. Mai 2024 traf ein lokales Starkregenereignis mit einer Niederschlagsintensität von ca. 25 bis 35 mm innerhalb einer Stunde die Stadt Aachen und führte zu Überflutungen bekannter neuralgischer Punkte. Extrem ergiebige Dauerregen führten am 17. bis 19. Mai zu Überschwemmungen in vielen Regionen des Saarlandes sowie Teilen von Rheinland-Pfalz mit einem Gesamtschaden von schätzungsweise 200 Mio. €. Zehn Tage später verursachte dann eine Vb-Wetterlage mit Niederschlagsmengen zwischen 200 und 300 mm innerhalb von vier Tagen in weiten Teilen Süddeutschlands ausgedehnte Flusshochwasser an der Donau und weiteren großen Flüssen. Die Folge: Mindestens sechs Tote und ein bisher geschätzter Schaden von etwa 2 Mrd. €. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Zahl hydrologischer Extremereignisse eher zu- als abnimmt.

Langzeitanalysen belegen, dass die sich verändernden Wetterlagen auf den hydrologischen Zustand der Oberflächengewässer und Grundwasserkörper auswirken. So zeigt die jährliche Entwicklung der Durchnässung des hiesigen Oberbodens, dass spätestens seit dem Jahr 2017 immer stärkere Dürreperioden und Niedrigwasser insbesondere in den Sommermonaten auftreten (BOEING et al., 2022). 2023 verzeichnet der Deutsche Wetterdienst (DWD) dann mit einem durchschnittlichen Niederschlag von 958 mm eine schlagartige Umkehr und das sechsnasseste Jahr Deutschlands seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (DWD, 2023).

Mit dem Klimawandel steigt die Wahrscheinlichkeit für hydrologische Trockenphasen sowie die für langanhaltende, mitunter starke Niederschlagsereignisse. Selbst in den klimatisch und hydrologisch privilegierten Regionen Mitteleuropas wird dies

immer spürbarer. Problematisch sind deshalb nicht nur singuläre Ereignisse und ihre Intensität, sondern auch die Interdependenz multipler und dynamisch auftretender Ereignisse. Somit scheint nicht nur die Sorge vor einer steigenden Frequenz hydrologischer Extremereignisse begründet, sondern auch die Befürchtung einer steigenden Intensität und Interdependenz dieser Ereignisse.

Wetterextremereignisse jedweder Form treffen auf anthropogen stark veränderte Umwelten; ob Stadt oder Land, ob urban oder rural, es gibt kaum Flächen, die nicht von Menschenhand verändert wurden. In urbanen Gebieten ereignen sich Wetterextreme zunehmend in dicht besiedelten Regionen, häufig in Flussgebieten oder Tieflagen mit hohem Schadenspotenzial. Stark versiegelte sowie eng bebaute Böden führen zu schnellen Abflussspitzen und hohen Überflutungstiefen, sodass Straßen- und Stadtentwässerungssysteme überlastet werden. In ruralen Räumen sind es bewirtschaftete Flächen, Deiche, Täler und begradigte Flussläufe, die den dynamisch schwankenden Extremen standzuhalten haben.

Wie ist den sich verändernden klimatischen Bedingungen aus wissenschaftlicher Sicht zu begegnen? Eine notwendige Strategie liegt in der Anpassung der Kommunikations- und Informationsinstrumente. Bestehende Hochwassergefahren- und Starkregengefahrenkarten neigen dazu, mögliche Extrema von Ereignissen zu unterschätzen (VOROGUSHYN et al. 2022).

Eine zweite Strategie, so der Vorschlag des ersten Artikels in dieser HyWa-Ausgabe, besteht in einer interdisziplinär gestützten, ganzheitlichen Untersuchung von Starkregenereignissen, um so die Wechselwirkungen und Wirkungsketten zwischen geologisch, meteorologisch, hydrologisch und hydraulisch relevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Interdisziplinär bedeutete in diesem Fall, dass sich der Wasserbau und die Wasserwirtschaft, die Siedlungswasserwirtschaft, die physische Geographie und Klimatologie, das Stadtbauwesen sowie die Soziologie zusammengefunden haben, um gemeinsam ein lokales Starkregenereignis, welches am 29. Mai 2018 in Aachen stattfand, zu untersuchen.

Interdisziplinär war der Forschungsprozess insofern, als dass innerhalb des Living Labs (FRANKE & KAIP, 2021) lokale hydro-numerische (1D-2D) Modelle mit meteorologischen Analyseinstrumenten gekoppelt wurden, um anschließend die potenzielle Integration städtebaulicher und multifunktionaler Maßnahmen im gemeinsamen Modell zu evaluieren und den Verlauf des Forschungsprozesses zu reflektieren. Der Öffentlichkeitsarbeit wurde frühzeitig hohe Priorität eingeräumt, um den Forschungsprozess entlang der lokalen Gegebenheiten auszurichten. Anhand des Starkregenereignisses von 2018 in Aachen wird gezeigt, wie die holistische hydro-metrologische Wirkungskette es ermöglicht, mit gekoppelten Modellsystemen das Starkregenereignis lokal zu rekonstruieren und nachträglich auswirkungsbasiert zu modellieren. Durch die Implikation der Stadt- und Raumplanung konnten konkrete Maßnahmen entwickelt und unmittelbar getestet werden. Als besonders fruchtbar für den interdisziplinären Austausch erwies sich das gemeinsame Arbeiten an und mit einem Modell, das modular erweitert wurde. Zu berücksichtigen

sichtigen ist allerdings, dass der Forschungsprozess in Phasen verläuft. Die simultane Technikgestaltung und -implementierung in praxisrelevanten Anwendungsfeldern – wie es gegenwärtige Ausschreibungen nicht selten einfordern – gestaltet sich als Herausforderung.

Am Beispiel der Stadt Aachen zeigte das jüngste Starkregenereignis am 2. Mai 2024 die hohe Relevanz und Aktualität der angewandten Forschung in der Starkregen-Risikomitigation deutlich: So stand die für diese Ausgabe der HyWa untersuchte Unterführung am Aachener Westbahnhof erneut unter Wasser.

*Dr.-Ing. Julian Hofmann,
Tim Franke M. A. und
Peter Schleifer M. Sc.
RWTH Aachen University*

Literatur

BOEING, F., O. RAKOVEC, R. KUMAR, L. SAMANIEGO, M. SCHRÖN, ...

A. MARX (2022): High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany. – Hydrology and Earth System Sciences, 26, 5137–5161. DOI: 10.5194/hess-26-5137-2022.

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2023): Erwärmungstrend hält an: 2023 mit neuem Rekord und reichlich Niederschlag. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20231229_deutschlandwetter_jahr2023_news.html. Zuletzt abgerufen am 10.06.2024.

FRANKE, T. & E. KAIP (2021): ERS Rainwater Living Lab: Regen als Risiko und die "Crisis Informatics". – Lemm, J. & R. Häußling (Hrsg.): Reallabore als Räume für soziotechnische Innovationen. Shaker, 128–146.

VOROGUSHYN, S., H. APEL, M. KEMTER & A.H. THIEKEN (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 66(5), 244–254. DOI: 10.5675/HyWa_2021.5_2.

Julian Hofmann, Peter Schleiffer, Niels Döscher, Loisa Welfers, Tim Franke, Roger Häußling, Andreas Witte, Gunnar Ketzler, Michael Leuchner, Thomas Wintgens & Holger Schüttrumpf

Vom Regen bis zur Maßnahme: Analyse und Modellierung eines lokalen Starkregenereignisses zeigen die Chancen interdisziplinärer Forschung im Rainwater Living Lab

From Rain to Action: A Model-Based Analysis of an Extreme Rainfall Events Revealing Opportunities of Interdisciplinary Research at the Rainwater Living Lab

Das Thema Starkregen und urbane Sturzfluten gewinnt weltweit zunehmend an Relevanz. Daten europäischer Klimamodelle legen nahe, dass im Zuge des voranschreitenden Klimawandels von einer neuen Gefährdungslage durch extreme Unwetterereignisse auszugehen ist. Die Stadt Aachen war im Jahr 2018 gleich zweimal innerhalb eines Monats (29. April 2018 und 29. Mai 2018) von Starkniederschlägen betroffen und auch die Extremereignisse im Juli 2021 richteten erhebliche Schäden in der Region an. Vor diesem Hintergrund wurde an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen University) das Reallabor "Rainwater Living Lab Aachen" ins Leben gerufen. Ziel war es, durch einen interdisziplinären Ansatz eine ganzheitliche Beschreibung und Analyse von Starkregenereignissen durchzuführen sowie eine nachhaltige Überflutungs- und Schadensvorsorge zu erarbeiten. Zu diesem Zweck wurde in der vorliegenden Studie beispielhaft das Ereignis vom 29. Mai 2018 untersucht. In einem ersten Schritt ist mithilfe von Radardaten eine detaillierte meteorologisch-klimatologische Beschreibung des Ereignisses durchgeführt worden. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Starkregen auf ein lokales Untersuchungsgebiet der Stadt Aachen wurde anschließend ein bidirektional-gekoppeltes Modell aufgebaut, welches die Interaktion zwischen Oberfläche und Kanalnetz detailliert beschreibt und simuliert, wobei sowohl die Radardaten des Ereignisses als auch Modellregen als Input dienen. Aufbauend auf den Ergebnissen des Modells konnten dann Maßnahmen zur oberflächlichen und kanalseitigen Rückhaltung bzw. Umlenkung konzipiert und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Abschließend erfolgte eine Bewertung des vorgestellten Verfahrens hinsichtlich seines Nutzens für die Durchführung von interdisziplinären Living Labs als Forschungsdesign. Die Modellergebnisse zeigen allgemein eine gute Übereinstimmung mit in-situ Beobachtungen und es konnten wirkungsvolle Maßnahmen für die Reduktion der Überschwemmung im Untersuchungsgebiet aufgezeigt werden.

Schlagerwörter: Sturzfluten, Starkniederschlagsereignisse, hydrodynamisch-gekoppelte Modellierung, Niederschlagsbeobachtungen

The topic of heavy rainfall and urban flash floods is becoming increasingly relevant on a global scale. Data from European climate models suggests that in the course of ongoing climate change, an increasing risk due to extreme weather events can be assumed. In 2018, the city of Aachen was affected by heavy precipitation twice within one month (April 29th 2018 and May 29th 2018) and the extreme events in July 2021 also caused considerable damage in the region. With this in mind, the "Rainwater Living Lab Aachen" was implemented at RWTH Aachen University. The aim was to use an interdisciplinary approach to carry out a holistic description and analysis of heavy rainfall events and to develop sustainable flood and damage prevention measures. For this purpose, the event of May 9th 2018, was examined exemplarily in the present study. In a first step, a detailed meteorological-climatological description of the event was carried out based on radar data. To investigate the effects of heavy rainfall on a local study area, a bi-directionally coupled model was then built that describes and simulates the interaction between the surface and the sewer network in detail. Both the radar data of the event and modelled rainfall were used as input. Based on the results of the model, measures for retention or diversion at the surface or in the sewer network could then be designed and tested for their effectiveness. Finally, the presented method was evaluated regarding its usefulness in interdisciplinary living labs as research design. The model results generally show good agreement with in-situ observations. Effective measures for the reduction of flooding in the study area could be identified as well.

Keywords: Pluvial floods, heavy rainfall events, hydrodynamic-coupled modelling, experimental hydrology

1 Einleitung

Starkregenereignisse haben vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zunehmenden Urbanisierung weitreichende sozioökonomische Konsequenzen und stellen auch in Deutschland ein erhebliches Risiko dar (EC, 2016). In den letzten Jahren waren zahlreiche Kommunen in Deutschland durch Starkregen und daraus resultierenden Überflutungen, sogenannte Pluviale Hochwasserereignisse, betroffen. Unwetter wie Stürme und Starkregen verursachten im Jahr 2022 Schäden in Höhe von 4,3 Mrd. € (GDV, 2022). Angesichts der steigenden Frequenz und Intensität solcher Ereignisse ist das Management von Starkre-

genrisiken eine entscheidende kommunale Aufgabe und ein zentraler Aspekt bei der Anpassung an den Klimawandel. Schlüsselstrategien für ein effektives Starkregenrisikomanagement sind differenzierte Risikobewertungen und effektive Vorsorgemaßnahmen, insbesondere durch die Stadtplanung, Verbesserungen beim Überflutungsschutz sowie die Stärkung der Gefahrenabwehr (UBA, 2019).

Hohe Schäden durch Starkregen entstehen oft kleinräumig in urbanen Gebieten, in denen die Vulnerabilitäten bereits grundsätzlich besonders konzentriert sind (BBK, 2015). Verschärft wird diese Vulnerabilität urbaner Gebiete vielfach dadurch, dass

Nutzungsansprüche der Infrastruktur sowohl eine besondere Exposition – infolge versiegelter Oberflächen, tiefliegender Straßenzüge, U-Bahnstationen, Tunnel, Tiefgaragen etc. – als auch eine gesteigerte Sensitivität, z. B. aufgrund wasserempfindlicher Elektronik, gegenüber Überflutungen aufweisen. Gleichzeitig geraten die Funktionen von Straßenräumen in Gefahr, indem Verkehrswege beschädigt und blockiert werden. Intensive Starkniederschlagsereignisse übersteigen schnell die Kapazität der örtlichen Entwässerungssysteme. Fehlende Notwasserwege und Retentionsflächen führen dazu, dass unkontrolliert abfließendes Oberflächenwasser signifikante Schäden an Gebäuden und kritischen Infrastrukturen verursacht. Die Schäden sind vielfältig und umfassen direkte materielle Schäden an Gebäuden und Eigentum, immaterielle Schäden, wie beispielsweise Verletzungen, aber auch indirekte Schäden, wie Umweltschäden durch betroffene Altlasten, Kontaminanten und Gewässerverschmutzungen, oder Unterbrechungen von Transport- und Versorgungsinfrastrukturen.

Die Brisanz extremer Niederschlagsereignisse ergibt sich aus ihrer prognostischen Unsicherheit: Lokale Starkregenereignisse können auch flussferne urbane Hochwasser auslösen. Solche pluvialen Hochwasserereignisse werden von zahlreichen Variablen beeinflusst, die eine rechtzeitige und punktgenaue Vorhersage erschweren. Kleinräumige konvektive Starkregenereignisse, in denen mit mehr als 25 mm Niederschlag pro Stunde zu rechnen ist, sind in der Regel maximal zwei Stunden vor dem Ereignis prognostizierbar (DKKV, 2015; WINTERRATH, 2020). Die Qualität der Wetterwarnungen, welche die Zivilgesellschaft erreichen, hängt außerdem von der Interpretation durch die Nutzen ab.

Aufgrund wesentlicher Unterschiede im Entstehungs- und Wirkungsprozess können die Konzepte des klassischen Flusshochwasserschutzes nicht auf das Starkregenrisikomanagement übertragen werden. Somit sind ganzheitliche Klimaanpassungsstrategien und neue Herangehensweisen bei der Überflutungsvorsorge im urbanen Raum und der Starkregenrisikokommunikation erforderlich (LAWA, 2017). Effektive Maßnahmen zur Starkregen-Überflutungsvorsorge beinhalten, dass Niederschlagswasser nicht nur auf klassischem Wege schadlos abgeleitet, sondern zusätzlich auch zurückgehalten und sinnvoll vor Ort genutzt werden kann. An dieser Stelle bedarf es neuer interdisziplinärer Ansätze, digitaler Techniken und stadtplanerischer Konzepte für eine wasserbewusste Stadtentwicklung. Für die nachhaltige Sensibilisierung relevanter Anspruchsgruppen im Kontext von Starkregenereignissen sollten aktuelle Warnketten sowie Strategien der langfristigen Risikokommunikation überdacht werden.

Vor diesem Hintergrund wurde das Real-labor "Rainwater Living Lab Aachen" ins Leben gerufen. Ziel war es, interdisziplinäre Analyse- und Planungstools für eine ganzheitliche und nachhaltige Überflutungs- und Schadensvorsorge zur erarbeiten. Insbesondere wurde eine "Proof-of-Concept Methode" entwickelt, um eine Wirkungsanalyse verschiedener Maßnahmen zur Reduk-

tion des Starkregen-Überflutungsrisikos, wie beispielsweise eine nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung nach dem Prinzip der Schwammstadt, durchzuführen. Exemplarisch vorgestellt wird das Vorgehen im Rahmen dieser Studien für ein Untersuchungsgebiet im Aachener Stadtgebiet und anhand des Starkregenereignisses, das die Stadt Aachen im Mai 2018 betraf. Kapitel 2 stellt Living Labs als Forschungsdesign vor, das einen lokalen und problemorientierten Fokus als Ausgangspunkt für interdisziplinäre, technologische Innovationsprozesse nimmt. Zur Analyse des Starkregenereignisses vom Mai 2018 stehen zunächst Daten und Methoden der meteorologischen Analyse im Mittelpunkt. Anschließend wird die numerische Entwicklung eines 1D-Kanalnetzmodells, eines 2D-Oberflächenabflussmodells sowie deren Kopplung zur Durchführung einer Hindcast-Analyse dargestellt, bevor potenzielle stadtplanerische Maßnahmen zur Reduktion des Starkregenrisikos diskutiert werden. Kapitel 3 beinhaltet die Ergebnisse der meteorologischen und der modellbasierten hydrologisch-hydraulischen Analysen sowie der Implementierung und Evaluierung der stadtplanerischen Maßnahmen. Abschließend wird das interdisziplinäre Vorgehen im ERS Rainwater Living Lab reflektiert und zentrale Prozesselemente herausgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Living Labs und Reallabore als Forschungsdesign

In Reallaboren oder auch "Realexperimenten" (engl. "regulatory sandbox") werden die Herausforderungen sozial-ökologischer Transformationen und die Adaption an sich verändernde klimatische Bedingungen experimentell bearbeitet (BERGMANN et al., 2021; KOFLE, 2023). Reallabore beschreiben eine Vielzahl heterogener Forschungsdesigns, die sich anhand ihrer Situationsgebundenheit, z. B. Feldbeobachtung vs. Laborexperiment, und ihrer chronologischen Verortung im Forschungsprozess, z. B. wissensgenerierende Livings Labs oder technologische Implementierungen, unterscheiden lassen (SCHNEIDEWIND & SCHECK, 2013). Einer eindeutigen Begriffs- oder Verfahrensdefinition entzieht sich das Konzept bisher (BMW, 2019; FRANKE & KAIP, 2021), dennoch lassen sich einige leitende Prinzipien festhalten, wie Transdisziplinarität, die Orientierung an realweltlichen Problem- und Fragestellungen, partizipative Elemente sowie ein nachhal-

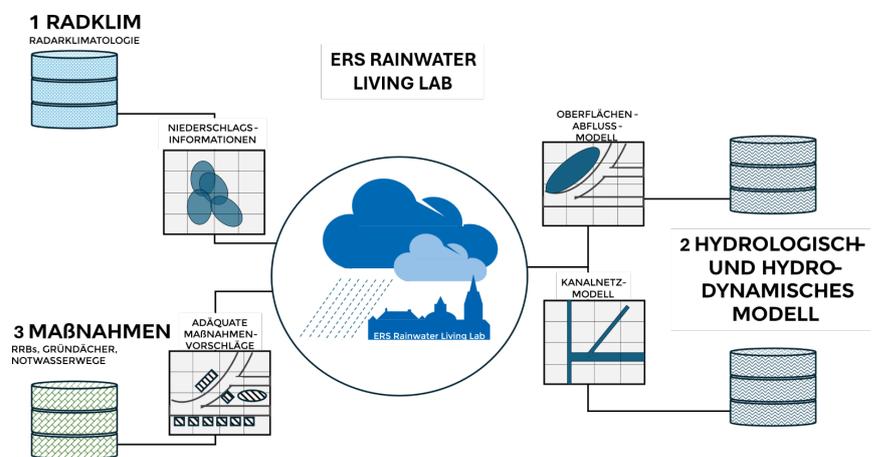


Abbildung 1
Interdisziplinärer Aufbau des ERS Rainwater Living Lab.
Interdisciplinary structure of the ERS Rainwater Living Lab.

tigkeits- und Resilienzsteigerungsfokus (BEERCROFT et al., 2018; HÄUßLING, 2021). Metastudien identifizierten erste Erfolgsfaktoren für die Gestaltung von Reallaboren, wie z. B. aktive Kommunikation oder die Verfügbarkeit von ausreichend finanziellen sowie zeitlichen Ressourcen (BERGMANN et al., 2021). Living Labs stellen eine spezifische Version von Reallaboren dar; einen Testraum für frühe Phasen technologischer und sozialer Innovationen. Im ERS Rainwater Living Lab wurde der Fokus auf die interdisziplinäre Analyse des Starkregenereignisses in Aachen gelegt, dessen Verlauf meteorologisch rekonstruiert, hydrologisch modelliert und anhand dessen präventive Maßnahmen zum Schutz vor urbanen Starkregenereignissen abgeleitet werden sollten.

Das ERS Rainwater Living Lab stellt aus Sicht der Innovationsforschung zunächst die Phase der Invention (HUGHES, 1989) eines soziotechnischen Innovationsprozesses dar: eine sehr frühe Phase des Experimentierens mit vergleichsweise konstanten Randbedingungen, in der die Invention lokaler und technologischer Lösungsansätze in ökonomisch geschützten Nischen als Ausgangspunkt für die transformative Entwicklung urbaner städtischer Nachhaltigkeitsziele herangezogen werden (BULKELY et al., 2017; GEELS, 2019).

2.2 Vorstellung und Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Die Region um die Stadt Aachen liegt am nördlichen Rand der Eifel und umfasst das Dreiländereck Niederlande, Belgien, Deutschland (Abb. 2 A). Geomorphologisch ist Aachen charakterisiert durch eine Kessellage mit zahlreichen von Süden her in die Stadt verlaufenden Bachtälern und einem Abfluss über das nördlich gelegene Gewässer Wurm. Für das Starkregenereignis im Mai 2018 liegt keine detaillierte meteorologisch-klimatologische Einordnung vor, wie sie etwa für Extremwetterereignisse im Juli 2021 erstellt wurden, da es sich um einen konvektiven und kleinräumigen Starkregen handelte, der ausschließlich die Stadt Aachen betraf. In der meteorologischen Analyse wird daher der zeitliche und räumliche Verlauf des Starkregenereignisses

zunächst in einem 22 km x 27 km regionalen Untersuchungsgebiet (Abb. 2 B) um die Stadt Aachen nachvollzogen, bevor die hydrologisch-hydraulischen Analysen auf ein lokales Untersuchungsgebiet im Bereich um den Bahnhof Aachen-West fokussiert werden (Abb. 2 C). Dieser Bahnhof war durch eine Überstausituation im Bereich der Gleisunterführung in besonderer Weise vom Starkregenereignis betroffen (Abb. 7). Zudem ist das Untersuchungsgebiet ein in sich geschlossenes Teileinzugsgebiet, das als Grundlage für die hydrologischen und hydrodynamischen Analysen genutzt wurde. Insbesondere war dies aus numerischen Gründen notwendig, da bi-direktional gekoppelte Simulationsläufe hohe Anforderungen an Rechner-systeme stellen. Eine Abgrenzung des Teileinzugsgebiets war aufgrund seiner topografischen und entwässerungstechnischen Charakteristik gut möglich.

2.2 Vorstellung und Verarbeitung der Niederschlagsdaten

Für die meteorologische Analyse des Ereignisses wurden sowohl geeichte Niederschlagsradar-daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als auch lokale Niederschlags-schreiberdaten herangezogen. Die Radardaten stammen aus dem vom DWD entwickelten Verfahren RADKLIM, bei dem es sich um die Klimaversion des Routineverfahrens RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) handelt (WINTERRATH et al., 2018). Aus der Kombination punktueller Messwerte von Bodenstationen und flächendeckender Informationen von 17 Wetterradaren liefert das Verfahren räumlich und zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsdaten für Deutschland (DWD, 2018a). Für die historischen RADKLIM-Daten, die ab dem Jahr 2001 vorliegen, wurden die Daten des operationellen RADOLAN-Verfahrens mit einer einheitlichen Methode reprozessiert (WINTERRATH et al., 2017). Dadurch sind die Daten aller Zeitpunkte miteinander vergleichbar und es können entsprechend klimatologische Analysen durchgeführt werden. Die Niederschlagsraster des RADKLIM-Datensatzes haben eine räumliche Auflösung von 1 km x 1 km und liegen in Zeitschritten von 1 Stunde (RW) und 5 Minuten (YW) vor. Für die Analyse des Niederschlagsereignisses vom 29. Mai 2018

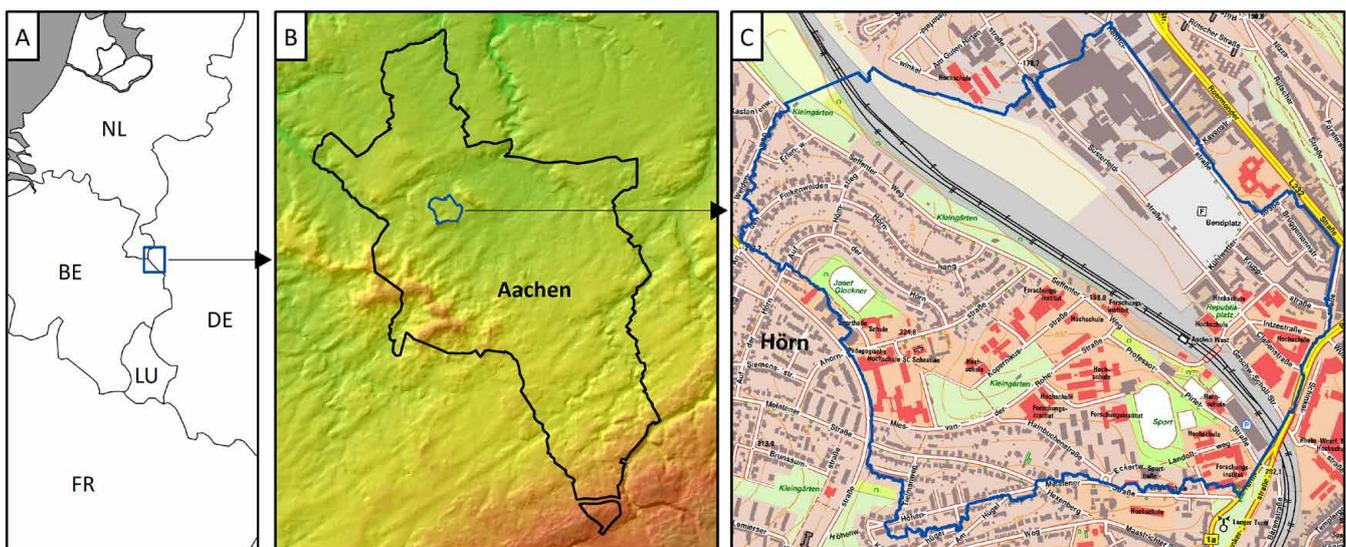


Abbildung 2
 Übersicht der geographischen Lage des Untersuchungsgebiets (blau) (Datenquellen: SANDVIK, 2008; EEA, 2016; STADT AACHEN, 2022; BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 a).
 Overview of the geographical location of the study area (blue).

wurden die 5-minütigen RADKLIM-Daten der Reprozessierungs-version 2017_002 verwendet (DWD, 2018b), da die hohe zeitliche Auflösung eine detaillierte Analyse des Ereignisverlaufs zulässt.

Die zusätzlich verwendeten Niederschlagsdaten von Bodenmessstationen im Raum Aachen wurden mit denen des RADKLIM-Datensatzes verglichen. Es fanden hierfür nur solche Stationen Anwendung, deren Daten nicht schon in die Aneichung des RADKLIM-Verfahrens eingegangen sind. Dies traf auf sechs Stationen zu: 1. Burtscheid, 2. Heizkraftwerk, 3. Aachen-Hörn, 4. Soers, 5. Eilendorf und 6. Horbach. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Daten der Station 3 stammen aus eigenen Messungen (LEUCHNER et al., 2019), wobei dort zum Ereigniszeitpunkt lediglich ein Tropfenzähler verfügbar war und somit nur die Gesamtsumme analysiert wurde. Die Daten der übrigen Stationen wurden vom Wasserverband Eifel-Rur bereitgestellt (WVER, 2020) und beruhen auf Messungen des WVER (Stationen 4 bis 6), des LANUV (Station 1) sowie der Stadtwerke Aachen (Station 2). Bei Station 2 wird der Niederschlag mithilfe des Wägeprinzips erfasst, bei allen anderen Stationen wird mithilfe einer Kippwage bzw. Wippe gemessen.

Die Verarbeitung der Daten erfolgte in der Programmiersprache R, Version 4.3.0., mit dem Geoinformationssystem ArcGIS, Version 10.7.1. Die Niederschlagsraster für den 29. Mai 2018 wurden in einem ersten Schritt auf das regionale Untersuchungsgebiet zugeschnitten und anschließend visuell analysiert, um den relevanten Zeitabschnitt des Starkregenereignisses zu identifizieren. Im Zuge dessen erwiesen sich 18 Zeitschritte von 14:00 bis 15:30 Uhr (MESZ) als relevant für die Analyse. Alle Uhrzeiten werden im Folgenden in der am Tag des Ereignisses in Aachen gültigen mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ = UTC+2) angegeben.

Ziel der nächsten Schritte war es, die räumliche und zeitliche Bewegung des Ereignisses zu erfassen. Zunächst wurde für jedes der 18 5-Minuten Raster der Schwerpunkt des Niederschlags im regionalen Untersuchungsgebiet ermittelt. Um nur die Bereiche mit besonders hohen Niederschlagswerten in die Berechnung miteinzubeziehen, wurde zunächst für jedes der Raster das 85 % Perzentil der Niederschlagswerte ermittelt. Daraufhin war es nötig, alle Zellen mit Werten unterhalb des jeweiligen Perzentils auf NA (Fehlwert) zu setzen. Die so entstandenen Rasterdatensätze wurden anschließend in vektorbasierte Punktdatensätze umgewandelt, wobei in jedem Punkt der Niederschlagswert der entsprechenden Rasterzelle als Attributwert gespeichert wurde. Die Koordinaten des Schwerpunktes (\bar{X}_w , \bar{Y}_w) ergeben sich dann aus den mit dem Niederschlag gewichteten Mittelwerten der x- bzw. y-Punktkoordinaten (x_i , y_i) eines jeweiligen 5-Minuten Zeitschritts nach folgender Formel, wobei w_i die Gewichtung (Niederschlagswert) des Punktes i ist:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Durch die Verknüpfung der einzelnen Schwerpunkte ließ sich nun die Zugbahn des Ereignisses bzw. die Zugrichtung bestimmen.

2.3 Aufbau des numerischen Modells für Strömungs- und Überflutungsprozesse

Zur Modellierung der oberflächlichen und unterirdischen Strömungs- und Überflutungsprozesse für den Untersuchungsbereich um den Aachener Westbahnhof diente ein hydrodynamisches, bidirektional gekoppeltes Niederschlags-Abfluss-Modell. Dazu wurden zunächst ein 1D-Kanalnetzmodell sowie ein 2D-Oberflächenabflussmodell entwickelt und anschließend miteinander verbunden. Die bidirektionale Kopplung der Modelle ermöglicht eine detaillierte Beschreibung der Interaktionsprozesse zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabfluss.

Die Daten, die zur Erstellung des 1D-Kanalnetzmodells im Untersuchungsgebiet notwendig waren, wurden durch die Regionetz GmbH, den lokalen Kanalnetzbetreiber in der Stadt Aachen, bereitgestellt (REGIONETZ, 2020). Die Daten umfassen unter anderem alle relevanten Angaben zur Lage und Geometrie der Haltungen und Schächte, wie beispielsweise Schachtmittelpunkte, Höhenlagen oder Profilformen. Weiter enthalten sie Informationen zum jeweiligen Entwässerungssystem und damit darüber, ob es sich um Schmutz-, Regen- oder Mischwasserkanäle handelt. Ebenfalls enthalten sind Daten zu den Teileinzugsgebieten im Untersuchungsgebiet. Neben deren Geometrie und damit insbesondere deren Größe umfassen die Daten auch Informationen zu den Befestigungsgraden der Teileinzugsgebiete.

Im Anschluss an die Erstellung der Kanalnetzgeometrie wurden im Modell die Teileinzugsgebiete hinterlegt und den Haltungen zugewiesen, in die sie jeweils entwässern. Auf Grundlage der Informationen zur Größe und dem Grad der Befestigung der Teileinzugsgebiete ist das Modell in der Lage, die abflusswirksamen Niederschläge zu berechnen, die dem Kanalnetz von der Oberfläche her zufließen. Die Befestigungsgrade hängen von der Flächennutzung und Beschaffenheit der Teilflächen ab, sodass im Modell für jedes Einzugsgebiet ein individueller Befestigungsgrad hinterlegt ist. Im Untersuchungsgebiet variieren diese zwischen 0 % und 100 %, wobei die hohen Befestigungsgrade von > 80 % im Bereich von Straßen und anderen asphaltierten Flächen vorliegen, wohingegen niedrige Befestigungsgrade < 0 % insbesondere Grün- und Parkflächen zuzuordnen sind. Eine Übersicht über das erstellte Kanalnetzmodell zeigt Abbildung 3 A.

Für eine Beurteilung der Kapazitäten des Kanalnetzes sowie zur Plausibilisierung der Kanalnetzdaten und Funktionsfähigkeit des Modells wurden Simulationen mit verschiedenen Modellregen durchgeführt. Modellregen nach Euler Typ II ermöglichten es, eine möglichst realitätsnahe Darstellung des Niederschlags zu erreichen. Bei ihrer Erstellung wurden Wiederkehrzeiten zwischen 3 Jahren und 100 Jahren gewählt.

Für eine detailliertere Beschreibung der oberflächlichen Abflüsse wurde ein 2D-Modell erstellt (Abb. 3 B). Als primäre Modellgrundlage dienten das digitale Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 1 m x 1 m (DGM1) (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2021) sowie ergänzend Gebäudepolygone und ATKIS-Flächennutzungsdaten der Geobasisdaten NRW (<https://www.opengeo-data.nrw.de/produkte/>). Das numerische Rechengitter wurde zunächst auf Grundlage des DGM1 erstellt, welches anschließend durch zusätzliche abflussrelevante Oberflächenstrukturen, insbesondere Gebäudepolygone, erweitert wurde. Die abschließende Zuweisung von Oberflächenrauheiten erfolgte auf Grundlage

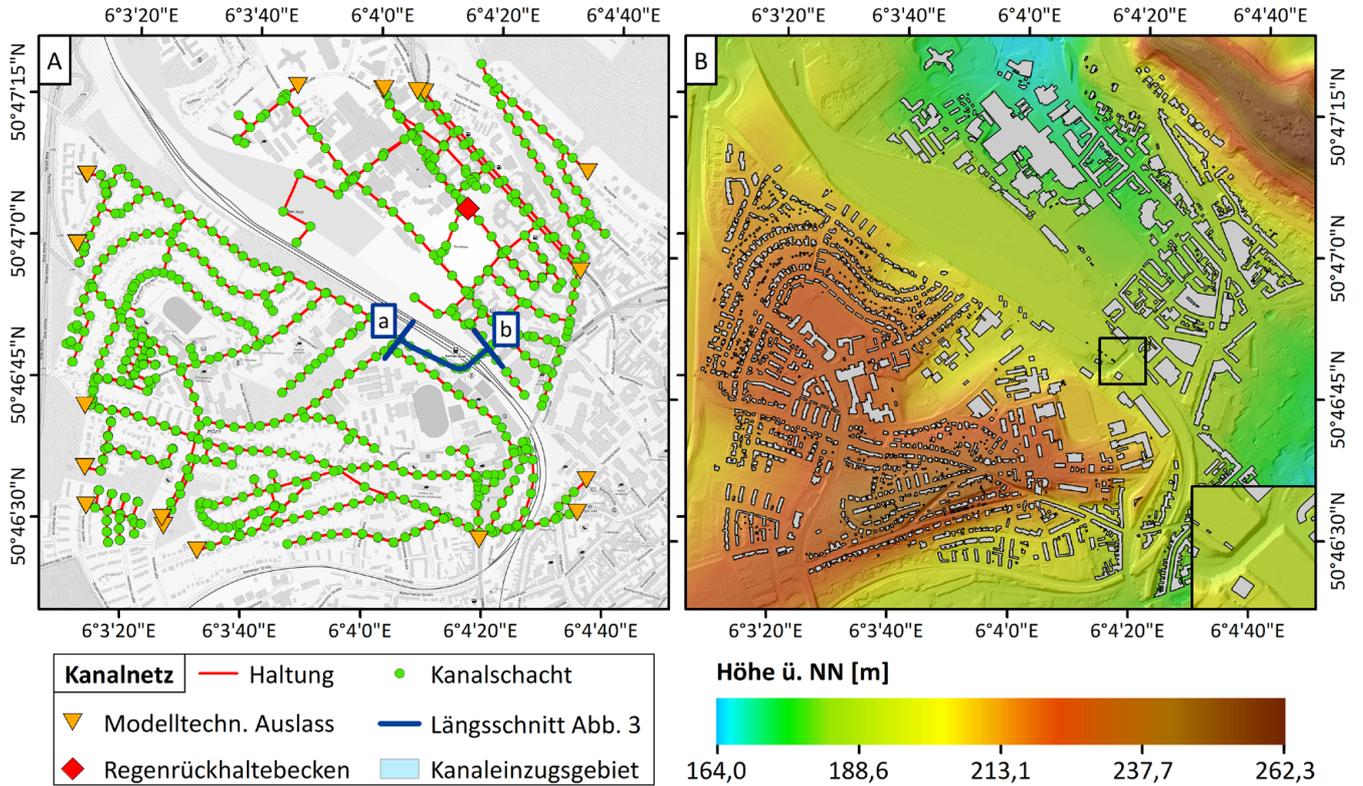


Abbildung 3

(A) Übersicht des 1D-Kanalnetzmodells im Modellgebiet (Datenquellen: REGIONETZ, 2020; BKG, 2022), (B) 2D-Oberflächenabflussmodell mit Darstellung des digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von 1 m x 1 m (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2021).
 (A) Overview of the 1D sewer system model within the model area, (B) 2D surface runoff model with representation of the digital elevation model, with a resolution of 1 m x 1 m).

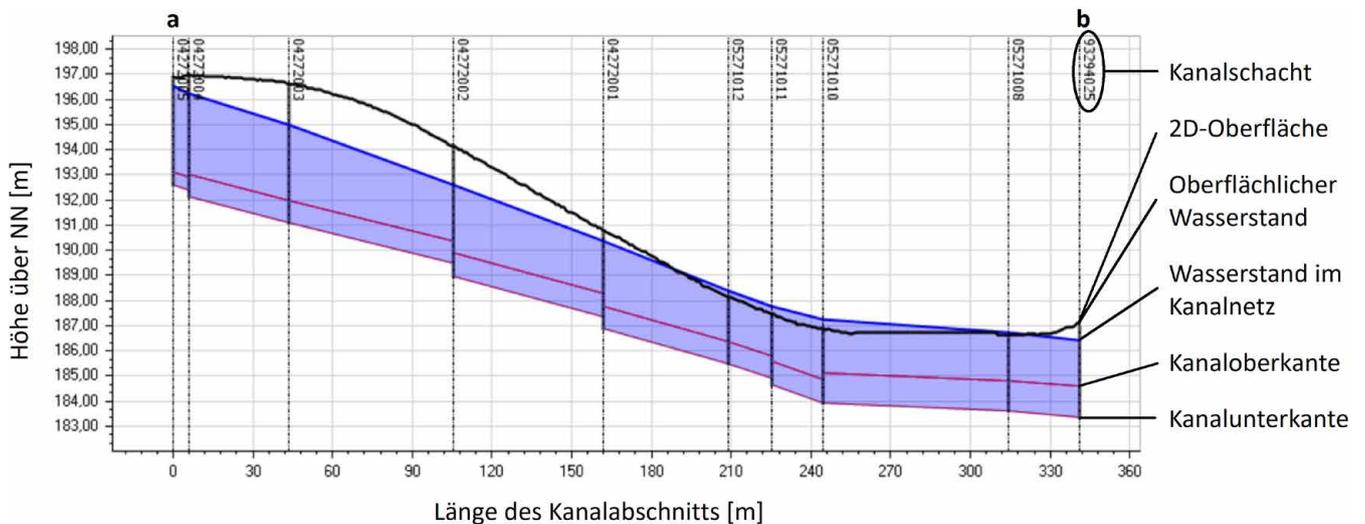


Abbildung 4

Längsschnitt eines gekoppelten 1D-2D-Modells an einer ausgewählten Stelle (Abb. 3 A, a-b).
 Longitudinal section of a coupled 1D-2D model at a selected location (fig. 3 A, a-b).

der ATKIS-Daten zur Flächennutzung. Die Auflösung des Rechen-netzes betrug 1 m x 1 m.

2.4 Kopplung des (1D)-Kanalnetzmodells mit dem (2D)-Oberflächenabflussmodell

Zur vollständigen Abbildung der Interaktionen zwischen Oberflächenabfluss und Kanalisation wurden das 1D-Kanalnetzmodell und das 2D-Oberflächenabflussmodell bidirektional gekoppelt. Das Kopplungsverfahren basiert auf der geografischen Zuordnung von Kanalisationsaus- bzw. -einlässen, wie beispielsweise Schächten, mit der nächstliegenden Zelle des numerische Rechengitters. Dieses Verfahren ermöglicht es, mit dem Modell anschließend sowohl den Wassereintritt als auch -austritt aus der Kanalisation detailliert abzubilden. Abbildung 4 zeigt den Längsschnitt entlang einer Kanalhaltung innerhalb des gekoppelten Bereichs.

Für die bidirektionale Kopplung mit dem Oberflächenabflussmodell wurde das Kanalnetzmodell geringfügig angepasst: Zunächst wurden die den Haltungen zugehörigen Teileinzugsgebiete entfernt. Stattdessen wurden Gebäudedaten importiert, als Einzugsgebiete definiert und den geometrisch nächsten Haltungen zugeordnet. Sowohl das in den jeweiligen Gebäuden anfallende Schmutzwasser wie auch das das abfließende Niederschlagswasser von den Dachflächen der Gebäude können so an das Kanalnetzmodell übergeben und somit in diesem berücksichtigt werden. Auf diese Weise flossen auch Gründächer oder ähnliche Retentionseigenschaften der Gebäude ins Modell ein.

Im Anschluss an diese Anpassungen wurden in dem gekoppelten Modell Niederschlagsinformationen hinterlegt. Die als Einzugsgebiete definierten Gebäudeflächen bekamen dabei jeweils einen zeitlich differenzierten 1D-Niederschlag zugewiesen. Für die restlichen Flächen des Untersuchungsgebiets konnte auf Grundlage der Radardaten ein sowohl zeitlich als auch räumlich differenzierter 2D-Niederschlag hinterlegt werden.

2.5 Erstellung eines drohnenbasierten digitalen Geländemodells

Mit dem Ziel, ein im Vergleich zum digitalen Geländemodell 1 m x 1 m (DGM1) deutlich höher aufgelöstes DGM für das Untersuchungsgebiet zu erstellen, erfolgte eine Drohnenbefliegung mit einer DJI Drone Phantom IV. In Vorbereitung der Befliegung wurde das Untersuchungsgebiet in 20 überlappende Gebiete eingeteilt und der Drohne jeweils die Flugroute der einzelnen Gebiete mit Hilfe der Software Agisoft (Vers. 4.1) vorgegeben, sodass diese die Aufnahmen während der Befliegung vollautomatisch erstellen konnte. Insgesamt wurde die Befliegung über einen Zeitraum von vier Tagen durchgeführt. Geflogen wurde in einer Höhe von 70 m. Die Kamera hatte dabei einen Neigungswinkel von 90 Grad. Die Wetterverhältnisse waren überwiegend sonnig. Auffällig war, dass die Drohne bei zu direkter Sonneneinstrahlung in die Sensoren ihren Flug unterbrach.

Die photogrammetrische Bearbeitung der Aufnahmen erfolgte mit Hilfe der Software Agisoft Metashape (Vers. 4.1). So konnte aus 10.370 Einzelbildern zunächst ein Orthophoto und anschließend ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit einer Auflösung von 7,0 cm/Pixel erstellt werden (Abb. 5). Die Genauigkeit der Höhenwerte lag im Vergleich zu terrestrisch gemessenen Fixpunkten bei ca. 5 cm. Die Entfernung der Vegetation und Objekte erfolgte mit Filtermechanismen und manuellen Korrekturen innerhalb der Software Agisoft.

2.6 Infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion des Starkregenrisikos

Verschiedene Maßnahmen sind einsetzbar, um Niederschlag schadlos abzuleiten, zwischenspeichern oder einen verzögerten Abfluss zu erreichen. Notwasserwege ermöglichen beispielsweise eine kontrollierte schadlose Ableitung von Niederschlagswasser auf Retentionsflächen. Es handelt sich dabei um einfache bautechnische Anpassungen, z. B. Einsatz von Mittelrinnen im V-Profil, die bestenfalls bereits in der Straßenplanung berücksichtigt werden. Allgemein sollten Freiräume

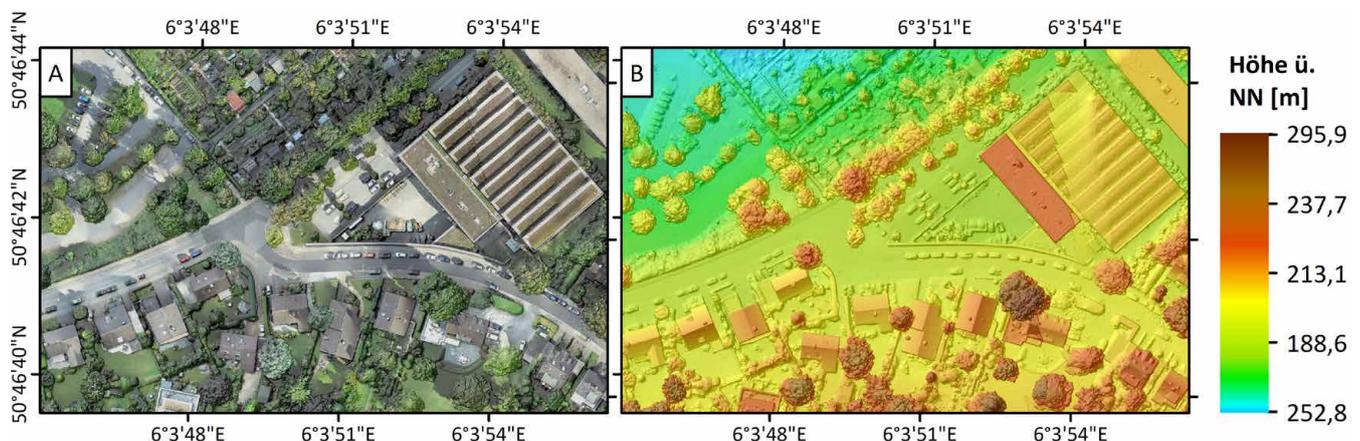


Abbildung 5

(A) 3D-Punktwolke eines Ausschnitts im Untersuchungsgebiet um den Aachener Westbahnhof, (B) Drohnenbasiertes digitales Oberflächenmodell (DOM) aus der 3D-Punktwolke.

(A) 3D point cloud of a part within the study area Aachen Westbahnhof, (B) Drone-based digital surface model (DSM) generated from the 3D point cloud.

und Grünflächen so gestaltet werden, dass ein temporärer Regenrückhalt möglich ist. Hier kann auch oftmals die natürliche Topographie von Nutzen sein. Bei der Planung der Maßnahmen sind vor allem ganzheitliche Ansätze zu empfehlen.

Einen solchen ganzheitlichen Ansatz verfolgen die wassersensible Stadtentwicklung und das Schwammstadtprinzip. Dabei wird auf Maßnahmen gesetzt, die Synergieeffekte aufweisen. Das Schwammstadtprinzip verfolgt das Ziel, Wasser zu speichern und es anschließend durch Verdunstung und gezielte Bewässerung wieder abzugeben. Somit vereint dieses Prinzip Maßnahmen zur Anpassung an die verschiedenen Klimafolgen, wie Starkregen, Hitze und Trockenheit (UBA, 2022). Die genannten Ansätze sollten ebenfalls bei der Straßenraumgestaltung Berücksichtigung finden. Mit entsprechenden Maßnahmen kann so das Niederschlagswasser im Straßenraum zurückgehalten und gleichzeitig eine effektive Hitzevorsorge erzielt werden (z. B. Bewässerung der Pflanzen, Erhöhung der Verdunstungsleistung). Dezentrale Versickerungselemente, beispielsweise in Form von Tiefbeeten, Versickerungsmulden oder wasserdurchlässigen Bodenbelägen, sind Maßnahmen, die nicht nur einen guten Überflutungsschutz bei Starkregen bieten, sondern auch zu einer wassersensiblen Straßenraumgestaltung eingesetzt werden können (BENDEN, 2014; BLUEGREENSTREETS, 2020).

Im baulichen Umfeld können Dachbegrünungen einen Beitrag zum Wasserrückhalt und zeitlich verzögertem Regenwasserabfluss leisten. Diese entlasten nicht nur die Kanalisation und wirken Überschwemmungen entgegen, sondern tragen auch zur Förderung der Biodiversität und der Verdunstungskühlung bei. Die Retentionsleistung der Gründächer ist abhängig von der Mächtigkeit der Substratschichtdecke und der Dachneigung. Mit zunehmender Dachneigung sinkt das Retentionsvermögen. Bei einer Dachneigung von > 15 Grad ist eine Dachbegrünung nicht zu empfehlen (Tab. 1). Je nach Aufbau können Gründächer bis zu 99 % des Jahresniederschlags zurückhalten (BUGG, 2022), während Zisternen das Regenwasser für die Bewässerung der Pflanzen speichern können (BRUNE et al., 2017).

3 Ergebnisse

3.1 Meteorologische Analyse des Starkregenereignisses

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Ablauf des Ereignisses vom 29. Mai 2018 zwischen 14:00 Uhr und 15:30 Uhr in drei Zeitschritten á 30 Minuten (Abb. 6 A–C) sowie als Summe dieser drei Zeitschritte (Abb. 6 D) in seiner flächigen Struktur. Für jeden 30-Minuten Zeitschritt wurde die Summe der 5-Minuten Niederschlagsraster berechnet, die der jeweiligen Zeitspanne zuzuord-

nen sind. Zur Beschreibung des Ereignisses wurden neben dem RADKLIM-Datensatz auch Daten von sechs Bodenstationen ausgewertet, deren Position und Nummerierung aus Abbildung 6 A hervorgeht. Abbildung 6 D zeigt außerdem die Schwerpunkte des Niederschlags im Aachener Stadtgebiet in 5-minütiger zeitlicher Auflösung von 14:05 Uhr, dem Zeitpunkt des ersten registrierten Niederschlags in der Stadt Aachen, bis 15:20 Uhr. Die Zeitangaben geben dabei immer den Beginn der 5-minütigen Messung an.

Das Niederschlagsereignis bewegte sich auf einer Süd-Nord Achse über das Aachener Stadtgebiet hinweg, wobei zwischen 14:30 Uhr und 15:30 Uhr die höchsten Niederschlagswerte (Abb. 6 B: 21 mm; Abb. 6 C: 20,1 mm) sowohl im Allgemeinen als auch im Bereich der Innenstadt und des Untersuchungsgebiets verzeichnet wurden. Das Untersuchungsgebiet lag bezogen auf das Gesamtereignis (Abb. 6 D) im Bereich der höchsten von RADKLIM registrierten Niederschlagsmengen (30,3 mm und 29,9 mm).

Mit Blick auf die Daten der Niederschlagsmessstationen in Tabelle 2 stellt sich die Bewegung des Ereignisses grundsätzlich ähnlich dar. Beim Vergleich der Stationsdaten mit den entsprechenden 30-Minuten-Summen des RADKLIM-Datensatzes der zugehörigen Rasterzelle ergeben sich jedoch teils deutliche Unterschiede: Zwischen 14:30 Uhr und 15:00 Uhr werden an Station 1 und 2 Niederschlagswerte von 47,1 mm und 31,2 mm registriert. Die Werte des RADKLIM-Datensatzes für den gleichen Zeitraum liegen bei 14,9 mm für Station 1 und 18,6 mm für Station 2, was auf eine Unterschätzung der gemessenen Niederschlagsmenge durch das RADKLIM-Verfahren hindeutet. Für den Zeitraum 15:00 Uhr bis 15:30 Uhr, in dem die Niederschlagsintensität allgemein nachließ, verzeichneten die Stationen 4 und 6 etwas niedrigere Niederschlagsmengen als der RADKLIM-Datensatz.

Laut KOSTRA-Datensatz wäre für die Aachener Innenstadt ein Niederschlag von 19,2 mm in 10 Minuten im Wiederkehrintervall 100a zu erwarten gewesen (MALITZ & ERTEL, 2015). An der Station 2 (Heizkraftwerk) wurde eine maximale Intensität von 22,3 mm in 10 Minuten gemessen. Dieser Wert wurde an der Station Aachen-Orsbach in den 12 Jahren ihres Bestehens allerdings bereits einmal leicht übertroffen. Aufgrund der Verlegung der Aachener DWD-Station im Jahr 2011 basiert die Bestimmung der Wiederkehrzeit auf zwei unterschiedlichen Datenreihen und ist somit in dieser zeitlichen Auflösung mit Unsicherheiten behaftet. Trotzdem kann das Ereignis zwar als außergewöhnlich, aber nicht uneingeschränkt als "Jahrhundertereignis" gekennzeichnet werden.

Tabelle 1
Retentionspotenzial Dachbegrünung (Datenquelle: LANUV, 2022).
Retention potential of green roofs.

Art der Dachbegrünung	Dicke der Substratschicht	Retentionsvermögen bei Dachneigung	
		bis 5°	> 5° bis ≤ 15°
Extensives Gründach	10 cm	50 %	40 %
Einfache Intensivbegrünung	20 cm	65 %	50 %
Intensive Dachbegrünung	30 cm	80 %	60 %

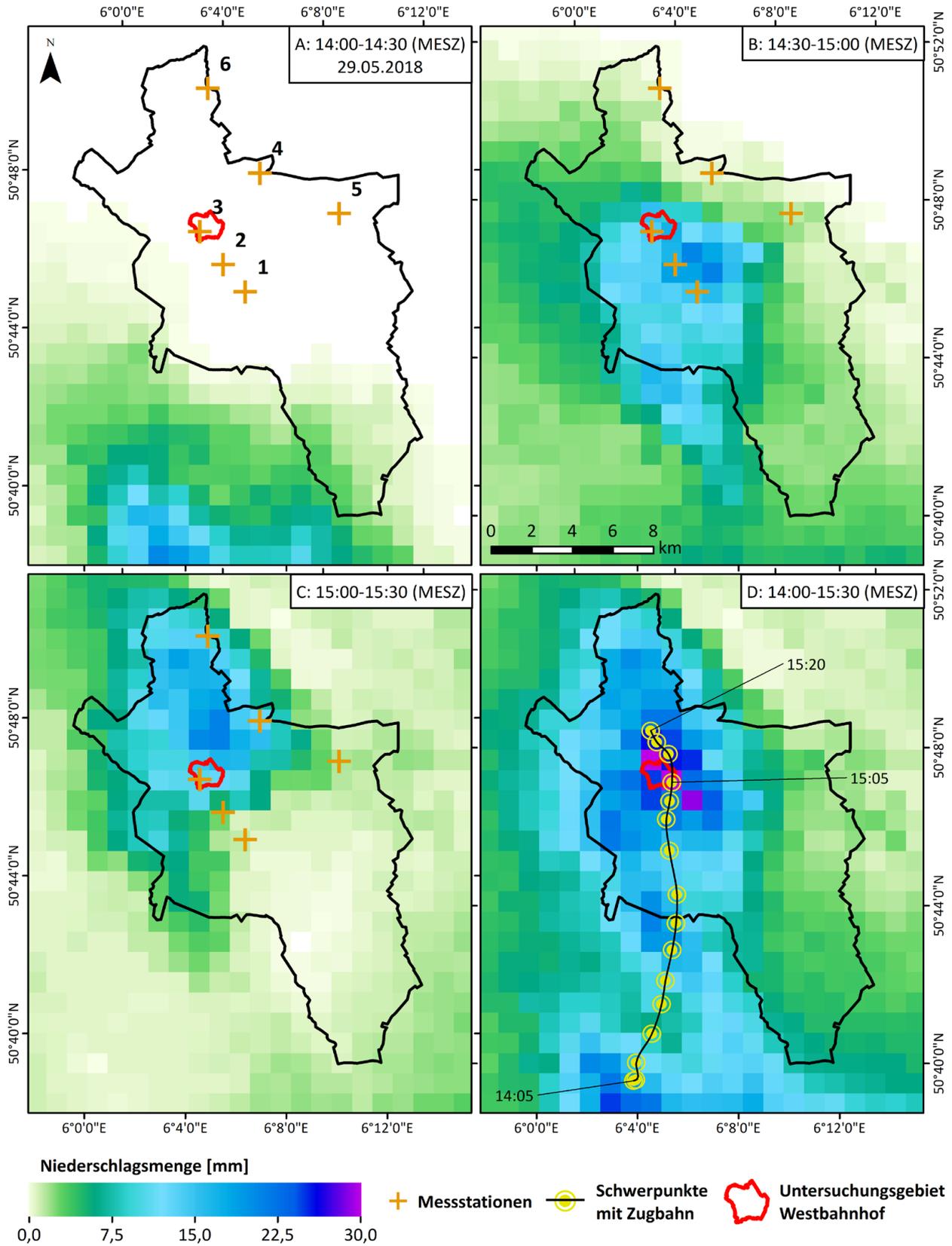


Abbildung 6

Zeitlicher Ablauf des Ereignisses vom 29. Mai 2018 in 30 Minuten Intervallen von 14:00 Uhr bis 15:30 Uhr (MESZ), Gesamtniederschlagssumme dieses Zeitraums und Dynamik der Niederschlagsschwerpunkte im Aachener Stadtgebiet nach RADKLIM (Datenquellen: WINTERRATH et al., 2018; STADT AACHEN, 2022).

Time sequence of the event on the 29th of May 2018 in 30-minute intervals from 14:00 to 15:30 (CEST), total precipitation sum of this period and dynamics of precipitation centroids in the urban area of Aachen according to RADKLIM.

Tabelle 2

Vergleich der Niederschlagsdaten von Messstationen und denen aus RADKLIM.
 Comparison of precipitation data from stations and RADKLIM.

Niederschlagsstationen		1	2	3	4	5	6
Messungen der Stationen	Einsetzen des Niederschlags	14:35	14:40	14:50	14:55	14:55	15:00
	Maximum der Niederschlagsintensität	14:45	14:55	-/-	15:05	15:00	15:15
	Niederschlagssumme (mm/14:00–14:30)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Niederschlagssumme (mm/14:30–15:00)	47,1	31,2	-/-	0,2	0,4	0,0
	Niederschlagssumme (mm/15:00–15:30)	3,1	10,1	-/-	7,9	1,6	10,2
	Ende des Niederschlags	15:55	16:00	-/-	16:10	16:05	16:25
	Niederschlagssumme (mm/Ereignis)	50,4	41,6	40,4	8,5	2,2	10,8
RADKLIM-Zellwerte an Koordinaten der Stationen	Einsetzen des Niederschlags	14:35	14:35	14:35	14:45	14:45	14:55
	Maximum der Niederschlagsintensität	14:50	14:50	14:50	15:05	14:55	15:15
	Niederschlagssumme (mm/14:00–14:30)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Niederschlagssumme (mm/14:30–15:00)	14,9	18,6	13,9	0,7	1,5	0,8
	Niederschlagssumme (mm/15:00–15:30)	1,4	2,8	10,9	12,7	1,7	13,8
	Ende des Niederschlags	15:55	15:55	15:55	16:10	16:20	16:30
	Niederschlagssumme (mm/Ereignis)	17,3	22,7	25,7	14,2	4,2	16,3

Fett: Maximale Niederschlagsintensität/30 min Zeitschritt der jeweiligen Niederschlagsstation bzw. der RADKLIM-Daten am 29. Mai 2018; Niederschlagsstationen: 1: Burtscheid, 2: Heizkraftwerk, 3: Aachen Hörn, 4: Kläranlage Aachen-Soers, 5: Kläranlage Eilendorf, 6: Kläranlage Horbach; Datenquellen: RADKLIM-Daten: WINTERRATH et al., 2018, Niederschlagsstationen: 1, 2, 4–6: WVER 2020, 3: LEUCHNER et al., 2019 (nur Tropfenzähler verfügbar).

Bei der Einordnung des Niederschlagsereignisses in den größeren Gesamtkontext auf Grundlage der RADKLIM-Daten, die inzwischen für die Jahre 2005 bis 2020 – also die Hälfte einer klimatologischen Normalperiode – vorliegen, lassen sich zwei Kernaussagen treffen: Ereignisse mit vergleichbarer oder höherer Niederschlagsintensität treten vor allem während der klimatologischen Sommermonate von Juni bis August auf. Das betrachtete Niederschlagsereignis kann, trotz des Auftretens Ende Mai und damit formal gerade außerhalb dieses Zeitraums, aufgrund der Witterungssituation als ein typisch sommerliches Ereignis betrachtet werden. Es weist außerdem eine Besonderheit in Bezug auf seine Anströmungsrichtung auf. Starkregenereignisse im Raum Aachen sind meist mit westlicher bis südwestlicher Anströmungsrichtung verbunden. Eine südliche Anströmung, die, wie in diesem Fall, parallel zur Entwässerungsrichtung der Hauptabflüsse im Einzugsgebiet verläuft, ist hingegen selten.

3.2 Hydrologisch-Hydraulische Hindcast-Analyse des Starkregenereignisses 29. Mai 2018 in Aachen

Im Nachgang zur Aufbereitung und Analyse der RADKLIM-Daten wurde in einem ersten Schritt auf Grundlage des hydrodynamisch, bidirektional gekoppelten Niederschlags-Abfluss-Modells eine Hindcast-Analyse, das heißt eine Nachrechnung des Ereignisses vom 29. Mai 2018, durchgeführt. Hierzu wurden dem Modell die aufbereiteten RADKLIM-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten als Input übergeben. Dokumentationsdaten in Form von Bildaufnahmen dienen als Validierungsgrundlage für das Modell und den mit diesem erzeugten Simulationsergebnissen.

Die Gegenüberstellung der simulierten Überflutungen hinsichtlich Ausdehnung und Überflutungstiefe weisen dabei grundsätz-

lich eine gute Übereinstimmung mit den In-situ-Beobachtungen auf. Für den Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof ist dies exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt. Die mit dem Modell simulierte Wassertiefe liegt hier bei 0,35 cm, die In-situ-Abschätzung beträgt anhand von zwei knietief im Wasser stehenden erwachsenen männlichen Personen circa 0,40 cm. Kritische Überstauhäute, das heißt Schächte, aus denen Wasser aus der Kanalisation an die Oberfläche dringt, waren insbesondere in Fließrichtung der Kanalisation kurz vor dem Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof zu verorten. Sehr hohe und fehlerhafte Wasserstände an Gebäuden ergaben sich durch eine fehlende Beschreibung der lokalen Drainagesysteme innerhalb des Modells.

In einem zweiten Schritt erfolgte eine Sensitivitäts- und Schwachstellenanalyse des Kanalnetzes, indem verschieden intensive Modellregen (Euler Typ II) auf das Kanalnetzmodell angewendet wurden. Ziel der Analyse war es, Überstaubereiche des Kanalnetzes in Korrelation der Niederschlagsintensität zu lokalisieren und kritische Lastfälle zu identifizieren. Für den besonders überflutungsgefährdeten Bereich unter dem Aachener Westbahnhof zeigte sich, dass es bis zu einer Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses von 10 a zu keinem Überstau, das heißt keinem Austritt von Wasser aus der Kanalisation, kommt. Erst ab einer Auftretenswahrscheinlichkeit des Niederschlagsereignisses von 20 a ist ein Überstau im Bereich unter dem Aachener Westbahnhof zu vermerken.

Tabelle 3 zeigt die weiteren Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Es wird deutlich, dass ein möglicher Retentionsraum im Bereich der Mies-van-der-Rohe-Straße allein nicht ausreicht, um die Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs zu verbessern. Bereits ab einem Volumen von 300 m³ kann durch

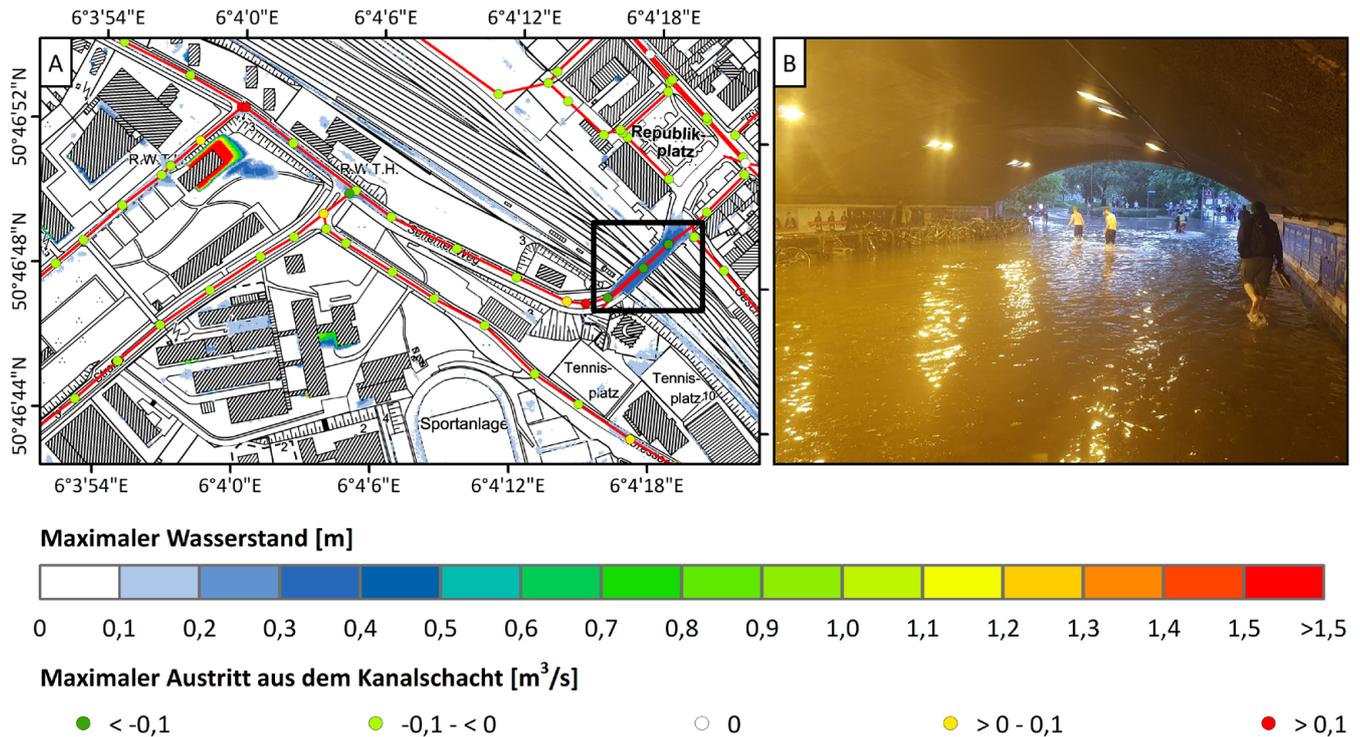


Abbildung 7

(A) Ergebnis der Simulation mit dem hydrodynamisch, bidirektional gekoppelten Niederschlags-Abfluss-Modells für das Niederschlagsereignis am 29. Mai 2018 (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b), (B) Aufnahme des Überflutungereignisses am Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof am 29. Mai 2018 (HOFMANN, 2018).

Result of the simulation with the hydrodynamic, bidirectionally coupled model for the rainfall event on the 29th of May 2018, (B) Image of the flooding event at the low point under the Westbahnhof of the city of Aachen on the 29th of May 2018.

Tabelle 3
 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (+ kein Überstau; - minimaler Überstau; -- Überstau).
 Results of the sensitivity analysis (+ no overflow; - minimal overflow; -- overflow).

T \ V	Mies-van-der-Rohe-Str.				Seffenter Weg				Republikplatz			
	20 a	30 a	50 a	100 a	20 a	30 a	50 a	100 a	20 a	30 a	50 a	100 a
0 m ³	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
300 m ³	+	--	--	--	+	-	--	--	+	-	--	--
600 m ³	+	--	--	--	+	+	-	--	+	+	-	--
1.000 m ³	+	-	--	--	+	+	+	--	+	+	+	--
1.200 m ³	+	-	--	--	+	+	+	-	+	+	+	-
1.400 m ³	+	-	--	--	+	+	+	+	+	+	+	+
1.600 m ³	+	-	--	--	+	+	+	+	+	+	+	+

den Retentionsraum keine Verbesserung mehr erreicht werden. Für den Überstau im Bereich des Aachener Westbahnhofs scheint der über die Mies-van-der-Rohe-Straße zufließende Teil des Kanalnetzes also eine eher eine untergeordnete Rolle zu spielen. Eine größere Bedeutung kann dem zufließenden Wasser über den Strang des Seffenter Wegs zugesprochen werden. Mit zunehmender Schaffung von Retentionsraum für das Abwasser kann die Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs entspannt werden. Auch das Schaffen eines Retentionsraums unter dem Republikplatz kann einen Überstau der Kanali-

sation verhindern. Die kritische Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs kann also sowohl durch eine Drosselung des Zuflusses von oberhalb als auch durch eine Reduzierung des Rückstaus von unterhalb gelöst werden.

3.3 Sensitivitätstests des drohnenbasierten DGM

Im Folgenden wurde eine Sensitivitätsanalyse des drohnenbasierten DGM (Drohnen-DGM) durchgeführt, um dessen Qualität und Einfluss auf die Oberflächenabflusssimulationen zu prüfen. Vorab kann die These aufgestellt werden, dass durch eine

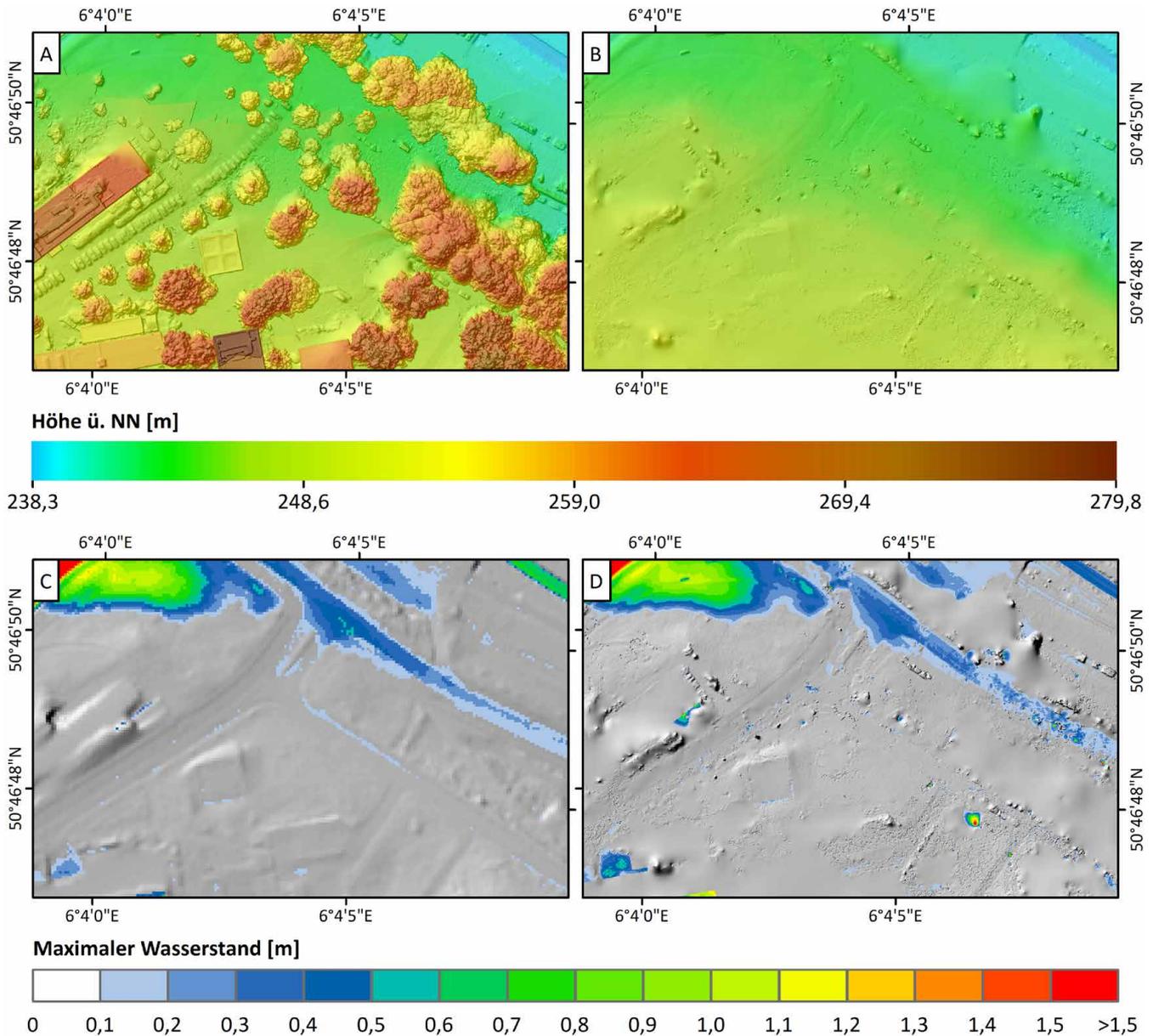


Abbildung 8

A) Drohnenbasiertes digitales Oberflächenmodell (DOM), (B) Prozessiertes drohnenbasiertes digitales Geländemodell (DGM), (C) 2D-Abflusssimulation auf Grundlage des DGM1, (D) 2D-Abflusssimulation auf Grundlage des drohnenbasierten DGM.

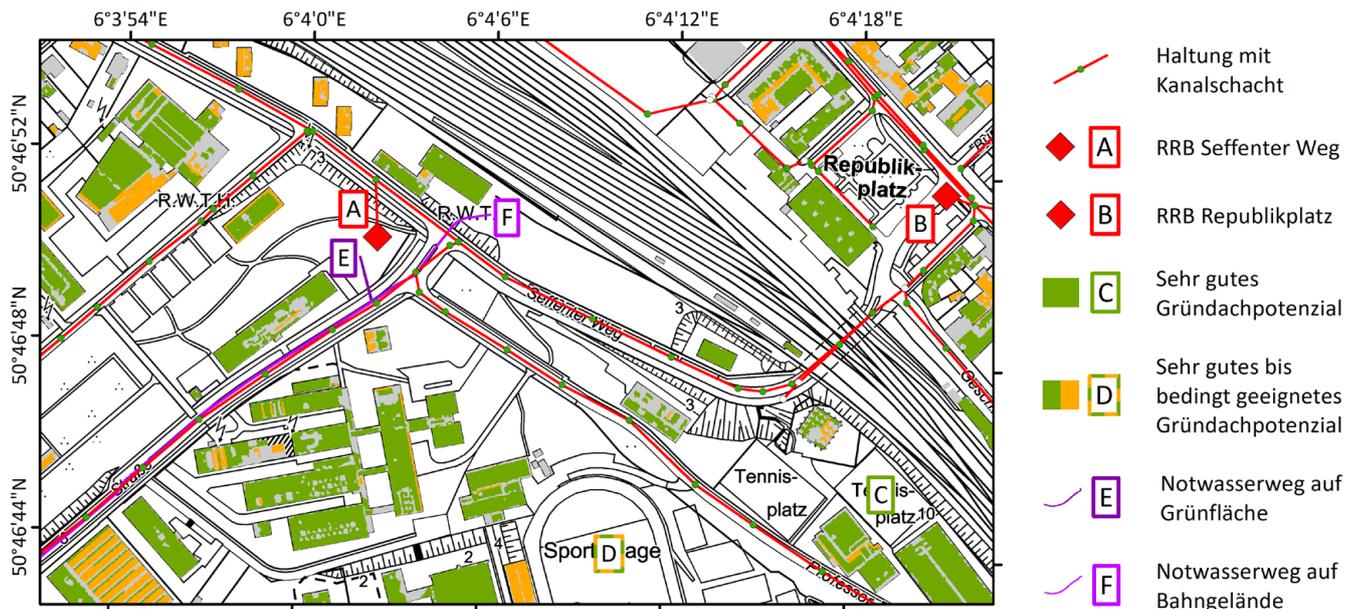
(A) Drone-based digital surface model (DSM), (B) Processed drone-based digital elevation model (DEM), (C) 2D runoff simulation based on the DEM1, (D) 2D runoff simulation based on the drone-based DEM.

höhere Auflösung im Vergleich zum DGM1 ebenfalls die Genauigkeit der Abflusssimulationen anzunehmen ist.

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse musste in einem ersten Schritt das Drohnen-DOM in ein Drohnen-DGM überführt werden, indem die Vegetation sowie temporäre Hindernisse, wie beispielsweise Autos, für 2D-Abflusssimulationen (Abb. 8 A) vom DOM herausgefiltert werden. Dieser Prozessierungsschritt ist erforderlich, da diese Objekte auf der Oberfläche zu unrealistischen Abflussverhältnissen innerhalb der Simulation führen. So würden in einem unbearbeiteten Drohnen-DGM abgebildete Autos oder Bäume inkl. Baumkrone vollständig umflossen. Die

teils automatisch, teils händisch vorgenommene Anpassung bzw. Filterung führte in der Folge zu kleinen Fehlstellen im DGM (Abb. 8 B).

Der Vergleich der Abflusssimulationen zeigt Abbildung 8 (A) Drohnen-DGM ohne Korrektur und (B) das Drohnen-DGM nach der Korrektur. Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb des Drohnen-DGM durch die Filterung entstandenen Senken und Mulden aufgefüllt werden. In der Folge zeigen sich geringfügige Unstimmigkeiten in den Überflutungskarten. Der direkte Vergleich des Drohnen-DGM (Abb. 8 C) mit dem DGM1 (Abb. 8 D) zeigte keine großen Unterschiede zwischen beiden DGMs.

**Abbildung 9**

Entwickelte Maßnahmen im Modellgebiet (A + B: Regenüberlaufbecken (RRB), C + D: Dachbegrünung, E + F: Notwasserwege) (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b).

Developed measures in the model area (A + B: retention basin, C + D: Roof greening, E + F: Emergency waterways).

3.4 Erarbeitung und Analyse möglicher städtebaulicher Maßnahmen

In Folge des Starkregenereignisses am 29. Mai 2018 wurde u. a. die Unterführung des Aachener Westbahnhofs stark überflutet. Vor diesem Hintergrund sind für den Untersuchungsraum Maßnahmen identifiziert worden, die zur Reduzierung des Überflutungsrisikos beitragen. Auf Grundlage des hydrodynamischen Modells konnten die ausgewählten Maßnahmen im Untersuchungsraum getestet werden.

Das Untersuchungsgebiet ist geprägt durch zwei Straßen, die ein relativ großes Gefälle aufweisen: Mies-van-der-Rohe-Straße und Seffenter Weg. Aufgrund der vorliegenden topographischen Gegebenheiten können hier bei einem Starkregenereignis enorme Oberflächenabflüsse entstehen, die Richtung der Unterführung fließen. Entsprechend lag der Schwerpunkt der Untersuchung im Bereich dieser beiden Straßen. Aufgrund der Längsneigung der Straßen sind Maßnahmen wie das Anlegen von Stau- und Rückhalteräumen auf straßenbegleitenden Parkplätzen, Versickerungsmulden oder die Zwischenspeicherung von Regenwasser am Fahrbahnrand ungeeignet bzw. nicht möglich. So wurde im Modell beispielhaft ein Notwasserweg auf der Mies-van-der-Rohe-Straße implementiert, über den die Starkniederschläge kontrolliert in eine angrenzende Grünfläche (Abb. 9, Maßnahme E) bzw. Bahnfläche (Abb. 9, Maßnahme F) abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Simulation konnte überprüft werden, ob ein Notwasserweg die Folgen des Starkregenereignisses minimieren könnte.

Auch das Kanalnetz bietet Möglichkeiten, um Maßnahmen zur Überflutungsvermeidung infolge von Starkniederschlagsereignissen zu implementieren. Durch das Schaffen von Retentionsräumen im Kanalnetz kann das im Fall von Starkniederschlägen anfallende Wasser aufgefangen und verzögert wieder abgege-

ben werden. An welchen Stellen sich solche Retentionsräume umsetzen ließen und wie groß diese sein müssten, um im Bereich des Aachener Westbahnhofs einen Überstau des Kanalnetzes zu verhindern, sollte mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden. Aufbauend auf dieser Analyse wurden zwei Regenrückhaltebecken (RRB) konzipiert. Ein RRB (Seffenter Weg) wurde oberhalb des Aachener Westbahnhofs im Modell implementiert (Abb. 8, Maßnahme A), wobei ein zweites RRB am Republikplatz unterhalb des Aachener Westbahnhofs gesetzt wurde. Ziel war es, den Effekt einer Drosselung des Zuflusses zum gefährdeten Bereich darzustellen. Anhand der Sensitivitätsanalyse konnte das jeweilige Retentionsvolumen der beiden RRB bestimmt werden, welches notwendig ist, um eine Überflutung im Aachener Westbahnhof verhindern zu können. Dabei wurden verschiedene Wiederkehrzeiten des Niederschlags berücksichtigt, bis hin zu einer maximalen Jährlichkeit von 100 Jahren.

Des Weiteren wurden beispielhaft Gründächer in das Modell integriert (Abb. 8, Maßnahme C und D). Als Grundlage dafür diente das digitale Gründachkataster NRW, welches das LANUV bereitstellt. Dieses beinhaltet u. a. Informationen darüber, ob eine Dachfläche potenziell für eine nachträgliche Dachbegrünung geeignet ist. Im Rahmen des Projektes wurde für zwei Substratschichtdecken eine Simulation durchgeführt. Für das Modell wurde ein Bemessungsregen von 47 mm/h (Euler Typ II, 100-jährliches Niederschlagsereignis der Dauerstufe 1 h) angesetzt. Somit war es möglich, zu analysieren, inwiefern eine extensive (10 cm) oder intensive (30 cm) Dachbegrünung die Abflussspitze hätte reduzieren können.

3.5 Modellbasierte Evaluation städtebaulicher Maßnahmen

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgte anschließend die Wirksamkeitsanalyse der vorgestellten Maßnahmen auf Grund-

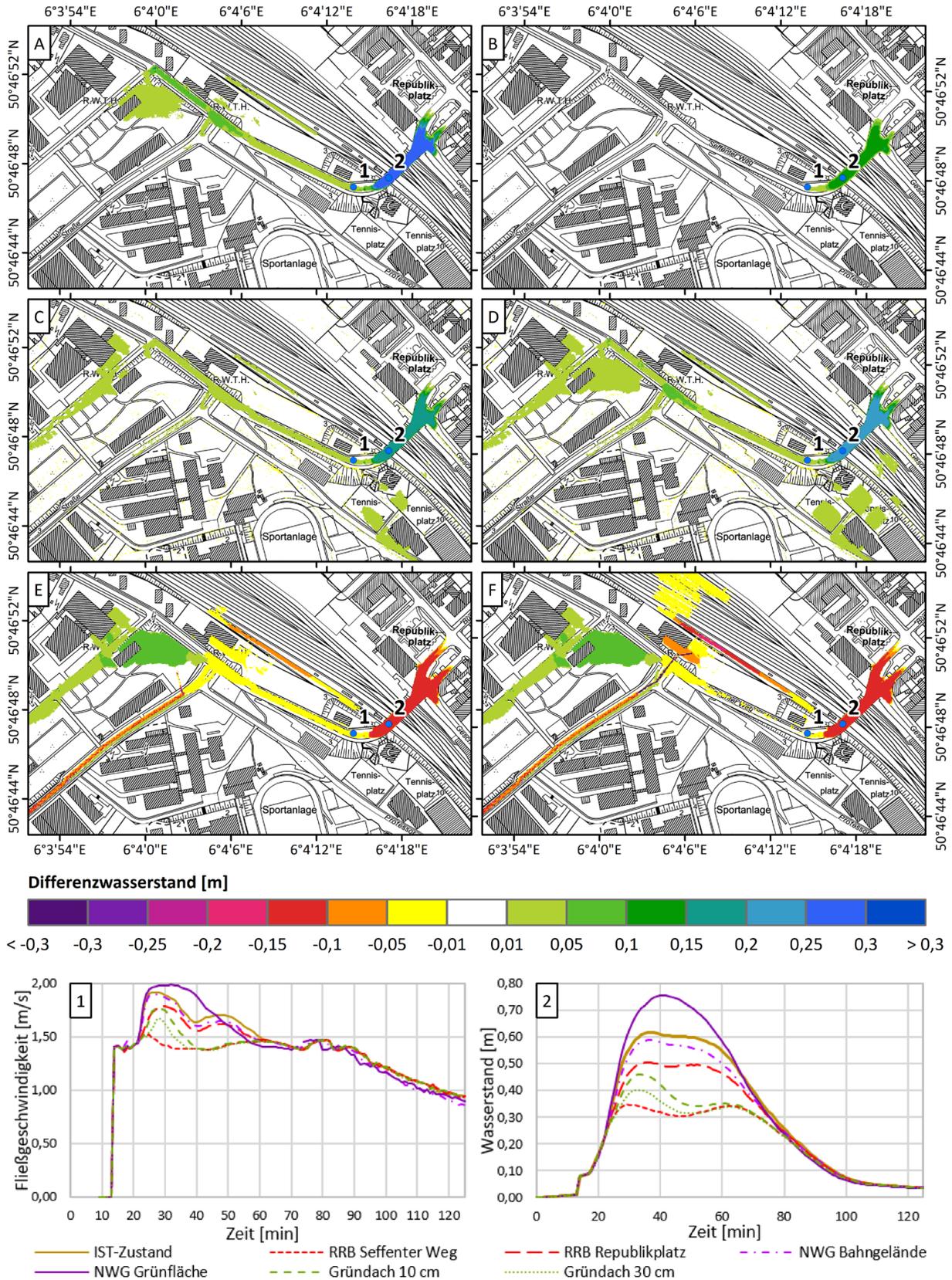


Abbildung 10

Wasserstandsdifferenzen (PLAN – IST) für die Maßnahmen: (A) Regenrückhaltebecken (RRB) Seffenter Weg, (B) RRB Republikplatz, (C) Gründach 10 cm, (D) Gründach 30 cm, (E) Notwasserweg (NWG) Grünfläche, (F) NWG Bahngelände; Messungen an den Beobachtungspunkten 1 und 2 (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b).

Water level differences for the measures: (A) Retention basin Seffenter Weg, (B) Retention basin Republikplatz, (C) Green roof 10 cm, (D) Green roof 30 cm, (E) Flood drainage path Grünfläche, (F) Flood drainage path Bahngelände; measurements at observation points 1 and 2.

lage des gekoppelten Modells. Zwecks Vergleichbarkeit wurde hierzu ein Modellregen $T_N = 100$ a, Typ Euler II mit einer Niederschlagsintensität von 47 mm/h angesetzt. Dies entspricht gemäß KOSTRA-DWD einem 100-jährlichen Starkregenereignis für die Stadt Aachen und zeigt ähnliche eine ähnliche Intensität wie die des Ereignisses am 29. Mai 2018. Abbildung 10 stellt die Ergebnisse der verschiedenen Maßnahmen in Form von Wasserstandsdifferenzen (PLAN-IST) gegenüber. Zur Ermittlung der Differenzen wurden die Wasserstände des Referenzereignisses (Modell ohne Maßnahmen) von den Wasserständen der jeweiligen Maßnahmen (Kap. 2.6) subtrahiert. Zudem wurden ein numerischer Wasserstandsmesser (Abb. 10, Punkt 1 und Punkt 2) in der Unterführung sowie ein Fließgeschwindigkeitsmesser kurz vor der Unterführung implementiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Maßnahme RRB Seffenter Weg (Abb. 10, Maßnahme A) die größte Wirksamkeit aufweist, indem sie größere Überflutungsflächen im umliegenden Bereich reduziert und insbesondere die Überflutungstiefe in der Unterführung um bis zu 30 cm mindert. Neben einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit wirkt sich Maßnahme A ebenfalls reduzierend auf die Überflutungsflächen für die umliegenden Bereiche aus. Im Vergleich führte das RRB Republikplatz (Maßnahme B) lediglich zu einer Reduktion der Überflutungsfläche und -tiefe in der Unterführung und hat aufgrund der topografischen Lage keinen größeren Effekt auf andere Überflutungsbereiche. Ebenfalls als wirksam erwiesen sich die Maßnahmen der Gründächer (Abb. 10, Maßnahme C und D). Nicht bzw. nachteilig wirkte sich die Maßnahme zum oberflächlichen Abfluss "Notwasserweg Bahngelände" (Abb. 10, Maßnahme F) aus. Die Vertiefung im numerischen Modell bewirkte, dass sich das Wasser von angrenzenden Flächen akkumulierte und damit die Überflutungstiefen anstiegen.

3.6 Multi-, Inter- und Transdisziplinarität in Living Labs

Living Labs stellen eine Form von Reallaboren dar, die sich stärker an technologischen, sog. "Open Innovation"-Ansätzen (HOSSAIN et al., 2019; CHESBROUGH, 2003) orientieren. Das urbane Starkregenereignis vom 29. Mai 2018 in Aachen bildet den gemeinsamen Anwendungskontext des Konsortiums und wurde anhand des Westbahnhofs analysiert. Die Forschenden weisen einen lokalen Bezug auf und haben das Ereignis zum Teil miterlebt und in situ-Dokumentation durchgeführt. Der konkrete Bezug schärft den Forschungsfokus, erlaubt den Test bestehender disziplinärer Forschungsmethoden, stärkt die Forschungsmotivation und strukturiert den Forschungsprozess. Die Lokalität des untersuchten Ereignisses ist sowohl charakteristisch für Living Labs als Forschungsdesign als auch erforderlich für die adäquate Modellierung von Starkregenereignissen (ASSMANN, 2023). Zuvor getrennte Analysen werden anhand des lokalen Ereignisses durchgeführt (multidisziplinär) und anschließend in einer Modellierung (interdisziplinär) zusammengeführt. Zwei Aspekte sind für die Konzeption zukünftiger Living Labs relevant:

FRODEMANN et al. (2017) beschreiben, dass sich technologische Lösungen kombiniert mit sozialen Praktiken (ergo: soziotechnische Lösungen) im Zentrum von extremwetterbedingten Katastrophen und der mittel- bis langfristigen Adaption an ebendiese befinden, weshalb die wissenschaftliche Community immer öfter auf interdisziplinäre Ansätze zurückgreift. Von entscheidender Bedeutung für die Zusammenführung von multi- in interdisziplinäre

linäre Forschungssequenzen war es, die Daten in eine Modellierung zu überführen: Die meteorologische Analyse rekonstruiert das kleinräumige Starkregenereignis über Aachen. Die Radarklimatologie (Kap. 2.2) lieferte die Niederschlagsinformationen, die anschließend in ein bidirektional-gekoppeltes Oberflächenabfluss- und Kanalnetzmodell einfließen, zu einer Hindcast- sowie Sensitivitäts-Analyse beitragen und mit Dokumentationsdaten validiert wurden (Kap. 3.2). Als Lösungsansätze wurden dann verschiedene städtebauliche Maßnahmen entlang lokaler Gegebenheiten eruiert (RRBs, Dachbegrünung, Notwasserwege, s. Abb. 9, 10) und in einer Wirksamkeitsanalyse integriert. Die Modellierung wird somit zu einem entscheidenden technologischen "intermediary object" (VINK & PÉREZ-MARTELO, 2023), dass es ermöglicht, Wissen zwischen den Disziplinen zirkulieren zu lassen. Die Relevanz vermittelnder Objekte in der Forschung war in den "Science and Technology Studies" schon früh Thema (LATOURET, 1986). Ihre Bedeutung für die Koordination und Integration speziell interdisziplinärer Ansätze bleibt jedoch eine relevante Forschungsfrage (VINK & PÉREZ-MARTELO, 2023). Neben seinem integrativen Moment wirkt der Fokus auf eine Modellierung gleichzeitig exkludierend: Soziale Prozesse, in denen über den potenziellen Einsatz von Starkregenvorsorge-Technologien entschieden wird, die für die Diffusion der Innovation unerlässlich sind, und, anhand derer sich die Bedingungen der Übernahme individueller Eigenverantwortung erklären ließe, folgen nicht notwendigerweise identifizierbaren Regeln und Mustern, weshalb sie nur bedingt modellierbar sind (AKRICH et al., 2002; OSTROM, 2009).

Der Schwerpunkt des durchgeführten Living Labs lag auf der Entwicklung einer interdisziplinär entwickelten Modellierung, die – anders als bestehende Hochwassergefahren- und Risikokarten – urbane Starkregenereignisse in den Blick nimmt. Da städtebauliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Reduktion des Starkregenrisikos eruiert werden können, bietet das Modell eine konstruktive Erweiterung bestehender Starkregengefahrenkarten und des kommunalen Starkregenrisikomanagements. Aus innovationssoziologischer Perspektive folgt auf die im Living Lab durchgeführte Phase der Invention zunächst die Phase der Entwicklung, in der das Verfahren in einem Prototyp zusammengeführt und sich in verschiedenen Praxistests bewähren muss. In der dritten Phase der Innovation wäre es anschließend das Ziel, nach einer geeigneten Systemarchitektur zu suchen und die technologische Invention durch die Integration verschiedener Akteure in eine sozio-technische Innovation zu überführen (HUGHES, 1989; LAUX, 2021).

Für die Konzeption des Living Labs ist außerdem die Frage nach der Temporalität entscheidend: In der Projektlaufzeit konnte zunächst ein Modell zur interdisziplinären Analyse von lokalen Starkregenereignissen erarbeitet werden. Multi- und Interdisziplinarität waren im Forschungsprozess weniger abgrenzbare methodologische Qualitätskriterien als vielmehr Phasen im Forschungs- und Innovationsprozess, in der disziplinär entwickelte State-of-the-Art-Ansätze multidisziplinär auf ein konkretes Ereignis angewendet und interdisziplinär in einer Modellierung zusammengeführt wurden. Für eine weiterführende transdisziplinäre Phase des Projekts wäre es denkbar, die simulierten Maßnahmen mit Akteuren eines kommunalen Starkregenrisikomanagements zu diskutieren und zu bewerten sowie ggf. die Modellierung um zusätzliche Anpassungen und Maßnahmen zu erweitern. Außerdem könnten Anwohner eingebunden

werden, um neben der kommunalen Fürsorgepflicht auch die Eigenverantwortung zu stärken (ASSMANN, 2023). Schließlich ließe sich das Modell lokal erweitern, sofern dabei seine Granularität gewährleistet bleibt. Bei der Konzeption von Living Labs und Reallaboren gilt es daher zu beachten, dass Multi-, Inter- und Transdisziplinarität nicht nur als methodologische Qualitätskriterien aufgeführt, sondern Schritt für Schritt vollzogen und somit auch zeitlich berücksichtigt werden müssen.

4 Diskussion und Fazit

Vergangene Starkregenereignisse verdeutlichen, dass sich sozio-ökonomischen Risiken nicht auf flussnahe Gebiete beschränken. Um die Gefahren und Risiken für die Bevölkerung sowie die Folgen der Extremwetterereignisse möglichst gering zu halten und darüber hinaus Betroffene zu einer schnellen Reaktion zu befähigen, ist ein entsprechendes Risikobewusstsein unerlässlich. Orts- und ereignisspezifische Analysen, wie sie in dem vorliegenden Beitrag durchgeführt wurden, erlauben eine interdisziplinäre, holistische Betrachtung des Starkregenereignisses, da sie nicht nur das Starkregenereignis und die entstehende Überflutung detailliert beschreiben, sondern auch infrastrukturelle Maßnahmen implizieren und evaluieren.

Die durchgeführte meteorologische Analyse beinhaltete den Vergleich der Radar- und Niederschlagsschreiberdaten des Starkregenereignisses am 29. Mai 2018 in Aachen. Die Gegenüberstellung der RADKLIM-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und davon unabhängiger Bodenstationsdaten in Aachen zeigte eine teils hohe Abweichung der registrierten Niederschlagsmengen, insbesondere bei hohen Niederschlagsintensitäten. Der zeitliche Ablauf hingegen stellt sich in beiden Datensätzen ähnlich dar. Grund für diese Unterschiede könnte sein, dass lediglich zwei DWD-Niederschlagsstationen im Aachener Gebiet für die Aneicherung der Niederschlagsradarprognosen benutzt werden. Insgesamt lassen die Ergebnisse den Rückschluss zu, dass weiterhin enormer Forschungsbedarf in der Verbesserung der radarbasierten Vorhersagen (Komposit) notwendig ist.

Die im Anschluss durchgeführte hydraulische Überflutungsanalyse wurde auf Grundlage des hydrodynamisch gekoppelten Modells durchgeführt. Die Kopplung des 1D-Kanalnetzmodells mit dem 2D-Oberflächenabflussmodell ermöglichte sowohl die effektive Nachrechnung (Hindcast) des Ereignisses am 29. Mai 2018 als auch eine Sensitivitätsanalyse der Entwässerungssysteme. Simulierte Überflutungen konnten auf Grundlage einer Fotoaufnahme validiert werden und zeigen hohe Übereinstimmungen zu den in-situ beobachteten Überflutungen im Bereich des Aachener Westbahnhofs. Für eine umfängliche Validierung wären zeitlich versetzte Aufnahmen des Standorts oder kontinuierliche Wasserstandsmessungen notwendig. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass es ab Starkregenereignissen mit 20-jährlicher Auftretswahrscheinlichkeit (TN 20 a) zu Überflutungen im Bereich des Aachener Westbahnhofs kommen kann. Bei der Schaffung von zusätzlichem Retentionsraum im Kanalnetz am konkreten Anwendungsbeispiel des Aachener Westbahnhofs ist die gezielte Standortauswahl teils wichtiger als die geschaffene Volumengröße.

Aus städtebaulicher Perspektive wurden verschiedene Maßnahmen in die Simulation integriert und evaluiert. Als besonders wirksam erwiesen sich zwei Maßnahmen: Einerseits die

Schaffung eines Retentionsraums am Seffenter Weg und andererseits das Anlegen von Gründächern, die ab einer Substratschichtdicke von 10 cm das Überflutungsrisiko im Bereich des Aachener Westbahnhofs reduzieren können. Aus numerischer Perspektive stellte sich heraus, dass Maßnahmen zur gezielten Überflutungslenkung nur unzureichend im hydro-numerischen Modell abgebildet werden konnten. So kann die Simulation beispielsweise Absenkungen im Gelände oder auch Anpassungen des Straßenprofils aufgrund der horizontalen und vertikalen Auflösung nicht effektiv abbilden. In der Folge schränkte dies die Evaluation dieser Maßnahmen innerhalb dieser Studie ein. Des Weiteren zeigte sich, dass der Aufwand für die Erstellung eines drohnenbasierten DGM mittels Photogrammetrie und einer anschließenden Auswertung der Luftbilder einen sehr hohen Aufwand im Verhältnis zum gewonnen Erkenntnisgewinn bedeutet, wenn 1D-Kanalnetzmodelle mit gekoppelten 2D-Oberflächenabflussmodellen verwendet werden. Der im Beitrag dargestellte Ansatz der modelltechnischen Abbildung städtebaulicher Maßnahmen mittels hydraulischer Simulationen inkl. Plan-Ist-Vergleich zeigt gute Anwendungsmöglichkeiten auf, um die Effektivität der Maßnahmen zu visualisieren und zu bewerten. Ebenso kann er für eine wirksame Kommunikation mit der Öffentlichkeit gut genutzt werden.

Als Living Lab befand sich das Projekt in einer frühen Phase eines soziotechnischen Innovationsprozesses, in der sich die interdisziplinäre Zusammenführung der Forschungsperspektiven in einem Modell als zielführend erwies. Multi-, Inter- und Transdisziplinarität wurden nicht als abgrenzbare Qualitätskriterien, sondern als Phasen im Forschungsprozess herausgestellt. Zukünftige und anschließende Living Labs ließen sich durch räumliche Variationen erweitern sowie um transdisziplinäre Elemente, in welchen das entwickelte Verfahren mit zusätzlichen, nicht-wissenschaftlichen Interessengruppen auf seine Eignung für die kommunale Starkregenvorsorge und Stadtplanung geprüft werden könnte.

Conclusions

Past heavy rainfall events demonstrate that socio-economic risks are not limited to areas close to rivers. To minimize the hazards and risks for the population as well as the consequences of extreme weather events, and to enable those affected to react quickly, appropriate risk awareness is essential. Location- and event-specific analyses, such as those carried out in the present paper, allow an interdisciplinary, holistic view of a heavy rain event, which not only describes the heavy rain event and the resulting flooding in detail but also implies and evaluates infrastructural measures.

The meteorological analysis performed included the comparison of radar and rain gauge data of the heavy rain event on May 29th, 2018, in Aachen. The comparison of the RADKLIM data of the DWD and independent ground station data in Aachen showed a partly high deviation of the registered precipitation amounts, especially at high precipitation intensities. The temporal sequence, however, is similar in both data sets. The reason for these differences could be that only two DWD precipitation stations in the Aachen area are used for the calibration of the precipitation radar forecasts. Overall, the results lead to the conclusion that there is still an enormous need for research in the improvement of radar-based predictions (composite).

The hydraulic flooding analysis carried out was based on the hydrodynamically coupled model. The coupling of the 1D sewer network model with the 2D surface runoff model enabled the effective recalculation (hindcast) of the event on May 29th, 2018 as well as a sensitivity analysis of the drainage systems. Simulated flooding showed very good matches to in-situ observed flooding in the area of Aachen Westbahnhof. The sensitivity analysis showed that flooding in the area of Aachen Westbahnhof can occur from heavy rainfall events with a twenty-year probability of occurrence. When creating additional retention space in the sewer network, site selection is more important than the volume of the newly created retention space.

From an urban planning perspective, various measures were integrated into the simulation and evaluated. Two measures were identified as particularly effective: On the one hand, the creation of a retention area at Seffenter Weg and, on the other hand, the installation of green roofs, which can reduce the risk of flooding in the area of Aachen Westbahnhof from a substrate layer thickness of 10 cm. From a numerical perspective, it turned out that measures for targeted flood control could only be represented inadequately in the hydro-numerical model. For example, subsidence in the terrain or adjustments of the road profile cannot be effectively represented in the simulation due to the horizontal and vertical resolution. This effect limited the evaluation of these measures within this study. Furthermore, it became apparent that the effort for the creation of a drone-based DTM and the subsequent evaluation of the aerial images is disproportionate to the knowledge gained when they are used in 1D channel network models with coupled 2D surface runoff models. The possibilities presented in the article for modeling urban planning measures, including their comparison with differential maps, is a target-oriented method for evaluating the effectiveness of the measures.

Designed as a living lab, the project was in an early phase of a socio-technical innovation process in which the interdisciplinary combination of research perspectives in one modelling approach proved to be beneficial. Multi-, inter- and transdisciplinarity were not emphasized as separable quality criteria, but rather as phases in the research process. Subsequent living labs could be expanded to include spatial variations and transdisciplinary elements, in which the developed procedure would be tested for its suitability for municipal heavy rainfall prevention and urban planning with additional, non-scientific interest groups.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Für die Forschung wurden Daten akquiriert und verwendet, die lizenz- und datenschutzrechtlich geschützt sind. Somit ist die Weitergabe der Daten eingeschränkt und in Teilen untersagt. Die uneingeschränkte Weitergabe sowie Veröffentlichung der Daten sind nicht möglich.

Danksagung

Die Grundlage für den Beitrag bildete die Zusammenarbeit verschiedener Lehrstühle und Institute der RWTH Aachen University. Gefördert wurde die Zusammenarbeit durch den ERS Seed Fund der RWTH Aachen University, dessen Ziel es ist, neue interdisziplinäre Forschungsfelder zu identifizieren. Die Autoren und Autorinnen bedanken sich für die Förderung. Ein weiterer Dank gilt dem Wasserverband Eifel-Rur und dem Landesamt für

Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen für die Bereitstellung einzelner Niederschlagsdaten.

Anschriften der Verfasser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Dr.-Ing. Julian Hofmann
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17, 52074 Aachen
schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de
hofmann@iww.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wintgens
Peter Schleiffer, M. Sc.
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wassergüte-
wirtschaft und Institut für Siedlungswasserwirtschaft
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
wintgens@isa.rwth-aachen.de
schleiffer@isa.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr. Michael Leuchner
Dr.-Ing. Gunnar Ketzler
Niels Döscher, M. Sc.
Lehr- und Forschungsgebiet für
Physische Geographie und Klimatologie
der RWTH Aachen University
Wüllnerstraße 5b, 52062 Aachen
michael.leuchner@geo.rwth-aachen.de
gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de
niels.doescher@geo.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Andreas Witte
Loisa Welfers, M. Sc.
Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
witte@isb.rwth-aachen.de
loisa.welfers@eschweiler.de

Univ.-Prof. Dr. Roger Häußling
Tim Franke, M. A.
Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie
der RWTH Aachen University
Eilfschornsteinstraße 7, 52062 Aachen
rhaeussling@soziologie.rwth-aachen.de
tfranke@soziologie.rwth-aachen.de

Literaturverzeichnis

- AKRICH, M., M. CALLON & B. LATOUR (2002): The key to success in innovation (Part I+ II). – International Journal of Innovation Management, 6 (2), 187-225.
- ASSMANN, A. (2023): Starkregen und Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten – Auswirkungen. – PORTH, M., SCHÜTTRUMPF, H. & OSTERMANN, U. (Hrsg.): Wasser, Energie und Umwelt. Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall III. Springer Vieweg, 123-131.
- BBK BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2015): Die unterschätzten Risiken "Starkregen" und "Sturzfluten". Ein Handbuch für Bürger und Kommunen. Online verfügbar unter: <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/ExterneLinks/DE/Download/starkregen-publikation-kurzlink.html>.

- BENDEN, J. (2014): Möglichkeiten und Grenzen einer Mitbenutzung von Verkehrsflächen zum Überflutungsschutz bei Starkregenereignissen. Berichte des Instituts für Stadtbaugesundheitswesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University. Bericht 57.
- BEECROFT, R., H. TRENKS, R. RHODIUS, C. BENIGHAUS & O. PARODI (2018): Reallabore als Rahmen transformativ und transdisziplinärer Forschung. – DEFILA, R. & DI GIULIO, A. (Hrsg.): Transdisziplinär und transformativ forschen. Eine Methodensammlung. Springer VS, 75-101.
- BMW, BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2019): Freiräume für Innovationen. Das Handbuch für Reallabore. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/handbuch-fuer-reallabore.pdf?__blob=publicationFile; zuletzt geprüft am: 07.02.2024.
- BERGMANN, M., N. SCHÄPKE, O. MARG, F. STELZER, J. LANG, M. BOSSERT et al. (2021): Transdisciplinary sustainability research in real-world labs: Success factors and methods for change. – Sustainability Science, 16, 541-564. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00886-8>.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2021): Digitales Geländemodell – Gitterweite 1 m. Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/hoeihenmodelle/digitale-gelaendemodelle/digitales-gelaendemodell>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2023 a): Digitale Topographische Karte 1 : 10 000 NRW. Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/topographische-karten/aktuelle-topographische-karten/digitale>; zuletzt geprüft am: 30.06.2023.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2023 b): Amtliche Basiskarte (Schwarz-Weiß). Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/liegenschaftskataster/liegenschaftskataster-zentraler-1>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BLUEGREENSTREETS (Hrsg.) (2020): BlueGreenStreets als multicodierte Strategie zur Klimafolgenanpassung – Wissenstand 2020. Statusbericht im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme "Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft" (RES:Z).
- BKG, BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2022): WMS TopPlusOpen. Online verfügbar unter: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/webdienste/topplus-produkte/wms-topplusopen-wms-topplus-open.html>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BBK, BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2023): Ergebnisse der Umfrage zum bundesweiten Warntag 2022. Online verfügbar unter: https://www.bbk.bund.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Warnung-Vorsorge/Umfrageergebnisse-BWT-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6; zuletzt geprüft am: 07.08.2023.
- BRUNE, M., S. BENDER & M. GROTH (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30. Climate Service Center Germany, Hamburg.
- BUGG, BUNDESVERBAND FÜR GEBÄUDEGRÜN E.V. (2022): BuGG-Fachinformation "Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung)". Online verfügbar unter: https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Dachbegrueunung/BuGG_Fachinfo_Positive_Wirkungen_Positionspapier_20-04-2022.pdf; zuletzt geprüft am: 09.01.2023.
- BULKLEY, H., L. COENEN, N. FRANZESKAKI, C. HARTMANN, A. KRONSELL, L. MAI, S. MARVIN, K. McCORMICK, F.V. STEENBERGEN & Y.V. PALGAN (2016): Urban Living Labs: governing urban sustainability transitions. – Current Opinion in Environmental Sustainability, 22, 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.02.003>
- CHESBROUGH, H. (2003): Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology. Harvard Business.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2018a): Datensatzbeschreibung. Aktuelle stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe (GIS-lesbar). Online verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/radolan/recent/asc/BESCHREIBUNG_gridsgermany-hourly-radolan-recent-asc_de.pdf; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2018b): RADKLIM – Erstellung einer radargestützten hochaufgelösten Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderungen des Extremverhaltens von Niederschlag. Beschreibung des Kompositformats und der verschiedenen Reprozessierungsläufe – Version 1.0. Online verfügbar unter: http://141.38.2.22/climate_environment/GPCC/radarklimatologie/Dokumente/RADKLIM-Kompositformat_1.0.pdf; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- EC, EUROPEAN COMMISSION & WGF, WATERGROUP FLOODS (2016): Pluvial Flooding: An EU Overview. Hg. v. European Commission (EC) and Water Group Floods (WGF). Berlin.
- EEA, EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.1. Online verfügbar unter: <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1/view>; zuletzt geprüft am: 30.06.2023.
- FRANKE, T. & E. KAIP (2021): ERS Rainwater Living Lab Aachen – Regen als Risiko und die "Crisis Informatics". – HÄUßLING, R. & LEMM, J. (Hrsg.): Reallabore als Gestaltungsräume für soziotechnische Innovationen. Schriftenreihe empirische Studien zur angewandten Technik- und Organisationssoziologie, Häußling, R. (Hrsg.), Shaker, 128-146.
- FRODEMANN, R., J.T. KLEIN, C. MITCHAM, & N. TUANA (2007): Interdisciplinary Studies in science, technology and society: "New Directions: Science, Humanities, Policy". – Technology in Society, 29, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.01.002>.
- FRP, FLOOD RESILIENCE PORTAL (2022): PERC Ereignisanalyse Hochwasser "Bernd". Zurich Insurance Group. Online verfügbar unter: https://www.drk.de/fileadmin/user_upload/Forschung/aktuelle_Projekte/HW/IFRC_PERC_Ereignisanalyse_Bernd.pdf zuletzt geprüft am: 06.01.2023.
- GDV, GESAMTVERBAND DER VERSICHERER (2022): Naturgefahrenbilanz 2022: Mit 4,3 Milliarden Euro ein durchschnittliches Schadenjahr für Versicherer. Online verfügbar unter: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/naturgefahrenbilanz-2022-mit-4-3-milliarden-euro-ein-durchschnittliches-schadenjahr-fuer-versicherer-116996>; zuletzt geprüft am: 29.06.2023.
- GEELS, F.W. (2019): Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level-Perspective. – Current Opinion in Environmental Sustainability, 39, 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.009>.
- HÄUßLING, R. (2021): Reallabor als soziologische Forschungsmethodik – eine Einordnung. – Ders. & LEMM, J. (Hrsg.): Reallabore als Gestaltungsräume für soziotechnische Innovationen. Schriftenreihe empirische Studien zur angewandten Technik- und Organisationssoziologie, Häußling, R. (Hrsg.), Shaker, 13-46.
- HUGHES, T.P. (1989): The evolution of large technological systems. – BIJKER, W.E., HUGHES, T. P., PINCH, T. (Hrsg.): The social construction of technological systems: New directions in the sociology and history of technology. MIT Press, 51-82.
- HOSSAIN, M., S. LEMINEN & M. WESTERLUND (2019): A systematic review of living lab literature. – Journal of Cleaner Production, 213, 976 – 988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.257>.
- KOFLER, I. (2023): Beyond Disciplinary Constraints: Designing Transdisciplinary Research and Collaboration in Real-World Laboratories. – Societies, 13(9): 205. <https://doi.org/10.3390/soc13090205>.

- LANUV, LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2022): Methodik – Papier zum Handlungsfeld Planung und Bau: Gründachkataster NRW. Online verfügbar unter: https://www.klimaatlas.nrw.de/sites/default/files/2022-11/Methodik_Planung_Bau_GruendachkatasterNRW_0.pdf; zuletzt geprüft am: 09.01.2023.
- LATOURE, B. (1987): *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*. Harvard University Press.
- LAUX, H. (2021): Innovation als Prozess der Netzwerkbildung. – BLÄTTEL-MINK, B., SCHULZ-SCHAEFFER, I. & WINDELER, A. (Hrsg.): *Handbuch Innovationsforschung*. Springer VS, 163-181.
- LAWA (2017): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. LAWA-Kleingruppe "Starkregen", Darmstadt.
- LEUCHNER, M. & G. KETZLER (2019): Monatsberichte 2018; <https://www.klimageo.rwth-aachen.de/cms/klimageo/Das-Lehr-und-Forschungsgebiet/Ausstattung/Wetterstationen/Klimamessstation-Aachen-Hoern/~shdi/Berichte/> zuletzt geprüft am: 21.08.2023.
- MALITZ G. & H. ERTEL (2015): KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- OSTROM, E. (2009): A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. – *Science*, 325, 419-422. DOI:10.1126/science.1172133.
- REGIONETZ (2020): Kanalnetzdaten des Untersuchungsgebiets Westbahnhof Aachen. Persönliche Mitteilung an Julian Hofmann.
- SANDVIK, B. (2008): TM_WORLD_BORDERS-0.1. Online verfügbar unter: http://thematicmapping.org/downloads/world_borders.php; zuletzt geprüft am: 22.03.2021.
- STADT AACHEN, FACHBEREICH GEOINFORMATION UND BODENORDNUNG (2022): Stadtbezirke Stadt Aachen als Shape in ETRS89/UTM. Online verfügbar unter: <https://offenedaten.aachen.de/dataset/stadtbezirksgrenzen/resource/dadb47c2-e367-4c58-afd5-b1eca21618e3>; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- SCHNEIDEWIND, U. & H. SCHECK (2013): Die Stadt als "Reallabor" für Systeminnovation. – RÜCKERT-JOHN, J. (Hrsg.): *Soziale Innovation und Nachhaltigkeit*. Springer VS, 229-249.
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (2022): Forschungskonferenz Klimaresiliente Schwammstadt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/forschungskonferenz-klimaresiliente-schwammstadt>; zuletzt geprüft am: 16.06.2023.
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (2019): Vorsorge gegen Starkregeneignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs.
- VINCK, D. & C. PÉREZ-MARTELO (2023): Circulating Knowledge through Intermediary Objects in Scientific Cooperative Networks. – KEIM, W. & MEDINA, L. R. (Ed.): *Routledge Handbook of Academic Knowledge Circulation*. Routledge International Handbooks, 251-263.
- WVER, WASSERVERBAND EIFEL RUR (2020): Niederschlagsdaten der Stationen Burtscheid, Heizkraftwerk, Soers, Eilendorf und Horbach. Persönliche Mitteilung an Julian Hofmann.
- WINTERRATH, T., C. BRENDEL, M. HAFER, T. JUNGHÄNEL, A. KLAMETH, K. LENGFELD, E. WALAWENDER, E. WEIGL & A. BECKER (2018): Radar climatology (RADKLIM) version 2017.002. Gridded precipitation data for Germany (quasi gauge-adjusted five-minute precipitation rate). Online verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/help/landing_pages/doi_landingpage_RADKLIM_RW_V2017.002-en.html; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- WINTERRATH, T., C. BRENDEL, M. HAFER, T. JUNGHÄNEL, E. WALAWENDER, E. WEIGL & A. BECKER (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- WINTERRATH, T. (2020): RADVOR (Radarbasierte Niederschlagsvorhersage im Kurzfristzeitraum). Ein Verfahren aus dem Projekt "RADVOR-OP" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst (DWD).

Bruno Merz, Dung Nguyen, Björn Guse, Heidi Kreibich, Nivedita Sairam, Heiko Apel, Mostafa Farrag, Li Han & Sergiy Vorogushyn

Kontinuierliche, räumlich verteilte Langzeitsimulation zur Abschätzung des Hochwasserrisikos für Deutschland

Continuous, spatially distributed long-term simulation for assessing river flood risk in Germany

Risikoabschätzungen sind eine wichtige Grundlage für das Management von Hochwasserrisiken und für Klimaanpassungsstrategien. Für größere Regionen basieren diese Abschätzungen typischerweise auf kleinräumigen Modellierungen, die zu einem großräumigen Bild zusammengesetzt werden. Dieses Vorgehen vernachlässigt raum-zeitliche Interaktionen und liefert keine realistischen Aussagen für das Gesamtrisiko größerer Regionen. Dieser Beitrag stellt als alternativen Ansatz die "abgeleitete Hochwasser-Risiko-Analyse basierend auf Langzeitsimulationen" und ihre Implementierung für Deutschland vor. Eine Modellkette, bestehend aus flächendetaillierten hydrologischen, hydraulischen und Schadens-Modellen, simuliert das Auftreten von extremen Abflüssen sowie resultierende Überflutungsflächen und Schäden. Diese Modellkette wird durch einen Wettergenerator angetrieben, der räumlich konsistente Felder von Klimavariablen liefert. Die Generierung von sehr langen, mehrere tausend Jahre umfassenden Zeitreihen erlaubt die Abschätzung von extremen Abflüssen und den entsprechenden Schäden. Die Berücksichtigung der raum-zeitlichen Bezüge in allen Modellkomponenten, vom Wettergenerator bis zum Schadensmodell, ist in der Lage, konsistente großräumige Risikoaussagen bereitzustellen. Für die berücksichtigten Flussabschnitte, d. h. die größeren Flüsse und Nebenflüsse in Deutschland, ergibt sich eine jährliche Schadenserwartung von ca. 580 Mio. Euro für die Sektoren Privathaushalte und Gewerbe/Industrie. Dieser Ansatz erlaubt es auch, plausible Extremszenarien zu entwickeln, die das Risikomanagement vor neue Herausforderungen stellen.

Schlagerwörter: Hochwasser, Flussüberschwemmung, Risikoabschätzung, Langzeitsimulation, Modellkette

Flood risk assessments are an important basis for risk management. For larger regions, these assessments are typically based on small-scale modelling and are subsequently compiled into a large-scale picture. However, this approach neglects space-time interactions and does not provide realistic risk statements for larger regions. This paper presents the "derived flood risk analysis based on long-term simulation" and its implementation for Germany as an alternative approach. A model chain consisting of spatially distributed hydrological, hydraulic, and damage models simulates the occurrence of extreme runoff, inundation, and direct economic damages. This model chain is driven by a weather generator that provides spatially consistent fields of climate variables. The generation of very long time series, spanning several thousand years with daily resolution, allows the estimation of extreme runoff and the corresponding damages. The inclusion of space-time dependencies in all model components, from the weather generator to the damage model, is able to provide consistent large-scale risk statements. For the considered river floodplains, i.e. large rivers and tributaries in Germany, we estimate the Expected Annual Damage to be around € 580 million for the economic sectors private households and commerce. This approach also allows the development of plausible extreme scenarios posing new challenges for flood risk management.

Keywords: Floods, river inundation, risk assessment, long-term simulation, model chain

1 Einleitung

Abschätzungen des Hochwasserrisikos werden nicht nur auf der lokalen Skala durchgeführt, z. B. zur Dimensionierung eines Hochwasserschutzbauwerks, sondern sind auch für größere Gebiete erforderlich. Beispiele sind großräumige Risikoabschätzungen im Versicherungssektor oder als Grundlage für nationale Strategien zur Klimaanpassung. Häufig werden großräumige Risikoanalysen aus lokalen Betrachtungen zusammengesetzt, indem mittels Extremwertstatistik an vielen Flussabschnitten Hochwasserabflüsse bestimmter Wiederkehrintervalle berechnet und mittels hydraulischer Modelle und Schadensmodelle in Überflutungsflächen und Schäden transferiert werden (WING et al., 2018; BUBECK et al., 2019). Wenn diese lokalen Aussagen zu einem großräumigen Bild aggregiert werden, ergeben sich unrealistische Szenarien, da die räumlichen Korrelationen nicht berücksichtigt sind. Die Fehler können erheblich sein: Beispielsweise überschätzt die Berechnung des Schadens für das 200-jährliche Hochwasser aus lokalen 200-jährlichen Werten den tatsächlichen

Schaden um 139 %, 188 % und 246 % für UK, Deutschland und Europa (NGUYEN et al., 2020).

Statistische Ansätze, die die räumliche Korrelation zwischen Hochwasserabflüssen an verschiedenen Pegeln berücksichtigen (LAMB et al., 2010; KEEF et al., 2013), entschärfen dieses Problem teilweise. Sie beziehen allerdings keine Interaktionen ein, wie sie bei Deichbrüchen auftreten, wenn oberstrom Deichbrüche die Hochwasserwahrscheinlichkeit unterstrom verändern (APEL et al., 2009; DE BRUIJN et al., 2014). Des Weiteren können diese Ansätze zeitliche Abhängigkeiten nicht explizit berücksichtigen. Beispiele für solche Abhängigkeiten sind die Vorbedingungen im Einzugsgebiet oder die Überlagerung von Hochwasserwellen aus Hauptfluss und Nebenfluss, die erheblichen Einfluss auf den Hochwasserscheitel haben (MIRZA, 2002; SCHRÖTER et al., 2015; GUSE et al., 2020).

Um diese Nachteile zu vermeiden, haben FALTER et al. (2015) die "abgeleitete Hochwasser-Risiko-Analyse basierend auf Langzeit-

simulation" (DFRA; Derived Flood **R**isk Analysis based on long-term simulation) entwickelt. Diese Methode ist eine Erweiterung der "abgeleiteten Hochwasser-**H**äufigkeits-Analyse basierend auf Langzeitsimulation" (DFFA; Derived Flood **F**requency Analysis based on long-term simulation; CAMERON et al., 1999; HABERLANDT & RADTKE, 2014; GRIMALDI et al., 2021). DFFA koppelt einen multi-Standort Wettergenerator mit einem räumlich verteilten hydrologischen Modell, so dass sehr lange Abflusszeitreihen an verschiedenen Lokationen unter Berücksichtigung der räumlichen Korrelationen generiert werden können. Aus diesen Zeitreihen ist es dann möglich, Hochwasserhäufigkeiten und -quantile zu berechnen. Die Entwicklung von FALTER et al. (2015) besteht darin, die DFFA-Modellkette mit einem Modell für Wellenablauf und Überflutung sowie einem Schadensmodell zu erweitern. Dies ermöglicht es, räumlich heterogene, plausible Hochwasserszenarien zu generieren und großräumige Risikoausagen zu erhalten.

Dieser Artikel beschreibt die Umsetzung des DFRA-Ansatzes für Flusshochwasser in Deutschland. Hierzu wurde eine Modellkette, vom Wettergenerator bis zum Schadensmodell, für alle großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland implementiert. Diese Studie zeigt auf, welche Aussagen zum Risiko oder zu Extremszenarien mit einem solchen Ansatz möglich werden.

2 Modellkette

Die am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungs-Zentrum (GFZ) entwickelte Modellkette RFM (Regional Flood

Model) besteht aus vier Modulen (Abb. 1). Die Modellkette ist nicht statisch, sondern innerhalb eines Moduls können Modelle ausgetauscht werden. Die Module können auch einzeln oder als verkürzte Modellkette genutzt werden. Beispielsweise ist es möglich, die verkürzte Modellkette "Niederschlag-Abfluss-Modell bis Schadensmodell" mit beobachteten meteorologischen Daten oder mit Output von Klimamodellen anzutreiben.

Diese Modellkette stellt für beliebige Lokationen im Untersuchungsgebiet sehr lange Zeitreihen von Hochwassereigenschaften, wie z. B. Hochwasserabfluss, Überflutungsflächen oder Schaden, zur Verfügung. Diese Zeitreihen berücksichtigen die raum-zeitlichen Korrelationen; beispielsweise wird bei einer Überströmung von Deichen der Effekt auf den Hochwasserscheitel unterstrom erfasst. Aus diesen Zeitreihen lassen sich Aussagen zur Gefährdung und zum Risiko durch Flusshochwasser für beliebige Raumeinheiten ableiten. Darüber hinaus können auch einzelne Ereignisse analysiert und für das Risikomanagement bereitgestellt werden.

2.1 Wettergenerator RWG (Regional Weather Generator)

Der Wettergenerator RWG ist eine Weiterentwicklung des Modells von HUNDECHA et al. (2009). Er generiert kontinuierliche Reihen des täglichen Niederschlags an mehreren Standorten, z. B. Klimastationen oder Rasterzellen, unter Verwendung der räumlichen Korrelationsstruktur der Beobachtungen. Tägliche Zeitreihen anderer Klimavariablen, wie z. B. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, werden auf den Zustand des generierten Niederschlags an jedem Standort konditioniert (HUNDECHA & MERZ, 2012). Beide Schritte beruhen auf einem multivariaten autoregressiven Modell erster Ordnung.

Das ursprüngliche Modell von HUNDECHA et al. (2009) verwendet eine gemischte Verteilung für den Niederschlag; die Gamma-Verteilung für den Großteil der Niederschlagswerte und die Allgemeine Pareto-Verteilung für die Extremwerte. Dieser Ansatz ist zwar in der Lage, gleichzeitig geringe und extreme Niederschläge gut zu beschreiben, hat aber eine hohe Anzahl an Modellparametern – sechs Parameter pro Standort – und daher eine hohe Modellkomplexität. Deshalb verwendet diese Studie die 3-parametrische erweiterte Allgemeine Pareto-Verteilung (extended Generalised Pareto distribution; NAVEAU et al., 2016). Temperatur und mögliche andere Klimavariablen werden in der Originalversion durch eine Normalverteilung beschrieben. Da sich gezeigt hat, dass die Annahme der Normalverteilung häufig nicht gerechtfertigt ist, werden hier die Werte zuerst mittels einer Potenzfunktion transformiert, um die Schiefe zu minimieren.

NGUYEN et al. (2021) implementierten die weiterentwickelte Modellvariante für Deutschland inklusive der Oberstrom-einzugsgebiete der großen Flusseinzugsgebiete Elbe, Donau und Rhein in den Nachbarstaaten. Diese Variante wurde mit Klimabeobach-

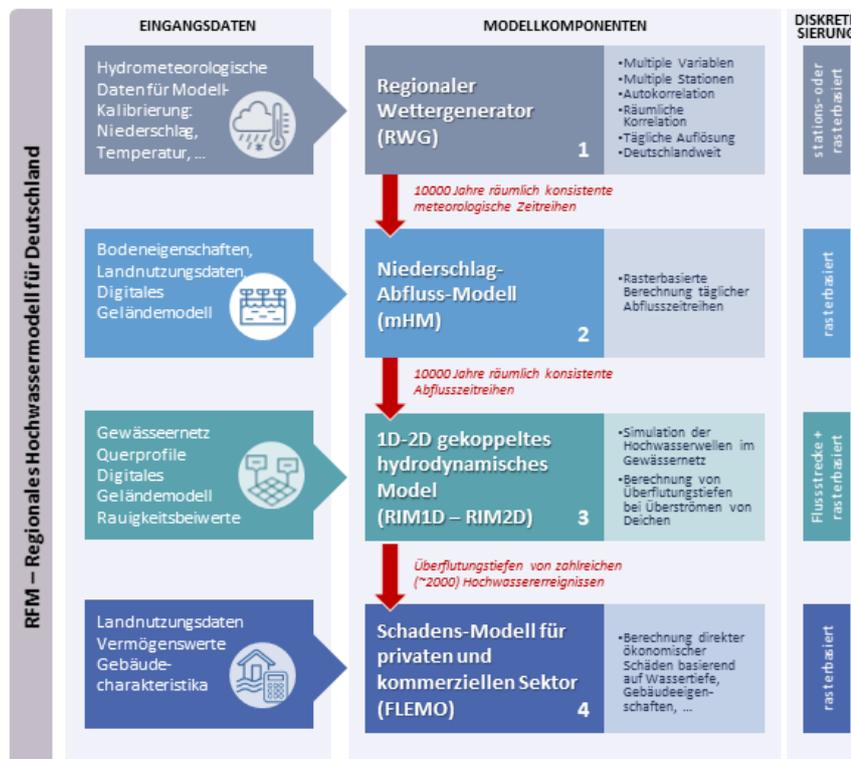


Abbildung 1 Modellkette RFM (Regional Flood Model) zur Abschätzung des Hochwasserrisikos basierend auf räumlich verteilter, kontinuierlicher Langzeitsimulation. Model chain RFM (Regional Flood Model) for assessing flood risk based on spatially distributed, continuous long-term simulation.

tungen an 528 Standorten parametrisiert und deckt eine Fläche von ca. 580.000 km² ab. Der Wettergenerator wird monatsweise parametrisiert, so dass der Jahresgang simuliert wird. Eine umfangreiche Evaluierung zeigte, dass RWG verschiedenste statistische Eigenschaften der beobachteten Klimavariablen gut reproduziert, wie beispielsweise die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Niederschlag und des Übergangs von trocken zu nass, mittlere tägliche sowie extreme Niederschläge und Temperaturen, mehrtägige Niederschlagssummen oder die räumliche Korrelationsstruktur (NGUYEN et al., 2021). Somit können für Deutschland und die entsprechenden Oberstromregionen räumlich konsistente Felder von Klimavariablen in täglicher Auflösung mit Zeitreihenlängen von mehreren tausend Jahren generiert und als Input für die Hochwasserrisikoabschätzung genutzt werden.

Um Klimawandel und dekadische Klimavariabilität abbilden zu können, wurde für die Studie zusätzlich eine instationäre Variante entwickelt, die die lokalen Verteilungen der Klimavariablen Niederschlag und Temperatur auf großräumige Zirkulationsmuster sowie auf die großräumige mittlere Temperatur konditioniert. Diese großräumigen Informationen werden aus Beobachtungsdaten, Reanalysen oder Klimamodellen entnommen. Durch die Abhängigkeit von Zirkulationsmustern können Veränderungen in der atmosphärischen Dynamik – über die Variationen in der Häufigkeit, Persistenz und Saisonalität von Zirkulationsmustern – berücksichtigt werden. Die Abhängigkeit von der großräumigen Temperatur erlaubt es, mögliche thermodynamische Veränderungen durch den Klimawandel zu berücksichtigen, wie z. B. höhere Niederschlagintensitäten bei demselben Zirkulationsmuster in einer wärmeren Welt. Momentan wird diese Variante mit sechs Zirkulationsmustern sowie für Sommer und Winter betrieben, so dass das Modell auf zwölf Zustände parametrisiert wird. Details zur instationären Version finden sich in NGUYEN et al. (2024). Um die Daten des Wettergenerators auch für kleinere Einzugsgebiete verwenden zu können, wurde eine Methode entwickelt, die die täglichen Daten in stündliche Werte disaggregiert (GUAN et al., 2023).

Zwar ist es möglich, das hydrologische Modell und die folgenden Komponenten mit Output von Klimamodellen zu betreiben. Die Unsicherheit in der Modellierung von Niederschlag ist allerdings groß. Der Wettergenerator nutzt dagegen großräumige Informationen zu Zirkulationsmustern und Temperatur, die deutlich besser von Klimamodellen simuliert werden. Außerdem erlaubt der Wettergenerator die Erzeugung von mehreren Tausend Jahren Wetter, während die verfügbaren Zeitreihen bzw. Realisationen von Klimamodellen im Allgemeinen deutlich kürzer sind.

2.2 Einzugsgebietsmodell

Die Simulation der hydrologischen Prozesse in den Einzugsgebieten erfolgte in früheren Anwendungen von RFM (FALTER et al., 2015; METIN et al., 2020; SAIRAM et al., 2021) mit dem semi-verteilten Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model; KRYSANOVA et al., 1998). Die hydrologischen Prozesse, wie beispielsweise Evapotranspiration, Infiltration oder Oberflächenabfluss, werden für Hydrotöpfe, d. h. räumlich homogene Einheiten hinsichtlich Landnutzung und Bodentyp, berechnet und auf der Ebene von Teileinzugsgebieten als flächengewichteter Durchschnitt integriert. Der Abfluss aus den Teileinzugsgebieten wird mittels der Muskingum-Methode zum Auslass des Einzugsgebiets transformiert und dort aggregiert.

Für neuere Anwendungen verwendet diese Studie das mesoskalige hydrologische Modell mHM (SAMANIEGO et al., 2010; KUMAR et al., 2013). Dies ist ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell auf Rasterbasis. Ein besonderes Merkmal von mHM ist sein Ansatz zur Bestimmung der Modellparameter. Mittels des "Multiscale Parameter Regionalization" werden die Parameter für die räumliche Auflösung der Modellsimulation, z. B. 5 km für Deutschland, basierend aus hochaufgelösten physikalisch beobachtbaren Informationen, d. h. Eigenschaften der Topographie, des Bodens und der Geologie sowie der Vegetation, abgeleitet. Dieser Ansatz berücksichtigt damit die kleinräumige räumliche Heterogenität und führt zu räumlich konsistenten Parametersätzen. Talsperren und Hochwasserrückhalteräume sind momentan nicht in mHM implementiert. Ihr Effekt auf das Hochwassergeschehen wird nur dann implizit berücksichtigt, wenn direkt unterhalb von Rückhalteräumen Kalibrierungspegel vorhanden sind.

2.3 Modell RIM zur Simulation von Wellenablauf und Überflutung

Zur Simulation von Wellenablauf und Überflutung stehen ebenfalls zwei Modelle zur Verfügung. Für große Gebiete mit verzweigtem Gewässernetz wird ein gekoppeltes 1D-2D-Modell (RIM1D – RIM2D) verwendet (FARRAG et al., 2022). Das RIM1D-Modell simuliert die Wellenfortpflanzung mit einem Diffusionswellenansatz im Gewässerbett und auf Vorländern (geteilter Querschnitt); einerseits für Flussabschnitte ohne Deiche sowie andererseits zwischen den Deichen für eingedeichte Abschnitte. Im Falle einer Deichüberströmung wird der Durchfluss über die Deichkrone mit der Wehrformel berechnet (FARRAG et al., 2022). Das Überströmungsvolumen dient als Randbedingung für das RIM2D-Überflutungsmodell im Hinterland. RIM2D ist ein rasterbasiertes hydrodynamisches Modell, das die vereinfachte Flachwassergleichung ohne konvektive Beschleunigung verwendet ("inertia formulation"; BATES et al., 2010; DE ALMEIDA et al., 2012). RIM2D wurde mit CUDA FORTRAN auf Graphics Processing Units (GPUs) implementiert und erreicht sehr hohe Rechengeschwindigkeiten. In beiden Modellen werden die Gleichungen explizit numerisch gelöst mit einer adaptiven Zeitschrittsteuerung, d. h. der Zeitschritt wird automatisch an die aktuellen hydraulischen Bedingungen angepasst.

RIM2D kann für kleine Gebiete direkt mit dem Input eines Niederschlag-Abfluss-Modells ohne 1D-Komponente angetrieben werden. Dabei wird die Strömung sowohl im Flussschlauch als auch auf Vorländern und im Hinterland in 2D erfasst. Die Abflusszeitreihe des Niederschlag-Abfluss-Modells dient als obere Randbedingung für RIM2D. Mit diesem Ansatz konnte beispielsweise die Überflutungssituation beim Juli-Hochwasser 2021 im unteren Ahrtal, auf den unteren ca. 30 Flusskilometern, erfolgreich simuliert werden (APEL et al., 2022). Für die Überflutungssimulation in urbanen Räumen wurde RIM2D um einen kapazitiven Ansatz zur Simulation des Abwasser- und Kanalnetzes sowie der Versickerung auf nicht versiegelten Flächen erweitert (APEL et al., 2024). Dabei wird das Überflutungsvolumen ab einem bestimmten Wasserstandsschwellenwert durch eine konstante Rate reduziert, die der Kanalnetzbemessung bzw. Versickerung auf unversiegelten Flächen entspricht. Für die Schadensabschätzung liefert RIM2D räumlich verteilte Informationen zu maximalen Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Überflutungsdauer während der Ereignisse.

2.4 Schadensmodelle

Für die Abschätzung der Hochwasserschäden für die Sektoren Privathaushalte, also Wohngebäude und Hausrat, und Gewerbe bzw. Industrie (Gebäude, Inventar) werden verschiedene empirische Schadensmodelle verwendet. Die Modelle basieren auf Befragungen von betroffenen Privathaushalten und Unternehmen, die seit 2002 nach allen größeren, schadenträchtigen Hochwasserereignissen in Deutschland durchgeführt wurden (z. B. KIENZLER et al., 2015). Die objektspezifischen Schadendaten stehen der Fachöffentlichkeit unter bestimmten Nutzungsbedingungen über die Hochwasserschadendatenbank HOWAS 21 zur Verfügung (KELLERMANN et al., 2020).

Es werden multivariate Schadensmodelle verwendet, da diese im Gegensatz zu Wasserstand-Schadenkurven die komplexen Schadensprozesse besser abbilden und mit geringeren Unsicherheiten behaftet sind. In früheren Anwendungen von RFM (FALTER et al., 2015; METIN et al., 2020; SAIRAM et al., 2021) wurden die regelbasierten Modelle FLEMOps für Privathaushalte und FLEMOcs für Gewerbe/Industrie verwendet, die als Eingangsparameter neben dem Wasserstand auch Wohngebäudetyp und Qualität bzw. Unternehmenssektor und Größe entsprechend der Mitarbeiterzahl verwenden (KREIBICH et al., 2010; THIEKEN et al., 2008). Optional können beide Modelle noch zusätzlich Kontamination und Vorsorgezustand berücksichtigen. Neuere Anwendungen verwenden probabilistische Modelle, da diese automatisch Unsicherheiten quantifizieren, die dann transparent kommuniziert und bei Entscheidungen berücksichtigt werden können (STEINHAUSEN et al., 2020). Es sind verschiedene Modellvarianten, basierend auf Random Forests, Bayes'schen Netzen und (hierarchischen) Bayes'schen Regressionen, verfügbar (SCHRÖTER et al., 2014; SAIRAM et al., 2019; RÖZER et al. 2019; SCHOPPA et al. 2020).

Die Expositionsabschätzung basiert auf der Disaggregation von Wiederherstellungskosten, die aus wirtschaftsstatistischen Daten abgeleitet werden – entweder auf der Skala von Landnutzungseinheiten (WÜNSCH et al., 2009) oder auf Einzelgebäuden (PAPROTNY et al., 2020a, 2020b). Die neueren Ansätze auf Gebäudeskala nutzen nur öffentlich verfügbare Daten, z. B. Gebäudegrundrisse aus OpenStreetMap, und bieten somit eine konsistente, europaweite Abdeckung. In Kombination mit dem neuen Ansatz zur probabilistischen skalenumabhängigen Schadensschätzung ("seamless estimation approach") kann eine vollständige Skalierbarkeit der Schadensschätzung und deren Unsicherheiten von der Objekt- bis zur Länderebene erreicht werden (SIEG et al., 2019).

3 Implementierung von RFM für Deutschland

Die gesamte Modellkette wurde für Deutschland in verschiedenen Modellversionen implementiert. Dieser Artikel beschreibt die Modellversion von SAIRAM et al. (2021), die mittels der stationären Version des Wettergenerators RWG Beobachtungsdaten von 528 Klimastationen (Abb. 2) nutzt, für die synthetische Zeitreihen generiert werden. Das hydrologische Modell mHM transferiert die Klimavariablen in täglichen Abfluss für 4.405 Teileinzugsgebiete. Das gekoppelte 1D-2D hydrodynamische Modell RIM simuliert den Wellablauf für alle Flüsse und Nebenflüsse mit einer Gebietsgröße von mindestens 500 km². Das 1D-Flussnetz enthält ca. 18.000 Querschnitte mit einem durchschnittlichen Abstand von 500 m. Im Falle von Deichüberströmen springt die

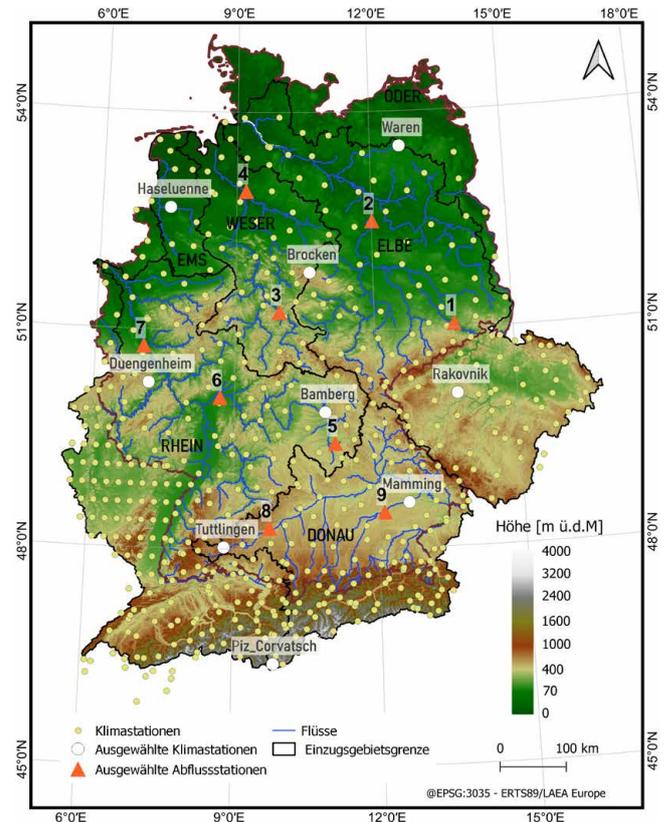


Abbildung 2

Implementierung von RFM für Deutschland inklusive der Kopfeinzugsgebiete von Rhein, Donau und Elbe in den Nachbarländern (aus NGUYEN et al., 2021, übersetzt aus englischer Publikation). Der Wettergenerator und das hydrologische Modell sind für die gesamte dargestellte Fläche implementiert, während sich das hydrodynamische Modell und die Schadensmodelle auf die Flächen entlang der Hauptflüsse und ihrer Nebenflüsse (blaue Strecken) beschränken. Die gelben Punkte zeigen die 528 Lokationen, deren Beobachtungen zur Parametrisierung des Wettergenerators genutzt werden und an denen Zeitreihen für Niederschlag und weitere Klimavariablen generiert werden. Weiße Kreise bzw. rote Dreiecke zeigen die Lokationen der Klimastationen in Abbildung 3 bzw. der Abflussstationen in Abbildung 6.

Implementation of RFM for Germany including the headwater catchments of the Rhine, Danube and Elbe in the neighbouring countries. The weather generator and the hydrological model are implemented for the entire area shown, while the hydrodynamic model and the damage models are limited to the areas along the main rivers and their tributaries (blue sections). The yellow dots show the 528 locations whose observations are used to parameterise the weather generator and at which it generates time series for precipitation and other climate variables. White circles and red triangles show the locations of climate stations used in Figure 3 and streamflow stations used in Figure 6, respectively.

2D-Komponente in einer Auflösung von 100 x 100 m zur Überflutungssimulation an. Die Schadensabschätzung erfolgt mittels der FLEMO-Modelle. In Abhängigkeit der Überflutungshöhe und weiterer schadensbeeinflussenden Variablen (Gebäudetyp und Gebäudequalität für Privathaushalte; Teilsektor und Unternehmensgröße für Gewerbe/Industrie) werden relative Schäden berechnet. Diese aggregiert das Modell mit räumlich expliziten Daten zur Exposition, getrennt nach Wertetypen (z. B. Gebäude, Hausrat) und Sektoren (Haushalte, Gewerbe/Industrie), zu absoluten Schäden. Zusätzlich werden landwirtschaftliche Schäden bestimmt. Hierfür berücksichtigen die Schadensfunktionen die

Überschwemmungsdauer, die Jahreszeit des Hochwassers und verschiedene Kulturarten (FÖRSTER et al., 2008). Die einzelnen Modellkomponenten wurden mittels vergangener Hochwasserdaten kalibriert und validiert. Mit diesem Modellsetup wurden tägliche Zeitreihen von Hochwassereigenschaften für 5.000 Jahre berechnet, die als Grundlage für die Risikoabschätzung dienen. Details finden sich in SAIRAM et al. (2021).

4 Ausgewählte Ergebnisse

Die Modellkette erlaubt es, mehrere tausend Jahre von täglichen Zeitreihen von Niederschlag, Abfluss, Überflutung und Schaden für Deutschland zu erzeugen. Mittels der statistischen Analyse der Zeitreihen von Abfluss und Schäden können für jede gewünschte Lokation Hochwasserhäufigkeits- und Risikokurven erstellt werden (Kap. 4.2 und 4.4). Es können aber auch einzelne Ereignisse als Ausgangspunkt für Stresstests für das großräumige Katastrophenmanagement extrahiert werden (Kap. 4.3). Grundlage dieser Analysen ist der Wettergenerator, der räumlich konsistente (Extrem-)Niederschläge für Deutschland liefert. Da Wettergeneratoren auf der Skala von 600.000 km² eine Seltenheit sind, wird außerdem die Güte des entwickelten Wettergenerators präsentiert (Kap. 4.1).

4.1 Räumlich konsistente Extremniederschläge

Eine umfassende Einschätzung der Modellgüte (NGUYEN et al., 2021) hat gezeigt, dass der Wettergenerator RWG synthetische

Realisationen von Klimavariablen auf der lokalen und regionalen Skala erzeugt, die in ihren statistischen Eigenschaften mit den Beobachtungen sehr gut übereinstimmen. Abbildung 3 zeigt tägliche Extremniederschläge generiert mit der stationären RWG-Version. Dabei wurden 100 Zeitreihen mit einer Länge von jeweils 53 Jahren (entsprechend der betrachteten Periode 1951 bis 2003) an allen 528 Stationen erzeugt, die zur Parametrisierung verwendet wurden. Die beobachteten Extremwerte an neun ausgewählten Stationen liegen innerhalb des Bereichs der 100 Realisierungen (Abb. 3, links). Auch für alle 528 Stationen liegen die beobachteten Extremwerte und der Median des simulierten Bereichs überwiegend auf der 1 : 1-Linie, d. h. beobachtete und simulierte Extremniederschläge stimmen im Wesentlichen überein (Abb. 3, rechts). Abweichungen sind nur an wenigen Stationen in einzelnen Monaten sichtbar; hierbei handelt es sich überwiegend um Überschätzungen. Da die verwendeten Randverteilungen nicht begrenzt sind, ist zu erwarten, dass mit zunehmender Anzahl von Realisierungen höhere Extremwerte im Vergleich zu den zeitlich begrenzten Beobachtungen erzeugt werden.

Neben einer guten Repräsentation der generierten Klimavariablen an den Stationen ist es für großräumige Flusshochwasser wichtig, dass die räumlichen Korrelationen zwischen den Stationen gut abgebildet werden. Abbildung 4 zeigt für den gesamten Satz von 528 Stationen, wie die Korrelation zwischen täglichen Stationsniederschlägen mit der Entfernung zwischen den Statio-

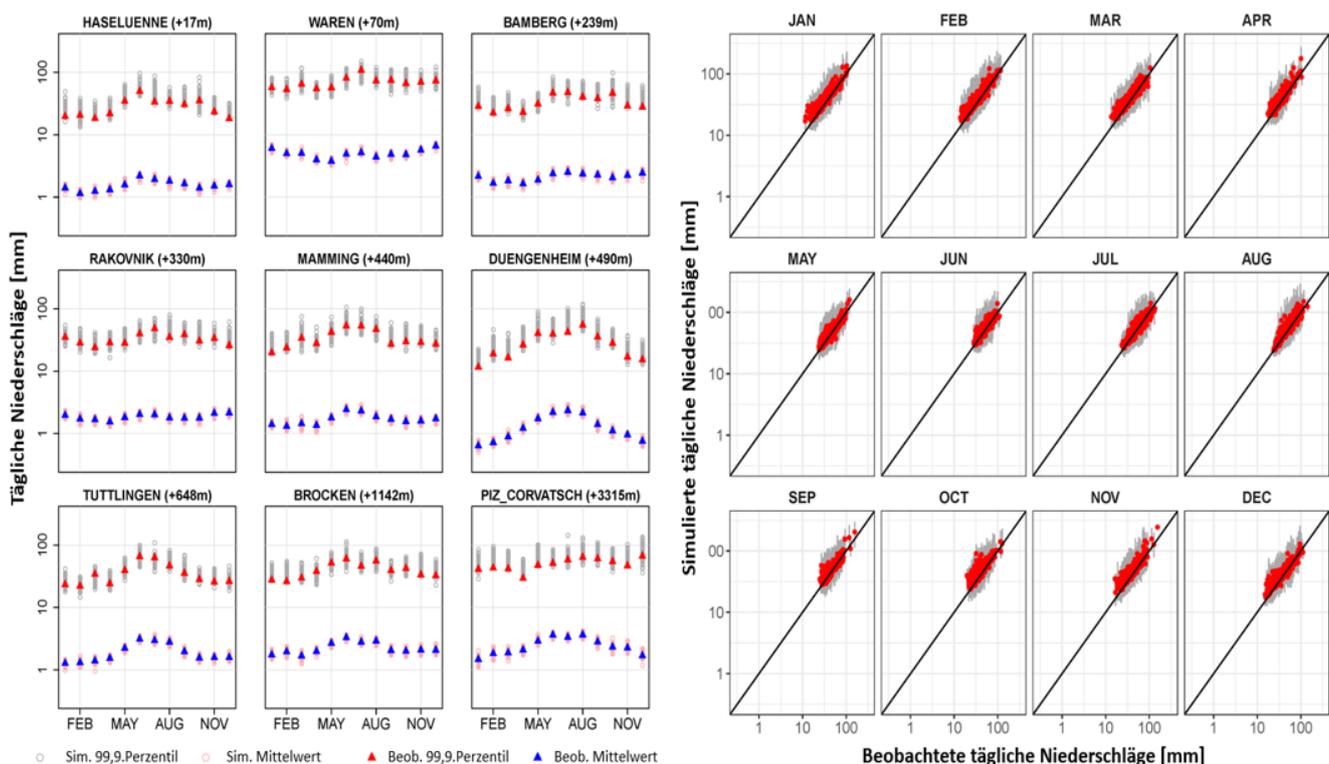


Abbildung 3

Einschätzung der Modellgüte des Wettergenerators RWG für täglichen Niederschlag (aus NGUYEN et al., 2021, übersetzt aus englischer Publikation). Links: Mittelwert und Extremwerte (99,9 Perzentil) an neun ausgewählten Klimastationen (Lokationen siehe Abb. 2). Dreiecke zeigen den Mittelwert der Beobachtungsreihe und graue Punkte die Mittelwerte von 100 synthetischen Reihen. Rechts: Extremniederschlag (99,9 Perzentil) für alle 528 Stationen. Rote Punkte repräsentieren den Median des grauen Bereichs aus 100 Modellläufen.

Assessment of model performance of the weather generator RWG for daily precipitation. Left: Mean and extreme values (99.9% percentile) at nine selected climate stations (see Fig. 2 for locations). Triangles show the mean value of the observations and grey dots the mean values of 100 synthetic series. Right: Extreme precipitation (99.9% percentile) for all 528 stations. Red dots represent the median of the grey range resulting from 100 model runs.

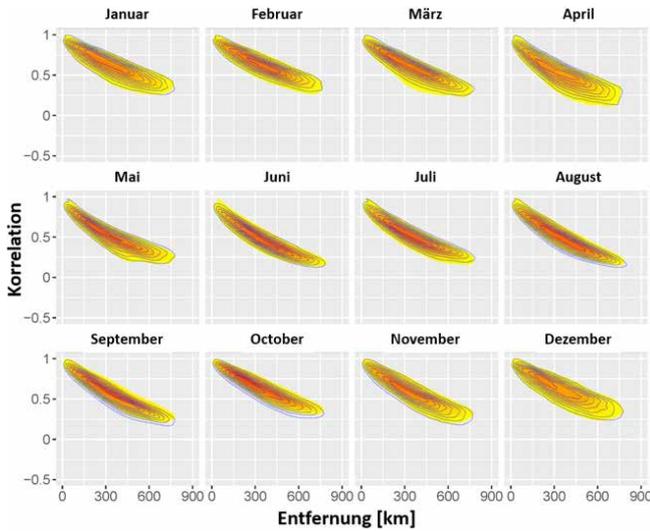


Abbildung 4
 Korrelation in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Stationspaaren für beobachteten und simulierten Niederschlag (aus NGUYEN et al., 2021, übersetzt aus englischer Publikation). Die zunehmende Dichte der Punkte für die beobachteten Reihen ist in schattierten Farben von gelb bis rot dargestellt. Die Dichte der Punkte für die simulierten Reihen wird durch die Konturlinien gezeigt.
Correlation vs. distance between station pairs for observed and simulated precipitation with the RWG1-extGP model version. Increasing density of points for observed series is indicated in shaded colours from yellow to red. The density of points for the simulated series is indicated by the contour lines.

nen abnimmt. Die Korrelation reduziert sich von ca. 0,9 für nahe Stationen auf Werte von 0,2 bis 0,4 für Distanzen von über 500 km. Die Abnahme ist im Sommer stärker als im Herbst und Winter, da mehr lokale Niederschlagsereignisse in den Sommermonaten niedrigere Korrelationen über große Distanzen im Vergleich zu den großräumigen Herbst- und Winterereignissen erzeugen. Insgesamt ist also auch bei den räumlichen Zusammenhängen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und synthetischen Werten zu erkennen. Weitere Analysen der Simulationsgüte, z. B. zu Extremniederschlägen über mehrere Tage und über größere Regionen, finden sich in NGUYEN et al. (2021).

4.2 Abschätzung von Hochwasserszenarien und Hochwasserhäufigkeitskurven

Werden die generierten Felder der Klimavariablen als Eingabe für das hydrologische Modell genutzt, lassen sich sehr lange Zeitreihen von Abfluss generieren, aus denen wiederum Hochwasserereignisse extrahiert oder Hochwasserhäufigkeitskurven abgeleitet werden können. Abbildung 5 zeigt die Hochwassersituation in Deutschland für den 23. August 2002, also während des Elbe- und Donauhochwassers im Sommer 2002, und einen Sommertag mit einem synthetischen Hochwasserereignis. Dieser visuelle Vergleich demonstriert, dass die Modellkette RFM plausible großräumige Hochwassersituation für Deutschland erzeugt.

Aus den langen synthetischen Abflusszeitreihen lassen sich jährliche Maximalabflüsse als Datengrundlage für die Abschätzung von Hochwasserquantilen mittels Extremwertstatistik gewinnen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft für neun Abflusspegel den

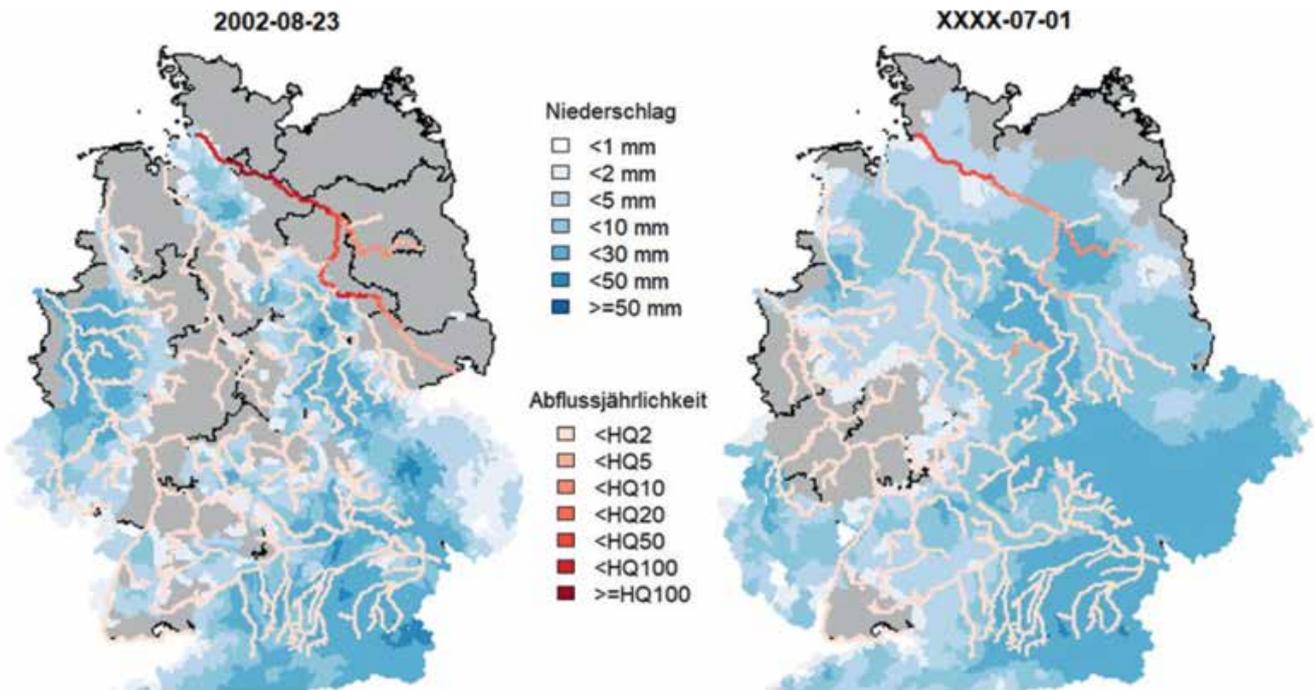


Abbildung 5
 Schnappschuss einer beobachteten und synthetischen Hochwassersituation in Deutschland. Blautöne zeigen die Niederschlagsmenge des jeweiligen Tages. Das Gewässernetz ist entsprechend der Jährlichkeit des Abflusses am selben Tag eingefärbt. Links: Situation am 23. August 2002 während des Hochwassers an Elbe und Donau. Rechts: Synthetisches Sommerhochwasser.
Snapshot of an observed and a synthetic flood situation in Germany. Shades of blue show the precipitation amount on that specific day. The river network is coloured according to the return period of the discharge on that same day. Left: Situation on 23 August 2002 during the 2002 flood in the Elbe and Danube catchments. Right: Synthetic summer flood.

Vergleich von empirischen Hochwasserhäufigkeitskurven auf Basis von Beobachtungen sowie auf Basis von Simulationen mit RFM. Diese Simulationen wurden mit der instationären Version des Wettergenerators und dem hydrologischen Modell mHM durchgeführt. Für die Periode 01/1950 bis 12/2021 wurde der Wettergenerator anhand von beobachteten Daten (Niederschlag und Temperatur: Raster mit $\Delta t = 1\text{d}$; $\Delta x = 0.25^\circ$; E-OBS v25.0e; Luftdruck: Raster mit $\Delta t = 1\text{d}$; $\Delta x = 1^\circ$; ERA5) parametrisiert. Es wurden 100 Realisationen von Wetter über Deutschland für dieselbe Periode generiert und als Antrieb für das hydrologische Modell verwendet. Daraus lassen sich 100 Hochwasserhäufigkeitskurven erstellen (graues Band). Zusätzlich zeigt Abbildung 6 Hochwasserhäufigkeitskurven, die aus mHM-Simulationen abgeleitet wurden, wobei das mHM direkt mit beobachteten Niederschlags- und Temperaturdaten angetrieben wurde.

Die Modellkette "Wettergenerator – hydrologisches Modell" liefert also Hochwasserabflüsse, die sehr ähnlich sind zu den Abflüssen, wenn mHM direkt mit meteorologischen Beobachtungen angetrieben wird. Daraus ist zu folgern, dass der Wettergenerator plausible Extremniederschläge für Deutschland generiert. Für

die ausgewählten Pegel finden wir eine gute Übereinstimmung mit den Häufigkeitskurven, die direkt aus den beobachteten Abflüssen erstellt wurden; d. h. für diese Pegel liefert auch das hydrologische Modell eine gute Beschreibung der Hochwasserhydrologie. Eine gute Übereinstimmung findet sich vor allem für Pegel mit größeren Einzugsgebieten. Für kleine Gebiete und für Gebiete mit lokalen Besonderheiten, wie z. B. Talsperren, können die simulierten Hochwasserhäufigkeitskurven deutlich von den beobachteten Kurven abweichen. Der großräumige Ansatz der Modellkette und der regionale Kalibrierungsansatz, räumlich konsistente Parametersätze für mHM über ganz Deutschland zu nutzen, erlauben es nicht, lokale Effekte zu berücksichtigen bzw. Modellparameter lokal so anzupassen, dass lokale Besonderheiten abgebildet werden.

4.3 Außergewöhnliche Hochwassersituationen

Wenn mehrere tausend Jahre Abflüsse mit RFM generiert werden, kann in diesem Datensatz nach außergewöhnlichen Hochwassersituationen gesucht werden. Für diesen Zweck wurde das hydrologische Modell mHM für ein flächendeckendes Raster mit einer Zellgröße von 5 km zuerst mit beobachteten täglichen

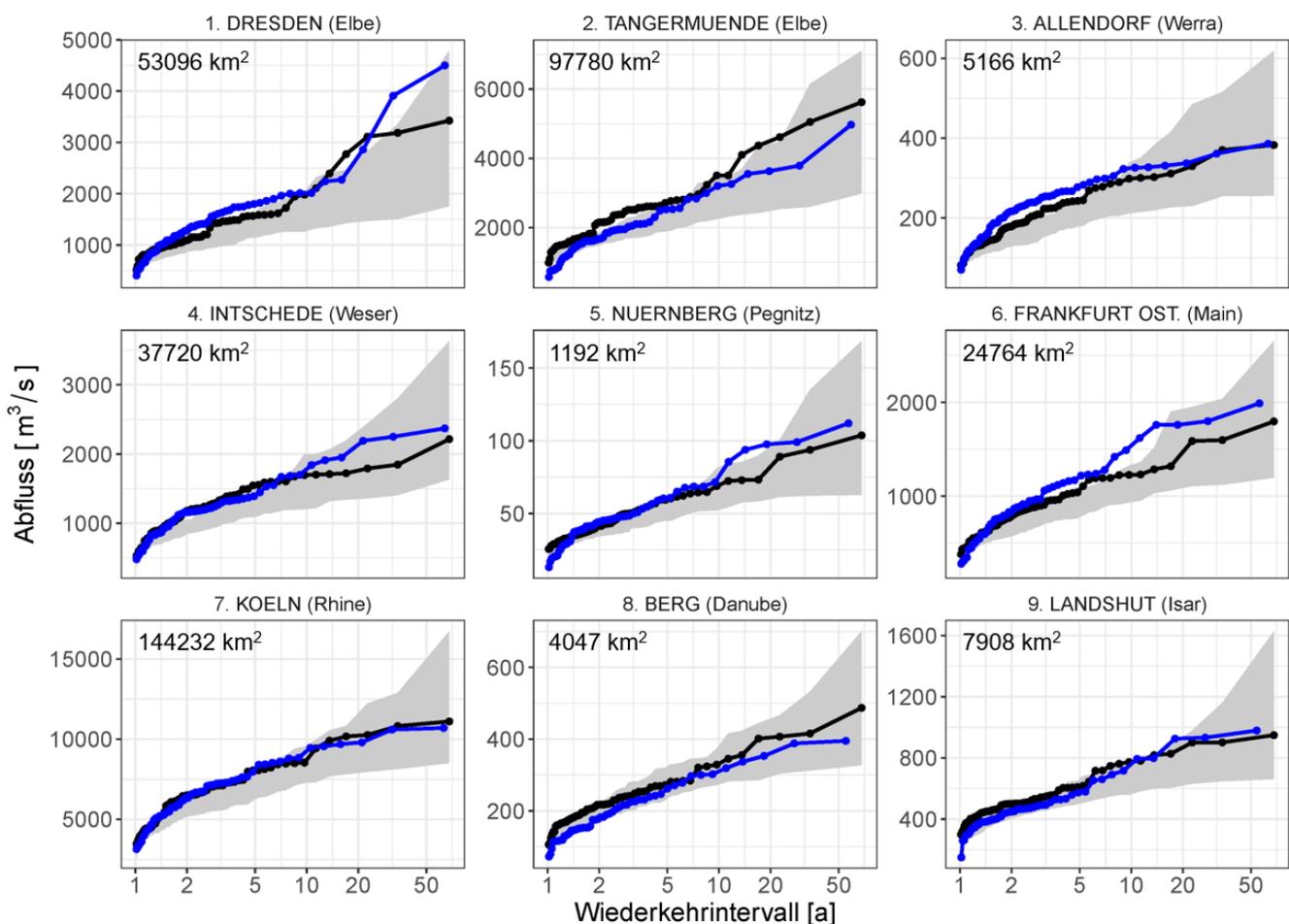


Abbildung 6

Vergleich von empirischen Hochwasserhäufigkeitsfunktionen für neun Pegel in Deutschland (Lokationen siehe Abb. 2), basierend auf Abflussbeobachtungen (blau) und Simulationen (schwarz: mHM angetrieben mit beobachteter Meteorologie; graues Band: mHM angetrieben mit 100 Realisationen des Wettergenerators).

Comparison of empirical flood frequency curves for nine gauging stations in Germany (locations see Fig. 2), based on discharge observations (blue) and simulations (black: mHM driven with observed meteorology; grey band: mHM driven with 100 realisations of the weather generator).

Klimadaten versorgt, spezifisch einem E-OBS-Produkt mit räumlicher Auflösung von 0,25° für die Periode 01/1954 bis 12/2021. Aus den simulierten Abflusszeitreihen wurden an jedem Pegel eines Pegeldatensatzes von 516 Pegeln die jährlichen Maximalwerte gefiltert und jeweils die Allgemeine Extremwertverteilung mit der Maximum-Likelihood-Methode angepasst. Diese Hochwasserhäufigkeitsfunktionen wurden dann verwendet, um den größten Abflüssen eines vergangenen oder synthetischen Jahres an allen 516 Pegeln eine Wiederkehrperiode zuzuweisen. Für die synthetischen Jahre wurde mHM mit der stationären Version des Wettergenerators angetrieben.

Abbildung 7 zeigt die Wiederkehrperiode des größten Abflusses an 516 Pegeln des hydrologischen Jahres 1994 und eines synthetischen Jahres. Im hydrologischen Jahr 1994 paust sich das Weihnachtshochwasser 1993 durch, das am Mittel- und Niederrhein zu erheblichen Schäden geführt hat. Die Modellkette erzeugt für Zeitreihenlängen von mehreren tausend Jahren eine große Anzahl von schadensträchtigen hydrologischen Jahren. Abbildung 7 (rechts) zeigt beispielhaft ein solches synthetisches

Jahr, wobei das räumliche Muster der Wiederkehrperioden über Deutschland dem hydrologischen Jahr 1994 ähnelt. Das synthetische Jahr zeigt allerdings etwas extremere Abflüsse als das hydrologische Jahr 1994.

Es lassen sich in den synthetischen Zeitreihen Hochwasserereignisse und hydrologische Jahre finden, die sehr deutlich über das hinausgehen, was bisher in Deutschland – zumindest im Rahmen der systematischen Messungen – beobachtet wurde. Abbildung 8 zeigt beispielhaft ein synthetisches hydrologisches Jahr, in dem große Teile von Deutschland von extremen Abflüssen betroffen sind. Die Modellkette erzeugt ein sehr großräumiges Hochwasser im Januar im Westen und in Zentraldeutschland, das erhebliche Teile des Rheins, der Weser und Ems erfasst. Ca. 60 % der 516 Pegel zeigen ihren Maximalabfluss im Januar. Im März folgt ein extremes Hochwasser im Donaeinzugsgebiet; dieses Ereignis bedeutet für 38 % aller Pegel in Deutschland den Jahreshöchstabfluss. Für 41 Pegel (7,9 % aller Pegel) finden sich Hochwasser größer als 1.000 Jahre. Solche Szenarien können als wichtige Information für regionale oder nationale Risiko-

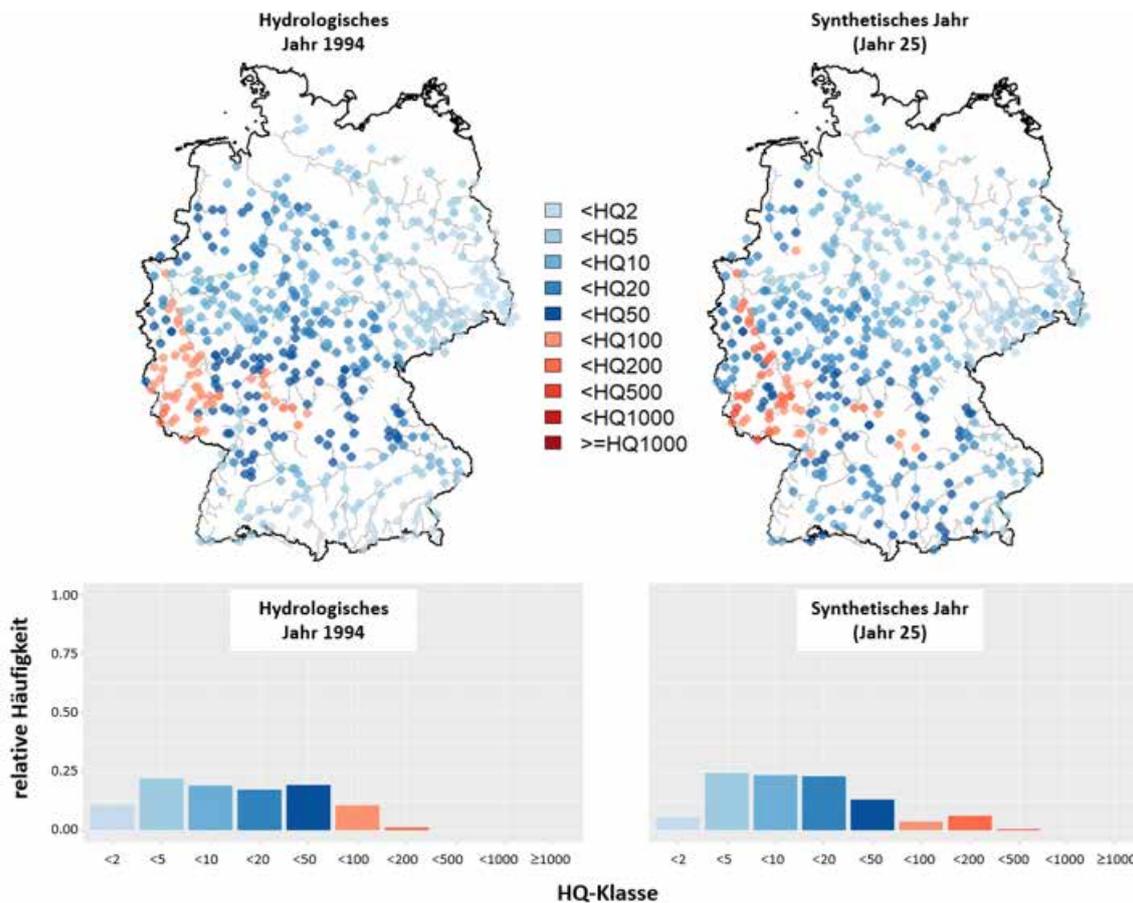


Abbildung 7

Wiederkehrintervall des größten Abflusses an 516 Pegeln des hydrologischen Jahrs 1994 (links) und eines synthetischen Jahres (rechts). Um die Maximalabflüsse des hydrologischen Jahrs 1994 zu erhalten, wurde das hydrologische Modell mHM mit beobachteten Klimadaten angetrieben; für das synthetische Jahr wurden generierte Zeitreihen der stationären Version des Wettergenerators RWG als Antrieb für mHM verwendet. Das Weihnachtshochwasser 1993 am Mittel- und Niederrhein paust sich deutlich durch. Das synthetische Jahr zeigt ein ähnliches räumliche Muster, allerdings mit etwas höheren Abflüssen.

Return period of the maximum discharge at 516 gauges of the hydrological year 1994 (left) and a synthetic year (right). To obtain the maximum discharges of the hydrological year 1994, the hydrological model mHM was driven by observed climate data; for the synthetic year, time series generated by the stationary version of the weather generator RWG were used as input for mHM. The 1993 Christmas flood at the Middle and Lower Rhine is clearly seen. The synthetic year shows a similar spatial pattern, but is more severe at the scale of Germany.

betrachtungen dienen. So würde das Extremjahr von Abbildung 8 mit zwei großräumigen außergewöhnlichen Hochwassern im Abstand von zwei Monaten das Katastrophenmanagement in Deutschland vor völlig neue Herausforderungen stellen.

4.4 Risikobetrachtungen

Ein bedeutender Vorteil des DFRA-Ansatzes ist die Bereitstellung von sehr langen Zeitreihen von Hochwasserabflüssen und resultierenden Schäden. Damit erhöht sich die Chance, (mehrere) außergewöhnliche Ereignisse zu detektieren, die in kurzen Zeitreihen selten auftreten. So können Extremereignisse durch die Kombination von ungünstigen Situationen erzeugt werden, die wiederum zu schiefen Verteilungen des Schadens führen. Abbil-

dung 9 zeigt beispielhaft das Histogramm simulierter Schäden für ein 240 km² großes Teileinzugsgebiet der Mulde basierend auf einer 10.000-Jahres-Zeitreihe. Es finden sich 646 Schadensereignisse mit insgesamt 1,94 Milliarden Euro. Während 50 % der Überflutungsereignisse Schäden bis zu einer Million Euro und nur 15 % der Ereignisse Schäden über vier Millionen verursachen, finden sich einzelne Situationen mit Schäden über 30 Millionen Euro. Solche Ereignisse können aus ungünstigen raumzeitlichen Überlagerungen entlang der Prozesskette entstehen, z. B. ungünstige Überlagerung von Einzugsgebietszustand und Ereignisniederschlag oder von Überflutungsflächen und Werten.

Die Analyse der Schadenszeitreihen erlaubt es, für beliebige Raumeinheiten Risikoassessungen abzuleiten. Abbildung 10 zeigt beispielhaft Risikokurven für die Städte Köln, Regensburg und Dresden durch Hochwasser an Rhein, Donau bzw. Elbe. In allen Fällen zeigt sich der vergleichsweise hohe Schutzgrad dadurch, dass nennenswerte Schäden erst bei mittleren bis seltenen Ereignissen auftreten. Sind die Schutzmaßnahmen überlastet, dann können die Schäden mit der Jährlichkeit allerdings schnell ansteigen. Interessant ist der Vergleich zwischen den beiden Sektoren. Während in Köln und Regensburg die Schäden im Sektor Gewerbe/Industrie deutlich höher ausfallen als im Sektor Privathaushalte, kehrt sich dieses Verhältnis für Dresden um. Der Anstieg der Risikokurven für die beiden Sektoren verläuft in allen drei Städten jeweils ähnlich, d. h. Privathaushalte und Gewerbe/Industrie werden mit zunehmendem Wiederkehrintervall in ähnlicher Weise von zusätzlichen Schäden betroffen. Für die gesamte Fläche Deutschlands gilt diese Aussage nicht (Abb. 11): die Schäden für Privathaushalte steigen eher linear mit dem Logarithmus der Jährlichkeit, während sich beim Sektor Gewerbe/Industrie eine Knickstelle bei ca. 700 Jahren zeigt. Ab diesem Bereich steigt der Schaden sehr viel steiler an. Dies deutet darauf hin, dass bedeutende Teile dieses Sektors weniger exponiert sind und in Flächen mit einem höheren Schutzgrad liegen.

Der Schadenserwartungswert (EAD), d. h. der aus statistischer Sicht jährlich zu erwartende Schaden, beträgt 581 Millionen Euro für diese beiden Sektoren. Diese Größenordnung stimmt mit den Ergebnissen von kontinentalen und globalen Studien überein. Beispielsweise belaufen sich die Schätzungen des EAD für

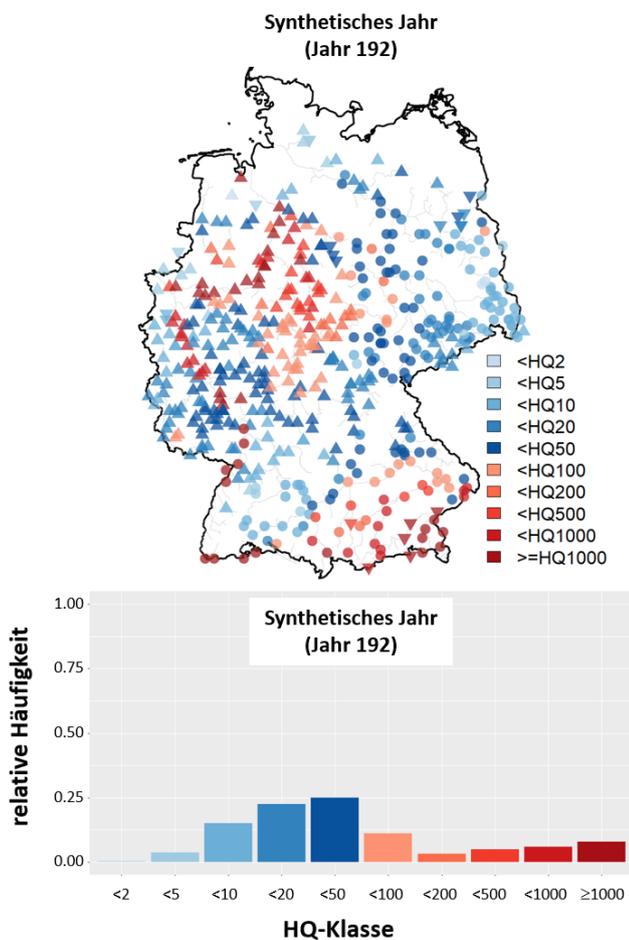


Abbildung 8

Wiederkehrintervall des größten Abflusses an 516 Pegeln eines synthetischen hydrologischen Jahres. Werte simuliert mit dem hydrologischen Modell mHM, das wiederum mit Zeitreihen der stationären Version des Wettergenerators RWG angetrieben wurde. Die Form kennzeichnet den Monat mit dem höchsten Abfluss: Dreieck (nach oben zeigend): Januar; Kreis: März; Dreieck (nach unten zeigend): alle anderen Monate. Einem sehr schadensträchtigen Hochwasser im Januar in erheblichen Teilen Deutschlands (Rhein, Ems, Weser) folgt im März eine starkes Donauhochwasser.

Return period of the highest discharge at 516 gauges of a synthetic hydrological year. Values simulated with the hydrological model mHM, which in turn was driven by time series of the stationary version of the weather generator RWG. The shape indicates the month of the highest flood: Upward triangle: January; Circle: March; Downward triangle: all other months. A very damaging flood in January in considerable parts of Germany (Rhine, Ems, Weser) is followed by a strong Danube flood in March.

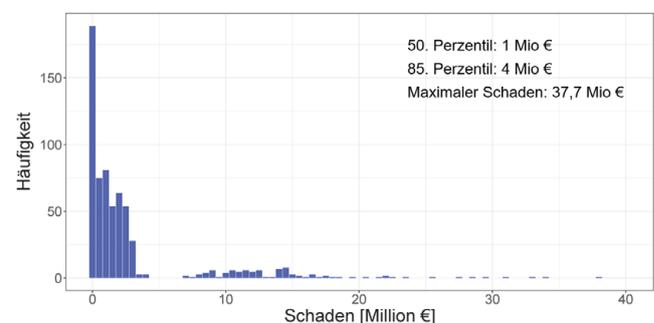


Abbildung 9

Histogramm der Schäden aus einer 10.000-Jahres Simulation mit RFM für ein Teileinzugsgebiet der Mulde (verändert aus FALTER et al., 2015, mit Genehmigung von Elsevier).

Histogram of event damage for a 10,000-year RFM simulation for a sub-basin of the Mulde River (adapted from FALTER et al., 2015, with permission from Elsevier).

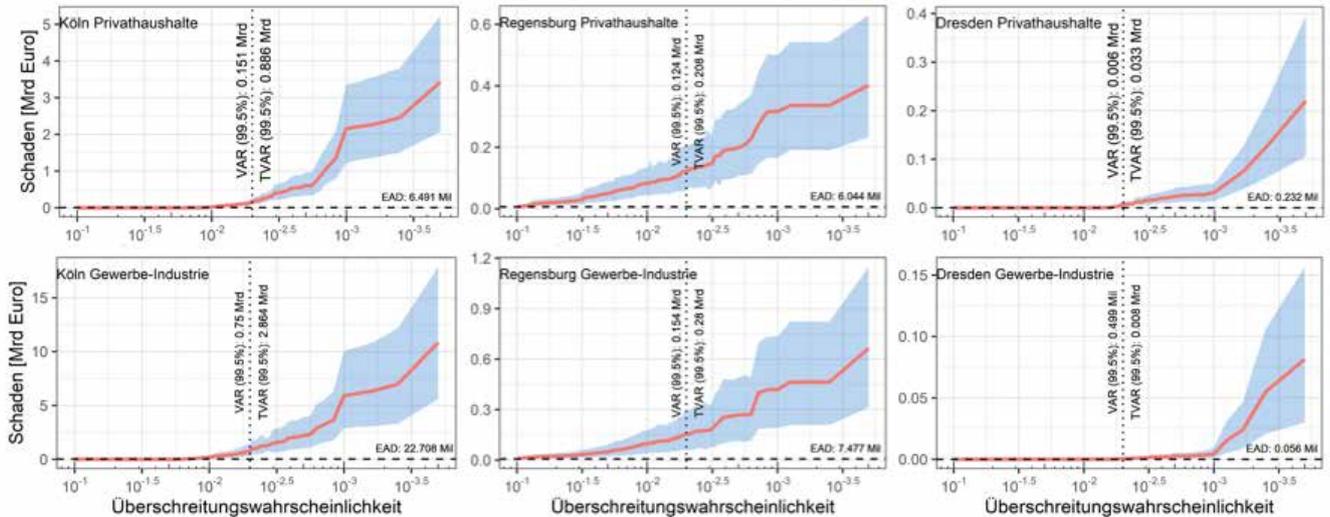


Abbildung 10

Hochwasserrisikokurven inklusive Unsicherheitsintervall für Köln/Rhein, Regensburg/Donau und Dresden/Elbe für die Sektoren Privathaushalte und Gewerbe/Industrie. Neben dem jährlichen Erwartungswert (EAD – Expected Annual Damage) ist für das Wiederkehrintervall von 200 Jahren der "Value At Risk (VAR)" und der "Tail Value At Risk (TVAR)" angegeben. VAR gibt den erwarteten Schaden für das 200-jährliche Hochwasser an, während TVAR den mittleren erwarteten Schaden für die Ereignisse seltener als 200 Jahre repräsentiert. Die Unsicherheitsbereiche berücksichtigen die Unsicherheiten aus der Überflutungssimulation, der Expositionsermittlung sowie den Schadensfunktionen.

Flood risk curves including uncertainty interval for Cologne/Rhine, Dresden/Elbe and Regensburg/Danube for the commercial and residential sectors. Besides the annual expected damage, the Value At Risk (VAR) and the Tail Value At Risk (TVAR) for the 200-year flood are shown. VAR represents the expected damage for the 200-year flood, while TVAR represents the mean expected damage for events larger than the 200-year flood. The uncertainty interval aggregates the uncertainties from the inundation simulation, and from the estimation of economic assets and the damage functions.

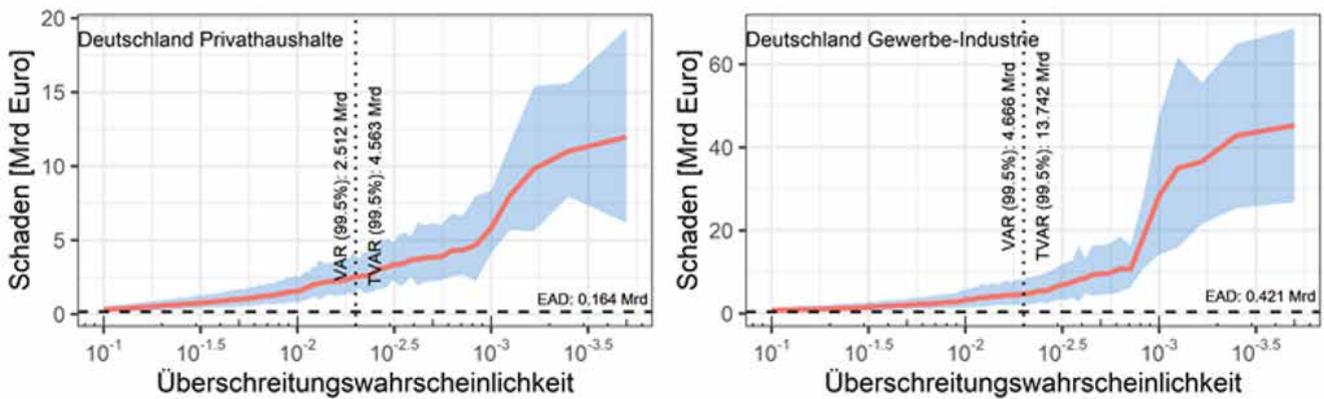


Abbildung 11

Risikokurven für Flusshochwasser in Deutschland für die Sektoren Gewerbe/Industrie und Privathaushalte. Erklärung der Abkürzungen und Unsicherheitsbereiche siehe Abbildung 10.

Risk curves for river flooding in Germany for the commercial and residential sectors. See Figure 10 for explanation of abbreviations and uncertainty interval.

Deutschland auf 0,4 bis 1,0 Milliarden Euro (ALFIERI et al., 2015), 0,5 bis 2,8 Milliarden Euro (DOTTORI et al., 2018) und 0,1 bis 0,6 Milliarden Euro (ALFIERI et al., 2018); diese Schätzungen schließen allerdings alle Sektoren ein. Die Werte sind jedoch nur schwer zu vergleichen, da diese Studien mit deutlich vereinfachten Modellen und Annahmen arbeiten.

Der Vergleich der RFM-Simulationen (angetrieben durch die beobachtete Meteorologie) mit gemeldeten Schäden zeigt ebenfalls, dass die hier vorgestellte Modellkette plausible Ergebnisse liefert. Für den Zeitraum 1990 bis 2003 liegen die gemeldeten

Schäden (Hanze-Datensatz; PAPROTNY et al., 2018) für vier von fünf Ereignissen innerhalb der oberen und unteren Grenzen der RFM-Schätzung (SAIRAM et al., 2021). Das Hochwasser 2002 wird jedoch durch RFM deutlich unterschätzt. Dieser Effekt dürfte im Wesentlichen durch die weit mehr als 100 Deichbrüche während des Hochwassers von 2002 erklärbar sein. Eine erhebliche Zahl von Deichbrüchen fand bei Wasserständen unterhalb der Deichkrone statt; beispielsweise durch innere Erosion oder Hanginstabilität. Das Modell RFM simuliert momentan nur Deichüberströmen – somit weniger Deichbrüche mit entsprechend geringeren Schäden in 2002. Darüber hinaus enthält die aktuelle Version von

RFM nicht die zahlreichen Bäche und kleineren Flüsse, die ebenso zu erheblichen Schäden führen können, wie das Ereignis im Juli 2021 eindrucksvoll gezeigt hat.

5 Diskussion

Der Ansatz der "abgeleiteten Hochwasser-Häufigkeits-Analyse basierend auf Langzeitsimulation" hat in den letzten Jahren zunehmendes Interesse gefunden. Seine Erweiterung zur "abgeleiteten Hochwasser-Risiko-Analyse basierend auf Langzeitsimulation", wie von FALTER et al. (2015) vorgeschlagen, wurde bisher vergleichsweise wenig eingesetzt. Der Hauptgrund dürfte der erhebliche Aufwand für die Implementierung einer entsprechenden Modellkette sein. Die Simulationszeiten sind dagegen auch für sehr große Gebiete und sehr lange Zeitperioden vertretbar. So benötigt die Simulation von 10.000 Jahren für Deutschland auf dem Linux-Hochleistungscluster GLIC des GFZ ca. 1 Tag für den Wettergenerator, ca. 2 Tage für das hydrologische Modell mHM und ca. 6 Stunden für die Schadensmodellierung. Der größte Aufwand von ca. 14 Tagen entsteht durch die Simulation der Hochwasserwellen und Überflutungen mittels RIM1D/2D.

Der Ansatz besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Methoden. Ein wesentlicher Vorteil ist die Generierung von räumlich konsistenten Szenarien, die die räumlichen Abhängigkeiten entlang der gesamten Prozesskette berücksichtigen. Es werden also auch die räumlichen Korrelationen zwischen Schäden abgebildet, was wichtig ist, um realistische Risikoaussagen für größere Flächeneinheiten zu erhalten. Die Langzeitsimulation liefert außerdem realistische Anfangsbedingungen für Hochwasserereignisse, da der gesamte Wasserhaushalt simuliert wird. Der Einfluss des Anfangszustands des Einzugsgebiets auf den Hochwasserabfluss bzw. seine Jährlichkeit wird dadurch implizit erfasst. Die zeitkontinuierliche Simulation liefert zudem vollständige Hydrographen – und nicht nur Hochwasserscheitelwerte. Dies ist ein wichtiger Input für verschiedene Zwecke, wie beispielsweise die Speicherbemessung oder Schadensabschätzung.

Die flächendeckende Modellierung mit der gesamten Prozesskette erlaubt es, Werte (Abfluss, Überflutung, Schaden) auch für Einzugsgebiete bereitzustellen, in denen keine historischen Beobachtungen vorliegen. Darüber hinaus können Änderungen des betrachteten Systems, z. B. durch Klimawandel, Landnutzungsänderungen oder Anpassungsmaßnahmen, simuliert werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit, prozessnahe Modellansätze zu implementieren. Große Hochwasser sind nicht (immer) die große Version von kleinen Hochwassern, sondern können durch Prozesse (z. B. Deichbruch) oder Prozessinteraktionen (z. B. abrupter und starker Anstieg des Abflusses bei moderatem Anstieg des Niederschlags) dominiert werden, die bei kleinen Ereignissen nicht auftreten (MERZ et al., 2021, 2022; MACDONALD et al., 2022). Die Extrapolation in den Bereich großer Wiederkehrintervalle sollte deshalb die wichtigen Prozesse, ihre Interaktionen und ihre raumzeitlichen Abhängigkeiten berücksichtigen.

Diese Vorteile lassen sich jedoch nur realisieren, wenn die Modelle die wichtigen Hochwasserprozesse entlang der gesamten Prozesskette gut widerspiegeln. Hier sehen wir vor allem Bedarf in der Abbildung von strukturellen Hochwasserschutzmaßnahmen. Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren sind in RFM, wie in den meisten anderen großräumigen Modellen zur Hochwas-

sergefährdungs- und Risikoabschätzung, nicht bzw. nur implizit über die Kalibrierung des hydrologischen Modells berücksichtigt. Deiche sind in RFM enthalten; da es für Deutschland allerdings keine flächenhaften Datensätze zu Deicheigenschaften gibt, wurde die Deichgeometrie im Wesentlichen aus digitalen Geländemodellen abgeleitet. Die daraus resultierenden Fehler sind erheblich. In den bisherigen Versionen von RFM wird Deichüberströmen simuliert, allerdings nicht Deichbruch. Modelle hierfür liegen vor, erfordern jedoch einen substantiellen Mehraufwand an Daten und Rechenzeit (VOROGUSHYN et al., 2010).

Die Simulation von seltenen Ereignissen entlang der gesamten Prozesskette vom Niederschlag zum Schaden impliziert, dass die Risikoaussagen mit hohen Unsicherheiten verbunden sein dürften. Dementsprechend wichtig ist es, Unsicherheiten zu quantifizieren, ihre dominanten Quellen zu identifizieren und möglichst zu reduzieren. Im Falle von RFM sind wichtige nächste Arbeiten die bessere Berücksichtigung von strukturellen Schutzmaßnahmen und entsprechenden Versagensmechanismen (im Wesentlichen Deichbrüche) und die Implementierung probabilistischer Schadensmodelle. Diese Arbeiten würden durch die Verfügbarkeit von landesweiten Datensätzen zu Hochwasserschutzmaßnahmen erheblich erleichtert werden.

6 Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag zeigt, dass es aufgrund von Fortschritten in Datenverfügbarkeit, Methoden und Rechenkapazität möglich ist, eine relativ hochaufgelöste, prozessnahe Simulationen von Hochwassermechanismen auf der nationalen Skala für mehrere tausend Jahre lange Zeiträume umzusetzen. Die raumzeitlich konsistente Simulation entlang der Prozesskette, vom Niederschlag zum Schaden, für solch langen Zeiträume eröffnet die Möglichkeit, extreme Ereignisse zu identifizieren und zu quantifizieren, die beispielsweise durch die ungünstige Überlagerung verschiedener Prozesse oder durch die Überschreitung von Schwellenwerten verursacht werden. Wenn solche ungünstigen Überlagerungen oder Schwellenwertüberschreitungen selten sind, ist es unwahrscheinlich, dass diese in kurzen (beobachteten oder simulierten) Zeitreihen auftreten. Die hier vorgestellte "abgeleitete Hochwasser-Risiko-Analyse basierend auf Langzeitsimulation" ist somit ein Werkzeug, um außergewöhnliche Ereignisse zu identifizieren und quantifizieren. Gerade solche Ereignisse können Betroffene und Entscheidungsträger überraschen und zu sehr großen Schäden führen (MERZ et al., 2015; KREIBICH et al., 2022), und stellen somit eine besondere Herausforderung für das Risikomanagement dar.

Conclusions

This paper shows that, due to advances in data availability, methods and computational capacity, it is possible to implement relatively high-resolution, process-based simulations of flood mechanisms at the national scale for time periods of several thousand years. The spatio-temporally consistent simulation along the entire process chain, from precipitation to damage, for such long periods opens up the possibility of identifying and quantifying extreme events caused, for example, by the unfavourable superposition of different processes or by the exceeding of threshold values. If this unfavourable superposition or threshold crossing is rare, it is unlikely to occur in short (observed or simulated) time series. The "derived flood risk analysis based on long-term

simulation" presented here is thus a tool to identify and quantify exceptional events. Such events can take affected parties and decision-makers by surprise and lead to very large losses (MERZ et al., 2015, KREIBICH et al., 2022), and thus represent a special challenge for risk management.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die im Rahmen der Studie verwendeten Daten und die erzeugten Ergebnisse können auf ordnungsgemäße Anfrage bei den Verfassern zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Zu diesen Arbeiten haben die Projekte System-Risk (EU, H2020-MSCA-ITN – 676027-SYSTEM-RISK: A Large-Scale Systems Approach to Flood Risk Assessment and Management), ClimXtreme (Module C Impacts – Teilprojekt 5: FLOOD, BMBF, 01LP1903E), SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods; DFG, GRK 2043/2, FOR2416), KAHR (Klima-Anpassung, Hochwasser und Resilienz: Wissenschaftliche Begleitung des Wiederaufbaus nach der Flutkatastrophe in RLP & NRW, BMBF, 01LR2102F) beigetragen.

Anschrift der Verfasser

Dr. Heiko Apel

Dr. Li Han

Dr. Heidi Kreibich

Dr. Dung Nguyen

Dr. Nivedita Sairam

Dr. Sergiy Vorogushyn

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Sektion Hydrologie

Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Mostafa Farrag

GFZ (siehe oben) und Deltareas

Postbus 177, 2600 MH Delft

Niederlande

Prof. Dr. Bruno Merz

GFZ (siehe oben) und Universität Potsdam,

Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam

Dr. Björn Guse

GFZ (siehe oben) und Abteilung für Hydrologie

und Wasserwirtschaft

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Olshausenstr. 75, 24118 Kiel

Literaturverzeichnis

ALFIERI, L., F. DOTTORI, R. BETTS, P. SALAMON & L. FEYEN (2018): Multi-model projections of river flood risk in Europe under global warming. *Climate*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/cli6010006>

ALFIERI, L., L. FEYEN, F. DOTTORI & A. BIANCHI (2015): Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 11, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004>.

APEL, H., B. MERZ & A.H. THIEKEN (2009): Influence of dike breaches on flood frequency estimation. – *Computers and Geosciences*, 35(5), 907–923. DOI:10.1016/j.cageo.2007.11.003

APEL, H., S. VOROGUSHYN & B. MERZ (2022): Brief communication: Impact forecasting could substantially improve the emergency management of deadly floods: case study July 2021 floods in Germany. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 3005–3014. DOI:10.5194/nhess-22-3005-2022

APEL, H., J. BENISCH, B. HELM, S. VOROGUSHYN & B. MERZ (2024): Fast urban inundation simulation with RIM2D for flood risk assessment and forecasting. – *Frontiers in Water*, 6. DOI:10.3389/frwa.2024.1310182

BATES, P.D., M.S. HORRITT & T.J. FEWTRILL (2010): A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. – *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45.

BUBECK, P. et al. (2019): Global warming to increase flood risk on European railways. – *Climatic Change*, 155, 19–36.

CAMERON, D.S., K.J. BEVEN, J. TAWN, S. BLAZKOVA & P. NADEN (1999): Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). – *Journal of Hydrology*, 219, 169–187.

DE ALMEIDA, G.A.M., P. BATES, J.E. FREER & M. SOUVIGNET (2012): Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. – *Water Resources Research*, 48(5). <https://doi.org/10.1029/2011WR011570>.

DE BRUIJN, K.M., F.L.M. DIERMANSE & J.V.L. BECKERS (2014): An advanced method for flood risk analysis in river deltas, applied to societal flood fatality risk in the Netherlands. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(10), 2767–2781. DOI:10.5194/nhess-14-2767-2014.

DOTTORI, F., W. SZEWCZYK, J.C. CISCAR, F. ZHAO, L. ALFIERI, Y. HIRABAYASHI et al. (2018): Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. – *Nature Climate Change*, 8(9), 781–786. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>.

FALTER, D., K. SCHRÖTER, N.V. DUNG, S. VOROGUSHYN, H. KREIBICH, Y. HUNDECHA, ... B. MERZ (2015): Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. – *Journal of Hydrology*, 524, 182–193. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.02.021

FARRAG, M., F. BRILL, N.V. DUNG, N. SAIRAM, K. SCHRÖTER, H. KREIBICH, ... S. VOROGUSHYN (2022): On the role of floodplain storage and hydrodynamic interactions in flood risk estimation. – *Hydrological Sciences Journal*, 67, 508–534. DOI:10.1080/02626667.2022.2030058.

FÖRSTER, S., B. KUHLMANN, K.-E. LINDENSCHMIDT & A. BRONSTERT (2008). Assessing flood risk for a rural detention area. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(2), 311–322. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-311-2008>.

GRIMALDI, S., F. NARDI, R. PISCOPIA, A. PETROSELLI & C. APOLLONIO (2021): Continuous hydrologic modelling for design simulation in small and ungauged basins: A step forward and some tests for its practical use. – *Journal of Hydrology*, 595, 125664. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125664>.

GUAN, X., K. NISSEN, V.D. NGUYEN, B. MERZ, B. WINTER & S. VOROGUSHYN (2023): Multisite temporal rainfall disaggregation using methods of fragments conditioned on circulation patterns. – *Journal of Hydrology*, 621, 129640. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129640>.

GUSE, B., B. MERZ, L. WIETZKE, S. ULLRICH, A. VIGLIONE & S. VOROGUSHYN (2020): The role of flood wave superposition in the severity of large floods. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 1633–1648. DOI:10.5194/hess-24-1633-2020.

HABERLANDT, U., & I. RADTKE (2014): Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flows. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 353–365. DOI:10.5194/hess-18-353-2014.

- HUNDECHA, Y., M. PAHLOW & A. SCHUMANN (2009): Modeling of daily precipitation at multiple locations using a mixture of distributions to characterize the extremes. – *Water Resources Research*, 45, W12412. DOI:10.1029/2008WR007453.
- HUNDECHA, Y., & B. MERZ (2012): Exploring the relationship between changes in climate and floods using a model-based analysis. – *Water Resources Research*, 48, W04512. <https://doi.org/10.1029/2011WR010527>.
- KEEF, C., J.A. TAWN & R. LAMB (2013): Estimating the probability of widespread flood events. – *Environmetrics*, 24 (1), 13–21. <https://dx.doi.org/10.1002/env.2190>.
- KELLERMANN, P., K. SCHRÖTER, A.H. THIEKEN, S.-N. HAUBROCK & H. KREIBICH (2020): The object-specific flood damage database HOWAS 21. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 2503–2519. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2503-2020>.
- KIENZLER, S., I. PECH, H. KREIBICH, M. MÜLLER & A.H. THIEKEN (2015): After the extreme flood in 2002: Changes in preparedness, response and recovery of flood-affected residents in Germany between 2005 and 2011. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 505–526. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-505-2015>.
- KREIBICH, H., I. SEIFERT, B. MERZ & A.H. THIEKEN (2010): Development of FLEMOcs: A new model for the estimation of flood losses in companies. – *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(8), 1302–1314. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.529815>.
- KREIBICH, H., A.F. VAN LOON, K. SCHRÖTER et al. (2022): The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. – *Nature*, 608, 80–86. DOI:10.1038/s41586-022-04917-5.
- KRYSANOVA, V., D.I. MÜLLER-WOHLFEIL & A. BECKER (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. – *Ecological Modelling*, 106, 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00204-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00204-4).
- KUMAR, R., L. SAMANIEGO & S. ATTINGER (2013): Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. – *Water Resources Research*, 49, 360–379. <https://doi.org/10.1029/2012WR012195>.
- LAMB, R., C. KEEF, J. TAWN, S. LAEGER, I. MEADOWCROFT, S. SURENDRAN & C. BATSTONE (2010): A new method to assess the risk of local and widespread flooding on rivers and coasts. – *Journal of Flood Risk Management*, 3(4), 323–336. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01081.x>.
- MACDONALD, E., B. MERZ, B. GUSE, L. WIETZKE, S. ULLRICH, M. KEMTER, B. AHRENS & S. VOROGUSHYN (2022): Event and catchment controls of heavy tail behavior of floods. – *Water Resources Research*, 58, e2021WR031260. DOI:10.1029/2021WR031260.
- MERZ, B., S. VOROGUSHYN, U. LALL, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2015): Charting unknown waters: On the role of surprise in flood risk assessment and management. – *Water Resources Research*, 51(8), 6399–6416. DOI:10.1002/2015WR017464.
- MERZ, B., G. BLÖSCHL, S. VOROGUSHYN, F. DOTTORI, J.C.J.H. AERTS, P. ABTES, ... E. MACDONALD (2021): Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. – *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 592–609. DOI:10.1038/s43017-021-00195-3.
- MERZ, B., S. BASSO, S. FISCHER, D. LUN, G. BLÖSCHL, R. MERZ, B. GUSE, A. VIGLIONE, S. VOROGUSHYN, E. MACDONALD, L. WIETZKE & A. SCHUMANN (2022): Understanding heavy tails of flood peak distributions. – *Water Resources Research*, 58, e2021WR030506. DOI:10.1029/2021WR030506.
- METIN, A.D., N.V. DUNG, K. SCHRÖTER, S. VOROGUSHYN, B. GUSE, H. KREIBICH & B. MERZ (2020): The role of spatial dependence for large-scale flood risk estimation. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 967–979. DOI:10.5194/nhess-20-967-2020.
- MIRZA, M.M.Q. (2002): Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. – *Global Environmental Change* 12, 127–138.
- NAVEAU, P., R. HUSER, P. RIBEREAU & A. HANNART (2016): Modeling jointly low, moderate, and heavy rainfall intensities without a threshold selection. – *Water Resources Research*, 52(4), 2753–2769.
- NGUYEN, V.D., A.D. METIN, L. ALFIERI, S. VOROGUSHYN & B. MERZ (2020): Biases in national and continental flood risk assessments by ignoring spatial dependence. – *Scientific Reports*, 10(1), 19387. DOI:10.1038/s41598-020-76523-2
- NGUYEN, D., B. MERZ, Y. HUNDECHA, U. HABERLANDT & S. VOROGUSHYN (2021): Comprehensive evaluation of an improved large-scale multi-site weather generator for Germany. – *International Journal of Climatology*, 41(10), 4933–4956. DOI:10.1002/joc.7107.
- NGUYEN, D.V., S. VOROGUSHYN, K.M. NISSEN, L. BRUNNER & B. MERZ (2024) A non-stationary climate-informed weather generator for assessing of future flood risks. *ESS Open Archive*, June 03, 2024. DOI: 10.22541/essoar.171742646.65272251/v1.
- PAPROTNY, D., A. SEBASTIAN, O. MORALES-NÁPOLES & S.N. JONKMAN (2018): Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. – *Nature Communications*, 9(1), 1985. DOI:10.1038/s41467-018-04253-1.
- PAPROTNY, D., H. KREIBICH, O. MORALES-NÁPOLES, P. TEREFFENKO & K. SCHRÖTER (2020a): Estimating exposure of residential assets to natural hazards in Europe using open data. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 323–343. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-323-2020>.
- PAPROTNY, D., H. KREIBICH, O. MORALES-NÁPOLES, A. CASTELLARIN, F. CARISI & K. SCHRÖTER (2020b): Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe. – *Science of the Total Environment*, 737, 140011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140011>.
- RÖZER, V., H. KREIBICH, K. SCHRÖTER, M. MÜLLER, N. SAIRAM, J. DOSS-GOLLIN, U. LALL, & B. MERZ (2019): Probabilistic models significantly reduce uncertainty in Hurricane Harvey pluvial flood loss estimates. – *Earth's Future*, 7(4), 384–394. <https://doi.org/10.1029/2018EF001074>.
- SAIRAM, N., K. SCHRÖTER, V. RÖZER, B. MERZ & H. KREIBICH (2019): Hierarchical Bayesian Approach for Modeling Spatiotemporal Variability in Flood Damage Processes. – *Water Resources Research*, 55(10), 8223–8237. DOI:10.1029/2019wr025068.
- SAIRAM, N., F. BRILL, T. SIEG, M. FARRAG, P. KELLERMANN, V.D. NGUYEN, ... H. KREIBICH (2021): Process-Based Flood Risk Assessment for Germany. – *Earth's Future*, 9(10), e2021EF002259. <https://doi.org/10.1029/2021EF002259>.
- SAMANIEGO, L., R. KUMAR & S. ATTINGER (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. – *Water Resources Research*, 46, W05523. DOI:10.1029/2008WR007327.
- SCHOPPA, L., T. SIEG, K. VOGEL, G. ZÖLLER & H. KREIBICH (2020): Probabilistic Flood Loss Models for Companies. – *Water Resources Research*, 56(9), e2020WR027649. <https://doi.org/10.1029/2020WR027649>.
- SCHRÖTER, K., H. KREIBICH, K. VOGEL, C. RIGGELSEN, F. SCHERBAUM & B. MERZ (2014): How useful are complex flood damage models? – *Water Resources Research*, 50(4), 3378–3395. DOI:10.1002/2013wr014396.
- SCHRÖTER, K., M. KUNZ, F. ELMER, B. MÜHR & B. MERZ (2015): What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 309–327. DOI:10.5194/hess-19-309-2015.
- SIEG, T., K. VOGEL, B. MERZ & H. KREIBICH (2019): Seamless Estimation of Hydrometeorological Risk Across Spatial Scales. – *Earth's Future*, 7(5), 574–581. DOI:10.1029/2018ef001122.

- STEINHAUSEN, M., S. LÜDTKE, K. SCHRÖTER, R. FIGUEIREDO & H. KREIBICH (2020): Das probabilistische Hochwasserschadensmodell für Wohngebäude – BN-FLEMOps. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 64(4), 188-199. https://doi.org/10.5675/HyWa_2020.4_2.
- THIEKEN, A.H., A. OLSCHESKI, H. KREIBICH, S. KOBSCHE & B. MERZ (2008): Development and evaluation of FLEMOps – A new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector. – *PROVERBS*, D., C.A. BREBIA & E. PENNING-ROUSELL (Hrsg.): *Flood Recovery, Innovation and Response 1*. WIT, 315-324. <https://doi.org/10.2495/FRIAR080301>.
- VOROGUSHYN, S., B. MERZ, K.E. LINDENSCHMIDT & H. APEL (2010): A new methodology for flood hazard assessment considering dike breaches. – *Water Resources Research*, 46(8). DOI:10.1029/2009WR008475.
- WING, O.E.J. et al. (2018): Estimates of present and future flood risk in the conterminous United States. – *Environmental Research Letters*, 13, 034023.
- WÜNSCH, A., U. HERRMANN, H. KREIBICH & A.H. THIEKEN (2009): The role of disaggregation of asset values in flood loss estimation: A comparison of different modeling approaches. – *Environmental Management*, 44, 524-541.

Aktuelles

50. Jubiläum des Umweltbundesamts

Ein Blick zurück und ein Ausblick in die Zukunft: 2024 feiert Deutschland 75 Jahre Grundgesetz, 35 Jahre Mauerfall und 50 Jahre Umweltbundesamt (UBA). Seit seiner Gründung am 22. Juli 1974 hat das UBA maßgeblich zum Schutz der Umwelt beigetragen. Die Luft ist sauberer geworden, die Trinkwasserqualität hat sich deutlich verbessert und ebenso die Gesundheit der Menschen insgesamt. Zu diesem Ziel hat das Umweltbundesamt seit Beginn in vielen Facetten für eine gesunde Umwelt geforscht, beraten und informiert. Das Wissen über den Umweltschutz wurde verbessert und den Schutz der Lebensgrundlage nach und nach immer höher auf die Agenda von Politik und Gesellschaft gesetzt. Am 15. Juni 2024 feierte die Behörde nun ihr 50-jähriges Jubiläum am Hauptsitz in Dessau-Roßlau.

Das Jubiläumsfest bot ein abwechslungsreiches Programm für Groß und Klein: UBA-Fachleute aus über 50 unterschiedlichen Disziplinen informierten über aktuelle Schwerpunkte wie Klimaschutz und Klimaanpassung und boten unterschiedlichste Programmpunkte sowie Mitmach-Aktionen für Kinder und Erwachsene. Mehr als 10 Vereine aus der Region stellten zudem ihre Arbeit in und für Dessau vor. Besucher konnten mit einem Fahrradstromgenerator selbst Strom für Seifenblasen, Licht und Musik erzeugen oder mit einer Blattsammlung auf genetische Spurensuche gehen. Neben Führungen durch den im vergangenen Jahr eröffneten klimaneutralen UBA-Erweiterungsbau und das Lärmlabor gab es ein musikalisches und kulinarisches Rahmenprogramm. Außerdem konnten beschädigte Textilien unter Anleitung per Hand und mit der Nähmaschine vor Ort repariert werden: Das BUNDjugendprojekt "We Care & Repair" machte es möglich.

Das Jubiläumsfest bedeutete für das UBA eine Gelegenheit, gemeinsam auf die vergangenen 50 Jahre zurückzublicken und einen Ausblick in die Zukunft zu geben, aber auch die verschiedenen Arbeiten vorzustellen, ins Gespräch zu kommen und gemeinsam zu feiern. Vor allem sollte gezeigt werden, wie gemeinsam die Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen sind. Es geht nicht mehr nur darum, mit Grenzwerten oder Verboten bestimmter Stoffe das eine oder andere Umweltproblem in den Griff zu bekommen. Stattdessen ist ein kompletter Umbau der Gesellschaft und der Wirtschaft hin zu Klimaneutralität gefragt, in der Industrie, in der Landwirtschaft, im Verkehr, bei Gebäuden und in Städten.

Trotz der Erfolge richtet das UBA den Blick im Jubiläumsjahr auf neue gesellschaftspolitische Herausforderungen. Insbesondere ist verstärkte Zusammenarbeit erforderlich, um Umwelt- und Klimaschutz voranzutreiben. Das 50-jährige Jubiläum markiert dabei einen Meilenstein und bietet die Chance, Partnerschaften zu stärken sowie mit anderen Organisationen zusammenzuarbeiten, um globale Umweltziele zu erreichen.

Weitere Informationen:

Umweltbundesamt
www.uba.de

(aus: Pressemitteilung Umweltbundesamt vom 6. Juni 2024)

Europäisch-japanischer Satellit EarthCARE erforscht Wechselwirkungen in der Erdatmosphäre

Ob Dürre und Hitze in Südeuropa oder extreme Starkregenereignisse in Deutschland – die Sonneneinstrahlung ist die maßgebliche Größe für das Klimageschehen und die Wetterdynamik auf unserer Erde, denn sie treibt die Zirkulation in der Atmosphäre an. Diese Strahlung ist in der Lufthülle allerdings sehr unterschiedlich verteilt und tritt dort zudem noch in Wechselwirkung mit Wolken, Spurengasen und Aerosolen – Schwebeteilchen aus kleinsten festen und flüssigen Partikeln. Um in naher Zukunft noch genauere Vorhersagen machen zu können, müssen Aerosole und Wolken global besser erfasst und ihre Wechselwirkungen in der Erdatmosphäre entschlüsselt werden. Die Europäische Weltraumorganisation ESA hat daher gemeinsam mit der japanischen Raumfahrtagentur JAXA ihre bislang größte und komplexeste Earth-Explorer-Erdbeobachtungsmission gestartet. Der Erdbeobachtungssatellit EarthCARE (Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer) startete an Bord einer Falcon-9-Rakete des US-Raumfahrtkonzerns SpaceX in der Nacht auf den 29. Mai in den Orbit.

Im Detail sind auf EarthCARE vier einander ergänzende Instrumente untergebracht. Das Atmosphären-Lidar ATLID erstellt durch die Aussendung von Lichtimpulsen eines Lasers und die Analyse der reflektierten Signale ein vertikales Profil von Aerosolen und Wolken. Diese äußerst genauen Informationen sollen Vorhersagen aus Klimamodellen verbessern und das Verständnis der Rolle von Aerosolen und Wolken in der Energiebilanz unserer Erde vertiefen.

Der von JAXA bereitgestellte Wolkenprofilradar CPR (Cloud Profiling Radar) hingegen liefert detaillierte Einblicke ins Wolkeninnere – ihre vertikale Struktur und Geschwindigkeit, Partikelgrößenverteilung und Wassergehalt – um zum Beispiel der Bildung und Auflösung von Wolken auf die Spur zu kommen.

Der Multi-Spektral-Imager MSI von EarthCARE nimmt hochauflösende Bilder in mehreren Spektralbändern des sichtbaren und infraroten Lichtspektrums auf. So können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zwischen verschiedenen Arten von Wolken, Aerosolen und der Erdoberfläche unterscheiden und zudem zusätzliche Informationen über die optischen Eigenschaften von Wolken und Aerosolen erhalten, um mehr über ihre Zusammensetzung und Verteilung zu erfahren. Durch die Zusammenführung der Lidar-, Radar- und Multispektraldaten werden außerdem dreidimensionale Informationen über Wolken und Aerosole verfügbar sein.

Das Breitbandradiometer (BBR) schließlich vermisst die reflektierte Strahlung in der Atmosphäre aus drei Richtungen. So kann die Menge der reflektierten Sonnenstrahlung und der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung bestimmt werden. Diese Messungen werden mit der aus den kombinierten Beobachtungen der anderen Instrumente berechneten Strahlung zusammengeführt, was das bisherige Verständnis der Wechselwirkung zwischen Aerosolen, Wolken und Energiebilanz unseres Planeten entscheidend verbessert.

Die vier Instrumente liefern gemeinsam Informationen für insgesamt 40 verschiedene Datenprodukte, zum Beispiel zur Wolkenbildung und -klassifizierung, zur Zusammensetzung der Aerosolschicht, zum Strahlungshaushalt der Atmosphäre, aber auch zu Regen- und Schneeeigenschaften wie der genauen Tropfen- und Flockengröße. Rund die Hälfte der geophysikalischen Parameter aus den Datenprodukten werden direkt aus den Messungen eines einzelnen der vier Instrumente abgeleitet. Bei der anderen Hälfte werden diese Datenprodukte in weiterführenden Algorithmen genutzt, um synergetische geophysikalische Größen abzuleiten. Auf diese Weise unterstützen sie die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dabei, das Optimum an Information aus den eigentlichen Messungen herauszuholen. Ein Beispiel sind die vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) zur Verfügung gestellten Algorithmen zur Berechnung der Wolkenobergrenze und Aerosolparameter aus ATLID-Messdaten.

Während der sechsmonatigen "Commissioning"-Phase führt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit EarthCARE eine gemeinsame Kampagne durch, die unter Federführung des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre und des Max-Planck-Instituts für Meteorologie steht. Dafür fliegt das Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) des DLR bei vielen seiner ab August 2024 geplanten Messflüge genau unter dem EarthCARE-Satelliten, so dass die Messungen des Satelliten, des Forschungsflugzeuges und der Bodenstationen exakt vergleichbar sind und zur Validierung der Satellitendaten genutzt werden können.

Die EarthCARE-Mission ist Teil des Erdbeobachtungsprogramms FutureEO der Europäischen Weltraumorganisation ESA, in dem Deutschland Programmführer ist und sich bis heute mit mehreren hundert Mio. € beteiligt. Zusätzlich werden mehrere Mio. € aus dem Nationalen Raumfahrtprogramm bereitgestellt, um die Nutzung der EarthCARE-Daten während des Betriebs durch Forscherinnen und Forscher sowie ein Projektbüro vorzubereiten und den Betrieb durch deutsche Forschungseinrichtungen und Universitäten zu unterstützen.

Weitere Informationen:

Portal "Raumfahrt - Programm und Strategien",
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/raumfahrt/programm-und-strategie>

(aus: Pressemeldung Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt vom 29. Mai 2024)

DLR stellt aktuelle Hochwasserkarten und Lageinformationen für Einsatzkräfte zur Verfügung

Langanhaltende und starke Regenfälle sorgten ab dem 30. Mai 2024 in Süddeutschland für stark ansteigende Wasserstände. Insbesondere die Grenzregion zwischen Baden-Württemberg und Bayern war von schweren Überschwemmungen betroffen. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat in dieser Zeit die Einsatz- und Rettungskräfte zeitnah mit aktuellen Lageinformationen unterstützt, insbesondere mit Luft-

bildaufnahmen und Satellitendaten. Dazu bereitete das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) im Earth Observation Center (EOC) des DLR die Daten in Form von Hochwasserkarten und als Webanwendung auf. Diese fanden Anwendung bei Behörden und Organisationen wie dem Bayerischen Roten Kreuz (BRK), dem Technischen Hilfswerk (THW), der Deutschen Lebensrettungs-Gesellschaft (DLRG) und der Bundeswehr.

Besondere Unterstützung konnte das DLR mit hochauflösenden Aufnahmen aus der Luft leisten. Vom Standort Oberpfaffenhofen aus überflog das DLR-Forschungsflugzeug Dornier DO 228-212 beispielsweise am 3. Juni 2023 die Hochwassergebiete entlang des Donaufstreifens zwischen Günzburg und Regensburg – darunter Donauwörth, Neuburg, Manching und Kehlheim – wie auch die schwer betroffenen Gebiete Schrobenhausen und Pfaffenhofen. Am 4. Juni erstellte das DLR-Team Luftbilder von weiteren Regionen zwischen Regensburg und Passau.

Betrieben wird das Forschungsflugzeug von der DLR-Einrichtung Flugexperimente. Für die Aufnahmen aus der Vogelperspektive ist die Dornier mit dem 3K-Kamerasystem ausgestattet, das vom DLR-Institut für Methodik der Fernerkundung entwickelt wurde und Aufnahmen mit einer Auflösung von aktuell bis zu vier Zentimeter liefert. Das System ermöglichte bereits während des Elbehochwassers 2002 und zum Hochwasser in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz 2021 wertvolle Aufnahmen. Entsprechend ist es auch bei Katastrophenschutz-Übungen im Einsatz und wird für die Verkehrsforschung genutzt.

Während der Überschwemmungen Anfang Juni 2024 wurden die Datensätze und Analysen der aktuellen Kameraflüge im Donaeinzugsgebiet den Lagezentren zügig zur Verfügung gestellt. Einige Daten und Auswertungen waren auch auf der ZKI-Webseite öffentlich abrufbar. Solange die Hochwassersituation in Süddeutschland anhielt, ergänzte das ZKI die Kriseninformationen laufend durch Satellitendaten und Auswertungen. Die Ergebnisse flossen auch in das DLR-Projekt IFAS (Indicator Monitoring for Early Acquisition of Innovative Satellite Sensors in Natural Disasters) ein, das der Krisenfrüherkennung dient und zum Ziel hat, relevante Informationen noch schneller bereitzustellen.

Das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) wurde im Jahr 2004 gegründet und ist ein Service des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Schwerpunkt des ZKI sind Innovationen insbesondere rund um das Thema Erdbeobachtung im Krisenmanagement, die gemeinsam mit Nutzern erarbeitet werden. Diese Dienste können, zum Teil über ISO-zertifizierte Prozesse, auch operationell bereitgestellt werden. Ein weiterer Fokus liegt auf der Beratung und dem Training von Endnutzern beziehungsweise Servicedienstleistern.

Weitere Informationen:

Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI)
<https://www.dlr.de/de/zki>

(aus: Pressemeldung Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt vom 5. Juni 2024)

Nach der Flut ist vor der Flut – Impulspapier für Umgang mit Starkregen- und Sturzflutereignissen

Was tun, wenn Überflutungen Städte unter Wasser setzen und ganze Landstriche verwüsten oder Dürre zu massiven Ernteauffällen führt? Seit dem Jahr 2022 erforschen Wissenschaftler in der Fördermaßnahme "Wasser-Extremereignisse" (WaX) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), wie die Auswirkungen von Wasserextremen auf die Gesellschaft und den natürlichen Lebensraum begrenzt werden können. Jetzt wurden die gesammelten Erkenntnisse der praxisnahen und fachübergreifenden Forschung zu Starkregen und Sturzfluten in einem Impulspapier veröffentlicht – von besseren Vorhersagen bis zu nötigen Umgestaltungen von Stadt- und Landschaftsräumen, um die Wassermassen möglichst schadfrei abzuleiten und den Wasserrückhalt zu optimieren.

Bilder von gebrochenen Deichen, überfluteten Straßen, vollgelaufenen Kellern und Rettungskräften im Dauereinsatz: Im Frühjahr 2024 haben intensive, langanhaltende Regenfälle zu großflächigen Überflutungen geführt – zuerst im Saarland und Rheinland-Pfalz, dann in weiten Teilen Süddeutschlands. Doch auch abseits von Gewässern können kurze, intensive Starkregen Überflutungen mit hohen Schäden verursachen. Insbesondere im urbanen Raum, wo die Besiedlungsdichte hoch und die Böden großflächig versiegelt sind, oder in Hanglagen können gefährliche Sturzfluten entstehen. In Erinnerung geblieben sind die Ereignisse in Münster im Jahr 2014 oder in Braunsbach und Simbach 2016.

Aufgrund ihrer hohen Dynamik sind Starkregenereignisse, die häufig in Verbindung mit Gewittern auftreten, schwer vorhersehbar. Neue Verfahren können dazu beitragen, das tatsächlich abfließende Wasser und daraus resultierende Schäden besser und in Echtzeit abzuschätzen. Benötigt werden neue Anpassungsmaßnahmen in den Kommunen, die schnell abfließendes Wasser gezielt zurückhalten, auffangen und möglichst schadfrei abführen können, beispielsweise blau-grüne Infrastrukturen, aber auch technische Lösungen, wie Regenwasserrückhaltebecken.

Durch den Klimawandel nehmen Intensität und Häufigkeit von Starkregen zu. Sie können grundsätzlich jeden Ort in Deutschland treffen. In dem Impulspapier wurden nun aktuelle Erkenntnisse für einen nachhaltigen und vorsorgenden Umgang mit Starkregen- und Sturzflutereignissen zusammengefasst, die aus dem WaX-Fördermaßnahme hervorgegangen sind. Anhand von sechs Punkten werden unter anderem praxisnahe, digitale Anwendungstools vorgestellt, die Städte und Kommunen beim Umgang mit Starkregengefahren unterstützen sollen.

So können naturbasierte dezentrale Wasserrückhaltmaßnahmen, wie die Renaturierung von Gewässerläufen, Abflussspitzen mildern und die Grundwasserneubildung fördern. Auch im städtischen Raum verzögern sogenannte blau-grüne Infrastrukturen, wie begrünte Dächer, Baumrigolen oder Versickerungsmulden, den Oberflächenabfluss. Das Kanalnetz kann dort durch eine flexible und vorausschauende Steuerung besser ausgelastet werden. Als ergänzende Maßnahme für extreme Starkregenfälle kann der urbane Straßenraum selbst genutzt und Wassermassen über sogenannte Notabflusswege möglichst schadfrei abgeleitet

werden. Neue Verfahren ermöglichen zudem genauere Niederschlagsvorhersagen für Starkregenereignisse, die beispielsweise in Kombination mit Bodenfeuchte oder Gefälle Vorhersagen zu den tatsächlichen Überflutungen erlauben. Alternative Ansätze für eine bessere Risikokommunikation ergänzen die Maßnahmen, um das Bewusstsein zum Umgang mit Wasserextremen zu schärfen.

Zielgruppe des Impulspapiers sind die kommunale Verwaltung und Wasserbehörden sowie privatwirtschaftliche und öffentliche Akteure, die auf kommunaler und regionaler Ebene tätig sind, wie Abwasserbetriebe, Wasserverbände oder Planungsbüros.

Die Fördermaßnahme WaX ist im Bundesprogramm "Wasser: N – Forschung und Innovation für Nachhaltigkeit" angesiedelt, das Teil der BMBF-Strategie "Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)" ist.

Weitere Informationen:

Projektseite zur Fördermaßnahme "WaX – Wasser – Extremereignisse"

<https://www.bmbf-wax.de/>

WaX-Impulspapier: Starkregen und Sturzfluten

https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/WaX-Impulspapier_Starkregen-Sturzfluten.pdf

Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam

<https://www.uni-potsdam.de/de/umwelt/>

Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.

<https://dkkv.org/>

(aus: Medieninformation Universität Potsdam vom 18. Juni 2024)

Online-Tool "Risikosensitivität – Schadenbringende Hochwasser im Klimawandel" der Universität Bern

Die Hochwasser Anfang Juni 2024 haben in der Schweiz nur punktuell zu Schäden geführt. Wenn jedoch in Schweizer Flüssen und Seen wegen der Klimaveränderung künftig mehr Wasser abfließt als bei den bisher größten Hochwassern, können die Schäden stark und sprunghaft ansteigen. Dies zeigen Berechnungen des Mobilair Labs für Naturrisiken an der Universität Bern mit einem neuen Tool, das Fachleute bei der Prävention unterstützt.

Dass sich die Klimaveränderungen, insbesondere zunehmende Starkniederschläge, auch auf Hochwasser auswirken, scheint offensichtlich. Doch wie genau das geschieht, war bis jetzt wissenschaftlich nicht geklärt. Erstmals konnte nun das Mobilair Lab für Naturrisiken an der Universität Bern zeigen, in welchem Ausmaß sich die Klimaveränderung in der Schweiz auf Hochwasserschäden auswirkt und welche Gewässer an welchen Abschnitten besonders stark reagieren. Diese Aussagen ermöglicht ein im Lab entwickeltes Online-Werkzeug, das sich an Fachleute in den Bereichen Naturgefahren und Bevölkerungsschutz sowie an Behörden richtet.

Das Tool "Risikosensitivität – Schadenbringende Hochwasser im Klimawandel" liefert Antworten auf Fragen wie: Wie verändern

sich die Schäden in einem Gewässerabschnitt, wenn sich der Abfluss durch die Klimaveränderung erhöht? Wie viele Personen oder Arbeitsplätze sind betroffen, wenn der See- oder Flusspegel ansteigt? Was passiert, wenn die bisher maximal gemessenen Abflüsse übertroffen werden? Diese Erkenntnisse sind für die ganze Gesellschaft relevant. Für eine effiziente Prävention braucht es genau solche quantitativen Informationen. Nur so können an den Schwachstellen vorzeitig geeignete Maßnahmen ergriffen und die vorhandenen Ressourcen optimal eingesetzt werden.

Im wissenschaftlichen Kontext eingesetzt, liefert das Tool spezifische Aussagen zu den Veränderungen von Hochwassern als Folge der Klimaveränderung in der Schweiz. Die wichtigsten Erkenntnisse: Auch wenn die Hochwasser nur leicht über die bekannten Höchstwerte hinausgehen, steigen die Schäden sprunghaft an. Eine durch die Klimaveränderung verursachte Zunahme der Spitzenabflüsse führt zu einer deutlich höheren Zunahme an Schäden. Ausgehend vom bisher größten beobachteten Hochwasser steigen so etwa die Gebäudeschäden bei einem Mehrabfluss von 10 % durchschnittlich um mehr als 40 %. Bei 20 % Mehrabfluss wachsen die Schäden sprunghaft um 80 % an.

Die zu erwartenden Schäden unterscheiden sich allerdings entlang eines Flusses und von Gewässer zu Gewässer durchaus stark. Nicht alle Abschnitte reagieren gleich empfindlich auf größere Hochwasser. So können die Schäden lokal um über das Doppelte ansteigen. Aus dieser differenzierten Analyse lassen sich kritische Stellen entlang des Gewässers identifizieren. Der Bevölkerungsschutz beispielsweise findet so wertvolle Informationen. Bei allen lokalen Unterschieden scheint allerdings klar, dass es in der Schweiz zu bisher nicht aufgetretenen Hochwasserständen kommen wird. Fachleute gehen davon aus, dass wegen der Klimaveränderung mit Mehrabflüssen von 10 % bis 20 % zu rechnen ist.

Das Tool *"Risikosensitivität – Schadenbringende Hochwasser im Klimawandel"* soll in erster Linie zu einem besseren Umgang mit den Folgen der Klimaveränderung beitragen. Beim Hochwasserrisikomanagement lassen sich nun Prioritäten setzen, und dies nach einheitlicher Methodik für ganze Schweiz. Für Flussabschnitte, die gemäß dem neuen Tool als besonders gefährdet identifiziert würden, gilt es nun, Maßnahmen im Hochwasserschutz rasch umzusetzen.

Im Bereich Hochwasser ergänzt das Mobiliar Lab an der Universität Bern die traditionelle Forschung zu Naturgefahren um den Aspekt der Schäden. Seit dem Jahr 2018 werden in diversen Projekten insbesondere Entscheidungshilfen für das Hochwasserrisikomanagement erarbeitet. Ausgangsfrage ist dabei oft, was über den bisherigen Erfahrungshorizont hinaus auch noch geschehen könnte. Insgesamt stehen auf der Plattform des Labs 7 praxisnahe Tools zur Verfügung, die Kantons- und Gemeindebehörden, weitere Fachleute und auch die Bevölkerung dabei unterstützen, Hochwasserrisiken zu erkennen und so Schäden zu minimieren. Zudem ermöglichen es die Tools, Schutzmaßnahmen zu dimensionieren und risikobasiert zu priorisieren. Das neue Werkzeug bezieht nun erstmals die Folgen der Klimaveränderung in diese Risiko- und Schadenüberlegungen mit ein. Es legt dadurch die Grundlagen für ein Hochwasserrisikomanagement, das auch künftigen Anforderungen genügt. Zudem erlaubt es Prognosen und Analysen – bis zum lokalen Maßstab – für die

nicht mehr allzu ferne Zeit, wenn Hochwasser wegen der Klimaerwärmung häufiger auftreten werden.

Das Mobiliar Lab für Naturrisiken ist eine gemeinsame Forschungsinitiative des Oeschger-Zentrums für Klimaforschung der Universität Bern und der Mobiliar-Versicherung. Untersucht werden in erster Linie die an Hagel, Hochwasser und Sturm beteiligten Prozesse und die Schäden, die daraus entstehen. Das Mobiliar Lab an der Universität Bern arbeitet an der Schnittstelle von Wissenschaft und Praxis und strebt Resultate mit hohem Nutzen für die Allgemeinheit an. Die Unterstützung durch die Versicherung ist Teil des Gesellschaftsengagements der Mobiliar Genossenschaft.

Weitere Informationen:

Portal "Hochwasserrisiken gehen uns alle an",
Universität Bern/Oeschger Zentrum
www.hochwasserrisiko.ch

Mobiliar Lab for Natural Risks, Universität Bern
www.mobiliarlab.unibe.ch

(aus: Medienmitteilung Universität Bern vom 6. Juni 2024)

Klimawandel: Steigende Temperaturen beeinträchtigen Grundwasserqualität

Grundwasser bildet das größte ungefrorene Süßwasserreservoir der Welt und ist für das Leben auf der Erde von entscheidender Bedeutung. Wie sich die globale Erwärmung auf dessen Temperatur auswirkt und was das für Mensch und Natur bedeutet, haben Forschende des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) jetzt untersucht. Die Studie zeigt, dass bis zum Jahr 2100 voraussichtlich mehr als 75 Mio. Menschen in Gebieten leben werden, in denen das Grundwasser den höchsten vom jeweiligen Land festgelegten Grenzwert für die Trinkwassertemperatur überschreitet.

Das Klimasystem erwärmt sich aufgrund der erhöhten Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, welche die Wärmeabstrahlung einschränken. Einen großen Teil dieser Wärme nehmen die Ozeane auf, aber auch Böden und das Grundwasser wirken als Wärmesenken. Bisher ist jedoch wenig darüber bekannt, wie sich diese Erwärmung der Erdoberfläche räumlich und zeitlich auf das Grundwasser auswirkt. Um die Lücke zu schließen, haben die KIT-Forschenden die prognostizierten Veränderungen der Grundwassertemperatur bis zum Jahr 2100 auf globaler Ebene ermittelt. Sie stellen außerdem globale Temperaturkarten für Grundwasser in verschiedenen Tiefen unter der Erdoberfläche zur Verfügung. Diese zeigen, dass an Orten mit flachem Grundwasserspiegel und/oder hoher atmosphärischer Erwärmung weltweit die höchsten Grundwassererwärmungsraten zu erwarten sind.

Die Forschenden beziehen sich auf die Klimaszenarien "SSP2-4.5" und "SSP5-8.5". Diese Szenarien beschreiben verschiedene sozio-ökonomische Entwicklungen sowie unterschiedliche Verläufe des atmosphärischen Treibhausgasgehalts in der Zukunft. SSP2-4.5 stellt dabei etwa die Mitte der möglichen zukünftigen Treibhausgasentwicklungen dar, SSP5-8.5 den oberen Rand. Die Studie zeigt, dass die Grundwassertemperaturen bis zum Jahr 2100

um 2,1 °C nach SSP2-4.5 und um 3,5 °C nach SSP5-8.5 ansteigen werden.

Schon heute leben rd. 30 Mio. Menschen in Gebieten, in denen das Grundwasser wärmer ist, als die strengsten Richtlinien für Trinkwasser vorgeben. Das bedeutet, dass das Wasser dort nicht bedenkenlos direkt getrunken werden kann, sondern zum Beispiel abgekocht werden muss. Denn auch das Trinkwasser in den Wasserleitungen wird durch die Wärme im Boden aufgeheizt. Je nach Klimaszenario werden bis zum Jahr 2100 bis zu mehrere Hundert Millionen Menschen betroffen sein. Nach SSP2-4.5 steige die Zahl auf 77 bis 188 Mio. Menschen, nach SSP5-8.5 auf 59 bis 588 Mio. an, so die Studie. Die starken Schwankungen hängen mit der räumlichen Variabilität des Klimawandels und der Bevölkerungsentwicklung zusammen. Die geringsten Erwärmungsraten prognostizieren die Forschenden für Gebirgsregionen mit tief liegendem Grundwasserspiegel wie die Anden oder die Rocky Mountains.

Die Temperatur des Grundwassers spielt eine entscheidende Rolle für die Wasserqualität. Sie beeinflusst eine Vielzahl chemischer, biologischer und physikalischer Prozesse. Wenn die Bedingungen dafür zusammenkommen, können steigende Grundwassertemperaturen indirekt dazu führen, dass sich schädliche Stoffe wie Arsen oder Mangan im Grundwasser anreichern. Solche erhöhten Konzentrationen wirken sich negativ auf die menschliche Gesundheit aus, insbesondere wenn das Grundwasser als Trinkwasserquelle genutzt wird. Zudem beeinflusst wärmeres Grundwasser den Temperaturhaushalt von Flüssen und grundwasserabhängigen Ökosystemen, aquatische biogeochemische Prozesse und das geothermische Potenzial. Dies stellt eine Herausforderung für die biologische Vielfalt dar und birgt das Risiko, dass Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe gestört werden.

Darüber hinaus ist es möglich, dass die erhöhten Temperaturen im oberflächennahen Boden und im Grundwasser kritische Schwellenwerte in den Wasserverteilungsnetzen überschreiten. Dies könnte gesundheitliche Folgen haben, beispielsweise durch das Wachstum von Krankheitserregern wie Legionellen (*Legionella* spp). Auch Fischarten, insbesondere der Lachs, sind von den veränderten Bedingungen betroffen. Laichplätze in Flüssen, die auf das Grundwasser angewiesen sind, könnten durch die Erwärmung zu warm werden und so die Fortpflanzung gefährden. Die Ergebnisse der KIT-Wissenschaftler zeigen, wie wichtig es ist, Maßnahmen zum Schutz der Grundwasserressourcen zu ergreifen und nachhaltige Lösungen zu finden, um den negativen Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser entgegenzuwirken.

Fachartikel:

Benz, S.A., D.J. Irvine, G.C. Rau, P. Bayer, K. Menberg, P. Blum, R.C. Jamieson, C. Griebler & B.L. Kurylyk (2024): Global groundwater warming. – *Nature Geoscience*.
DOI: 10.1038/s41561-024-01453-x.

Weitere Informationen:

Portal "Klima und Umwelt", Karlsruher Instituts für Technologie
<https://www.kit.edu/themen/klima-und-umwelt.php>

(aus: Pressemitteilung Karlsruher Institut für Technologie vom 4. Juni 2024)

Fortschrittliche Deichsysteme zum Schutz vor Überschwemmungen und Hochwasser

Die Projektpartner des EU-Projekts MULTICLIMACT haben das Ziel, Initiativen zur Klimaresilienz voranzutreiben. In dem Vorhaben werden innovative Strategien und Technologien sowie ein Toolkit mit 18 zuverlässigen und leicht umsetzbaren Methoden und digitalen Lösungen entwickelt, um die Widerstandsfähigkeit unserer Stadtlandschaften zu verbessern.

Bei einem kürzlich veranstalteten Projekttreffen in Delft/Niederlande fand auch eine Besichtigung des Testgeländes Flood Proof Holland und des Tederdingerbroekpolder-Deichs in Leidschendam statt. Dabei handelt es sich um einen der lokalen Demonstrationsstandorte, an denen innovative Hochwasserschutztechnologien vorgeführt werden. Die Partner des Konsortiums hatten die Möglichkeit, fortschrittliche Deichsysteme zum Schutz vor Überschwemmungen und immer heftigeren Wetterereignissen zu besichtigen. Diese Besuche vor Ort unterstrichen die praktischen Auswirkungen des MULTICLIMACT-Projekts und sein Potenzial, skalierbare Lösungen für verschiedene Regionen anzubieten.

Die TU Delft spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle bei der Entwicklung, Erprobung und Demonstration faseroptischer Sensorik, die zur Überwachung und Frühwarnung bezüglich des baulichen Zustands von festen und beweglichen Hochwasserschutzanlagen einsetzbar ist. Diese Technik unterstützt Wissenschaft und Politik dabei, die Wirkung von klimatischen Schocks und Belastungen wie Hochwasserereignissen, Regenschauern und Dürreperioden auf Deiche einzuschätzen.

In den kommenden Monaten wird das Projekt MULTICLIMACT seine Arbeit mit innovativen Maßnahmen an vier verschiedenen Demonstrationsstandorten in den Niederlanden, Italien, Spanien und Lettland fortsetzen. Gesamtheitlich zielt das Projekt darauf ab, die bebauten Umwelt in Europa vor den zunehmenden Bedrohungen durch Natur- und Klimagefahren zu schützen. Durch den Zusammenschluss von 25 führenden europäischen Organisationen soll MULTICLIMACT die Widerstandsfähigkeit, Nachhaltigkeit und Sicherheit von Gemeinden auf dem gesamten Kontinent verbessern. Innovative Strategien, darunter ein Toolkit mit 20 zuverlässigen Methoden und digitalen Lösungen, decken den dringenden Bedarf an Anpassungsmaßnahmen gegen Überschwemmungen, Erdbeben, extreme Wetterbedingungen und Hitzewellen.

Das Vorhaben MULTICLIMACT wurde an vier Pilotstandorten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen getestet und verkörpert eine gemeinsame Vision für eine sicherere, widerstandsfähigere Zukunft, die sich auf Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen des Klimawandels auf die bebauten Umwelt konzentriert. Als Projektpartner übernimmt das Steinbeis Europa Zentrum die Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit. Dafür werden neben den Platzierungen von wissenschaftlichen Publikationen auch eine breitgefächerte Social Media Kampagne implementiert, mehrsprachiges Kommunikationsmaterial entwickelt und Aktivitäten wie Webseminare und Networking Events durchgeführt.

Weitere Informationen:

Homepage EU-Projekt MULTICLIMACT
<https://multiclimact.eu/>

(aus: Pressemitteilung Steinbeis Europa Zentrum vom 2. Mai 2024)

Wirkungsorientiertes Vorhersagesystem zur besseren Frühwarnung vor Hochwasser

Extremereignisse wie beispielsweise Hochwasser werden durch den Klimawandel häufiger. Dies verstärkt die Notwendigkeit, Methoden zur genaueren und schnelleren Hochwasservorhersage zu entwickeln, um die Bevölkerung künftig besser zu schützen. Ein Forschungsteam des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) hat ein Hochwasservorhersagesystem entwickelt, das rechtzeitig nicht nur Wasserstände an Pegeln, sondern auch dynamische hochaufgelöste Überflutungskarten bereitstellt. Den Forschenden gelang es, verschiedene Vorhersagemodelle so zu verknüpfen, dass die Folgen einer Überschwemmung präzise bis auf das Niveau einzelner Gebäude prognostiziert werden können.

In der räumlichen und zeitlichen Vorhersage von Hochwasserereignissen hat es in den vergangenen Jahren große Fortschritte gegeben. So ist es derzeit möglich, Hochwasserstände an einzelnen Pegeln vorherzusagen. Welche Auswirkungen Überschwemmungen für Städte und Gemeinden, aber vor allem für die Menschen im Unterlauf von Flüssen haben können, konnte bisher allerdings nur grob oder sogar fehlerhaft abgeschätzt werden. Diese Präzision ist jedoch entscheidend, weil die betroffene Bevölkerung möglichst schnell vorab informiert werden muss, um gegebenenfalls Evakuierungsmaßnahmen einzuleiten. Es bräuchte ein mit dem neuesten Stand der Technik ausgestattetes Hochwasserfrühwarnsystem, das rechtzeitig hochauflösende Überschwemmungsvorhersagen liefert und angibt, welche Auswirkungen das Hochwasser auf einzelne Gebäude hat. Dies würde die Grundlage für das Krisenmanagement entscheidend verbessern.

Für das neue Hochwasservorhersagesystem kombinierten die Forschenden der beiden Helmholtz-Zentren in einem ersten Schritt die Niederschlagsvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes, DWD (NWP limited area ensemble prediction system) mit dem am UFZ entwickelten hydrologischen Modellsystem mHM (mesoscale Hydrologic Model). Dieses Modell liefert nicht nur Informationen zum Wasserabfluss, sondern auch zum zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte – einer der entscheidenden Faktoren für die Entwicklung von Hochwasser. Anhand der vorliegenden Daten zur Hochwasserkatastrophe im Ahrtal im Juli 2021 gelang es ihnen im Nachgang, anhand eines Ensembles von 20 Vorhersagemodellen die Höhe der Flutwelle für den Pegel Altenahr stündlich zu prognostizieren. Zudem konnten sie die Wahrscheinlichkeit berechnen, ob ein 50- und ein 100-jährliches Hochwasser eintreten.

Die Modellierung ergab, dass 47 Stunden und damit fast zwei Tage vor dem Eintreffen der Flutwelle im Ahrtal 15 % der Modelle ein 100-jährliches Hochwasser prognostiziert hätten. Je näher das Ereignis kam, umso wahrscheinlicher wurde, dass die zu dem Zeitpunkt festgelegte Jahrhundertmarke tatsächlich überschrit-

ten wird: So sagten 75 % aller Modelle 17 Stunden vor der Flutwelle das Jahrhunderthochwasser voraus, sieben Stunden davor waren es schließlich 100 %. Wenn 75 % der Vorhersagen in einem Ensemble ein Jahrhunderthochwasser anzeigen, ist es folglich sehr wahrscheinlich, dass es eintritt.

Im zweiten Schritt verknüpften die Helmholtz-Forschenden das hydrologische Modellsystem mHM mit dem hydrodynamischen Hochwassermodell RIM2D, das das GFZ Potsdam entwickelt hat. Das Hochwassermodell RIM2D simuliert in sehr kurzer Zeit die Ausbreitung von Überflutungsflächen und die dynamische Entwicklung von Überflutungstiefen. Erst dieses Modell mit einer räumlichen Auflösung von 10 Meter x 10 Meter macht es möglich, stündlich vorherzusagen, bis zu welcher Höhe das Wasser Flächen überflutet – und damit, in welcher Ortschaft welche Gebäude, Straßen, Eisenbahnstrecken, Krankenhäuser oder sonstige kritische Infrastrukturen wie stark vom Hochwasser betroffen sind. Zuständige Behörden und die Bevölkerung haben so nicht nur Informationen über einen möglichen Pegelstand vorliegen, in diesem Fall für 30 km am Flussoberlauf, sondern auch eine detaillierte Überflutungskarte, die zeigt, welche Auswirkungen das Hochwasser hat. So könnten sie beispielsweise wissen, wo und welche Personen in Gefahr sein könnten oder wer evakuiert werden muss.

Für die Rekonstruktion des extremen Hochwasserereignisses im Ahrtal hat das kombinierte Vorhersagemodell des UFZ und des GFZ den ersten Test bestanden. Ab dem Sommer wird die automatisierte Modellkette im Rahmen der Helmholtz-Klima-Initiative in einer weiteren Testphase in zwei weiteren Einzugsgebieten an der Fils und an der Murr in Baden-Württemberg in Echtzeit erprobt. Besteht das Modellsystem auch diese Phase, wäre es aus Sicht der Wissenschaftler für Regionen mit einer erhöhten Hochwassergefahr, insbesondere als Folge von Sturzfluten, anwendbar. Damit könnte es bestehende Hochwasserfrühwarnsysteme entscheidend ergänzen und den inhaltlichen Horizont der Vorhersagen um die Auswirkungen durch das Hochwasser erweitern. Dies könnte Personen- und Sachschäden künftig erheblich reduzieren.

Fachartikel:

Pallav, H.N., K. Shrestha, O. Rakovec, H. Apel, S. Vorogushyn, R. Kuma, S. Thober, B. Merz, L. Samaniego (2024): High-Resolution Impact-based Early Warning System for Riverine Flooding. – Nature Communications, Article number 3726 (2024).
 DOI: 10.1038/s41467-024-48065-y

Weitere Informationen:

Portal "Helmholtz Klima Initiative"
<https://www.helmholtz-klima.de>

(aus: Pressemitteilung Deutsches GeoForschungsZentrum vom 13. Mai 2024)

Ziele im Hochwasser- und Gewässerschutz durch Agroforstpartnerschaften erreichen

Agroforstsysteme bieten ländlichen Kommunen die Möglichkeit, den Hochwasser- und Gewässerschutz mit der Wärmewende zu verbinden. Kommunen könnten sich dementsprechend als Schlüsselakteure bei der Ausweitung der Agroforstwirtschaft

erweisen, indem sie die Chancen dieses Ansatzes erkennen und sich mit Landwirten als wichtigen neuen Kooperationspartnern zusammenschließen.

Im Modell- und Demonstrationsvorhaben (MuD) AGROfloW wollen zwei Forschungseinrichtungen deshalb Partnerschaften zwischen Kommunen und Landwirtschaft ins Leben rufen, um Agroforstsysteme zur Erreichung wasserbezogener Ziele umzusetzen. Beteiligt sind das Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS) der Universität Trier und die Forschungsgruppe Wasser (FG Wasser) der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes; sie begleiten die Etablierung der Agroforstflächen und deren weitere Entwicklung wissenschaftlich. Gefördert wird das Vorhaben AGROfloW vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Hochwasserschutz, Dürreschutz und die Erreichung der Ziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) sind originäre kommunale Aufgaben. Gleichzeitig können die Kommunen dadurch, dass sie die Holzproduktion in die Pläne integrieren, potenziell leichter Flächen für diese Ziele akquirieren. Das geerntete Holz wiederum trägt zu einer sicheren und klimafreundlichen Energieversorgung bei und erhöht zugleich die kommunale Wertschöpfung. Im Vorhaben AGROfloW wollen die Forschenden vor diesem Hintergrund Agroforst-Partnerschaften zwischen Landwirten und Kommunen initiieren und Demonstrationsflächen als Anschauungsobjekte und Lernorte anlegen.

Eine dieser Demoflächen wird in der Gemeinde Lossatal in Sachsen liegen, dort steht die Renaturierung des aktuell komplett verrohrten Tauchnitzgrabens auf der Agenda. Im Uferbereich sollen 7,3 ha mit Agroforstkulturen bepflanzt werden, davon auf rd. Zweidrittel der Fläche leistungsorientierte und auf rund einem Drittel naturnahe Kulturen. Das geerntete Holz ist als Energieholz zur Versorgung eines kommunalen Nahwärmetzes vorgesehen.

Im rheinland-pfälzischen Mittelgebirge sind an der Glan und am Odenbach Gehölze zum Erosions- und Hochwasserschutz geplant, sowohl zur landwirtschaftlichen Nutzung, als auch zum Teil für die Holzgewinnung. Auch im bayerischen Alpenvorland und im Saarland liegt der Fokus der Flächen auf der Kombination Starkregenprävention und Energieholz.

Auf allen Demoflächen findet eine intensive Beforschung unter verschiedenen Aspekten statt. Dazu zählen pflanzenbauliche Fragen, eine Quantifizierung der Hochwasser- und Erosionsschutzleistungen und die Entwicklung eines entsprechenden Modellierungs-Tools, die Ökonomie sowie die Analyse der rechtlichen und förderrechtlichen Rahmenbedingungen.

Als Agroforstsystem bezeichnet man die Kombination von Gehölzen (insbesondere Bäume, aber auch Sträucher) mit Ackerkulturen auf einer Fläche. Häufig werden beide Kulturen streifenförmig im (räumlichen) Wechsel angebaut. Aber auch die verstreute Anordnung der Gehölze auf der Fläche ist möglich. Das Holz der Bäume wird als Brenn- oder Wertholz genutzt, Früchte und Blätter als Nahrungs- oder Futtermittel.

Verschiedene wasserbezogene Ziele lassen sich in Kombination mit Agroforstsystemen besser erreichen. Im Uferbereich verringern die Baumreihen den Eintrag von Sedimenten, Nähr- und

Schadstoffen in die Gewässer. In hängigem Gelände reduzieren sie insbesondere nach Starkregen die Fließgeschwindigkeit des Regenwassers. Durch ihre größere Durchwurzelungstiefe und das erhöhte Porenvolumen steigern sie die Infiltration von Regenwasser in Boden und Grundwasser und verringern den schnellen Abfluss und Verlust der wertvollen Ressource über die Wasserläufe. Denn einmal von diesen aufgenommen, fließt alles Wasser schlussendlich in Nord- und Ostsee und ins Schwarze Meer und kann tiefere Bodenschichten und das Grundwasser nicht mehr erreichen.

Mit den Gehölzstreifen des Agroforstsystems lassen sich Pufferstreifen an Gewässern, die Landwirte nach der aktuellen Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) einhalten müssen, oder Hochwasser-Rückhaltmaßnahmen kombinieren. So bringen sie den Landwirten Einkommen und erfahren dadurch eine größere Akzeptanz als reine Schutzflächen ohne Nutzung. Sträucher und Bäume sind zudem ein wichtiges Element einer naturnahen Ufergestaltung und unterstützen die Renaturierung von Bächen und Flüssen sowie den Biotopverbund. Insbesondere die Verschattung von kleineren Gewässern wird bei immer höheren Temperaturen lebenswichtig für Pflanzen und Tiere.

Nicht zuletzt tragen Agroforstsysteme so auch zu den Zielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) bei, die einen guten ökologischen und chemischen Zustand der Oberflächengewässer sowie einen guten chemischen und mengenmäßigen Zustand im Grundwasser anstrebt.

Weitere Informationen:

Projektverzeichnis Verbundvorhaben: Modell- und Demonstrationsvorhaben Agroforstwirtschaft als integrierte Lösung für Klimaanpassung, Rohstoffherzeugung und Wassermanagement <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=2222NR067B>

(aus: Pressemitteilung Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe vom 5. Juni 2024)

Projekt zur Etablierung von Auenlandschaften im städtischen Umfeld

Auen gehören nicht nur zu den artenreichsten Lebensräumen in Mitteleuropa. Sie verbessern auch die Wasserqualität und leisten einen wichtigen Beitrag zum Hochwasser- und Klimaschutz. Allerdings hat der Mensch viele Flusslandschaften so stark verändert, dass sie diese wichtigen Leistungen nur noch eingeschränkt oder gar nicht mehr erbringen können. Das kürzlich abgeschlossene Projekt "Lebendige Luppe" zeigt, wie solche Auen selbst in Großstädten wieder zu lebendigen und funktionsfähigen Ökosystemen werden können. Ein Team des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und der Universität Leipzig hat das Vorhaben zwischen Leipzig und Schkeuditz wissenschaftlich begleitet.

Die Luppe, ein Nebenfluss der Weißen Elster, teilt den Zustand vieler Flüsse in Mitteleuropa. Früher hat sie regelmäßig große Auenwälder zwischen Leipzig und Halle unter Wasser gesetzt. In einer breiten Talaue wanden sich Gewässerläufe durch eine artenreiche Naturlandschaft, die vom Wechsel der Wasserstände lebte. Es gab dort feuchte Wiesen und Wälder, Tümpel und Altarme – ein Mosaik von Lebensräumen für die unterschiedlichsten Ansprüche. Von dieser Vielfalt aber ist nur noch ein

Bruchteil übriggeblieben. Das liegt daran, dass man das Gewässersystem ab dem 19. Jahrhundert komplett umgestaltet hat. Der Fluss wurde begradigt, reguliert und eingedeicht, Teile seiner Aue wurden trockengelegt und aufgeschüttet. In Leipzig entstanden Stadtviertel auf ehemaligen Überschwemmungsflächen. Ein neu gebauter, kanalähnlicher Wasserlauf sollte Hochwasser so schnell wie möglich abtransportieren. Diese "Neue Luppe" hat ehemalige Flussläufe durchschnitten, so dass sie dem Auenwald nun kein Wasser mehr liefern können. Der Aue fehlt damit ihre Lebensgrundlage, ihre Funktionsfähigkeit und ihr Artenreichtum sind bedroht.

Das zu ändern, war das Ziel des Projekts "Lebendige Luppe". Seit dem Jahr 2012 haben die Städte Leipzig und Schkeuditz, der sächsische Landesverband des Naturschutzbunds (NABU), das UFZ und die Universität Leipzig daran gearbeitet, Wege aufzuzeigen, um der Auenlandschaft zwischen Leipzig und Schkeuditz wieder ein naturnäheres Gesicht zu verleihen. Profitieren sollen von den Maßnahmen nicht nur die reiche Tier- und Pflanzenwelt der Auen, sondern auch der Mensch. Denn einen besseren Dienstleister als eine intakte Flusslandschaft könnte man sich kaum wünschen. So gelten diese Ökosysteme als Nieren der Landschaft, die überschüssigen Stickstoffdünger und andere Belastungen aus dem Wasser filtern. Zudem betätigen sich Auenwälder als natürliche Klimaschützer, die größere Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid binden als andere Wälder. Und sie helfen auch dabei, die spürbaren Folgen des Klimawandels zu mildern.

So ein Auenwald wirkt wie ein Kühltank, der die Temperaturen an heißen Tagen deutlich senken kann. Wichtig ist zudem der Einfluss auf den Wasserhaushalt, denn Auen saugen sich voll wie ein Schwamm und halten so das Wasser länger in der Landschaft. Das hilft den Pflanzen, Dürresommer besser zu überstehen. Und wenn das nächste Hochwasser kommt, tritt der Fluss über die Ufer und überschwemmt Wald und Wiesen. Das ist eine der wirksamsten Vorsorgeoptionen gegen Hochwasserschäden, denn ein Großteil des Flusswassers verbleibt in der Aue.

Naturnahe Flusslandschaften bieten gute Möglichkeiten, gleichzeitig etwas für die Artenvielfalt, das Klima und den Hochwasserschutz zu tun. Deshalb gehören sie zu den Ökosystemen, die in Deutschland verstärkt geschützt und wiederhergestellt werden sollen. So sieht es das "Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz" vor, welches vom Bundesumweltministerium Ende März 2023 vorgestellt wurde. Denn so wertvolle Leistungen Deutschlands Auen auch bringen könnten: Derzeit sind sie weit entfernt davon, dieses Potenzial auch auszuschöpfen.

Das Ausmaß dieses Problems zeigt der letzte Auenzustandsbericht, den das Bundesumweltministerium (BMUV) und das Bundesamt für Naturschutz (BfN) im Jahr 2021 herausgegeben haben. Entlang der 79 größten Flüsse Deutschlands sind demnach zwei Drittel der ursprünglichen Überschwemmungsflächen verloren gegangen, weil die Gewässer durch Deiche von ihren Auen getrennt wurden. Was noch übrig ist, wird zudem oft intensiv genutzt und ist deshalb in keinem naturnahen Zustand mehr. So liegen auf einem Drittel der noch vorhandenen Auen heute Äcker und Siedlungen.

Der Bericht betont daher die Notwendigkeit, die natürlichen Dienstleister mit naturbasierten Lösungen zurückzugewinnen.

Immerhin hat es zwischen den Jahren 1983 und 2020 entlang der untersuchten Flüsse etwa 220 größere Renaturierungsprojekte gegeben: Durch die Rückverlegung, den Rückbau und die Schlitzzung von Deichen konnten rd. 7.100 ha Auenfläche wieder zeitweise überflutet werden. Angesichts von etlichen Zehntausend Hektar, die theoretisch für solche Maßnahmen infrage kämen, ist da aber noch deutlich Luft nach oben. Es gilt, den Flüssen bundesweit mehr Raum zu geben und weitere Auen naturnah umzugestalten.

Auf europäischer Ebene verfolgt die EU-Biodiversitätsstrategie das ambitionierte Ziel, bis zum Jahr 2030 insgesamt 25.000 Kilometer Flüsse in Europa durch die Entfernung von Dämmen und Anbindung von Auen wiederherzustellen. Einen neuen Umsetzungsrahmen könnte hierzu auch das neue Europäische Renaturierungsgesetz (Nature Restoration Law) bieten.

Wie sehr sich solche Bemühungen lohnen, zeigt die Entwicklung an der Luppe. Dort hat das Projektteam des UFZ in den letzten Jahren schon einiges erreicht. So kann der 5 km lange Burgauenbach bei Hochwasser nun wieder über die Ufer treten und fungiert damit als Lebensader für den Auwald. Auch der Zschampert ist bereits dabei, sich von einem Graben wieder in einen naturnahen Bach zu verwandeln. Ausgetrocknete Tümpel stehen wieder voll Wasser und bieten damit Laichmöglichkeiten für Amphibien.

Dass dies alles schon positive Auswirkungen auf das Ökosystem hat, zeigen die begleitenden Untersuchungen des UFZ und der Universität Leipzig. Lange konnten sich zum Beispiel typische Auenwald-Arten wie Eichen, Eschen und Ulmen in den vom Hochwasser abgeschnittenen Bereichen nicht mehr gesund entwickeln. Stattdessen haben sich dort Ahornbäume vermehrt. Doch wenn das Wasser zurückkommt, lässt sich dieser Prozess zurückdrehen.

So flutet die Stadt Leipzig in einem seit dem Jahr 1993 laufenden Experiment jedes Jahr im Frühling eine Fläche von 7 ha im südlichen Leipziger Auwald. Dort hat sich der Ahorn-Bestand schon stark reduziert und die gepflanzten Eichen haben sich gleichfalls gut entwickelt. Ähnliche Entwicklungen erwarten die UFZ-Experten auch am renaturierten Burgauenbach. Eine Woche, nachdem die Stadt gemeinsam mit der Landestalsperrenverwaltung dort die Wasserzufuhr wiederhergestellt hatte, waren schon 20 ha überschwemmt.

Auch nach dem Ende des aktuellen Projekts soll sich die Flusslandschaft an Weißer Elster und Luppe weiter erholen. Doch einen Zustand, der über mehrere Jahrhunderte entstanden ist, wieder auf den Weg zu einem naturnahen Ökosystem zu bringen, braucht eine intensive Kooperation aller Akteure. Die Stadt Leipzig entwickelt derzeit gemeinsam mit dem Freistaat Sachsen ein Nutzungs- und Entwicklungskonzept für insgesamt 4.750 ha Auenfläche – das entspricht immerhin mehr als 10 % der Stadtgebiete von Leipzig und Schkeuditz. Gerade die Tatsache, dass große Bereiche dieser Auen in der Großstadt liegen, macht das besonders interessant. Denn dadurch lässt sich erproben, wie man urbanes Leben und Auenschutz am besten unter einen Hut bekommt. So kann das Projekt in Leipzig zu einem Modell für zahlreiche andere Regionen werden. Praktisch alle deutschen Großstädte liegen an Flüssen und die Förderung funktionierender Auen sollte auch dort umgesetzt werden.

Im Rahmen des von der EU-geförderten Projektes "SpongeBoost" soll diese für den Klimaschutz so wichtige Schwammfunktion von Feuchtgebieten entlang der Weißen Elster und weiteren Regionen in Europa vertiefend betrachtet werden. Das Projekt "Lebendige Luppe" wurde vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUV) im Rahmen des Bundesprogramms Biologische Vielfalt sowie von der Sächsischen Landesstiftung Natur und Umwelt gefördert.

Weitere Informationen:

Projektseite "Lebendige Luppe"
<https://lebendige-luppe.de/>

Abschlussbroschüre "Lebendige Luppe"
https://lebendige-luppe.de/media/II_abschlussbroschuere_web.pdf

Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
<https://www.bmu.de/natuerlicher-klimaschutz>

ENCA Recommendations
<https://bioclim2023.adelphi.de/system/files/document/enca-recommendations-wetlands-final.pdf>

Auenzustandsbericht
<https://www.bfn.de/publikationen/broschuere/auenzustandsbericht-2021>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 22. Mai 2024)

Wasser im Boden – genaue Daten für Landwirtschaft und Klimaforschung

Die Bodenfeuchte hat nicht nur Auswirkungen auf die Landwirtschaft, sondern ist als Teil des globalen Wasserkreislaufs ein wichtiger Schlüsselfaktor für Wetter und Klima. Für ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge braucht man genaue Messdaten: Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) stellt dafür ein noch junges Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte vor.

Die Bodenfeuchte ist Teil des globalen Wasserkreislaufs. Nur ein gesunder und ausreichend feuchter Boden kann dafür sorgen, dass Landökosysteme einen großen Teil des Kohlendioxids der Luft langfristig in Form von Kohlenstoff speichern und so die globale Erwärmung verlangsamen. Deshalb gehört die Bodenfeuchte zu den wesentlichen Klimavariablen (Essential Climate Variables), die die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert hat. Die kontinuierliche Messung der Bodenfeuchte hat desgleichen weltweit Bedeutung für die Landwirtschaft. Sie liefert aber auch neue Daten für die Klimaforschung, die Klimafolgenanpassung und das Wassermanagement. Doch vielfach sind die unterschiedlichen Messverfahren nicht direkt vergleichbar oder interoperabel.

Das Ziel der PTB ist, die verschiedenen Messverfahren für Bodenfeuchte auf die gemeinsame Basis internationaler Standards zu stellen, damit sie vergleichbar und aussagekräftig werden. Denn

bisher werden hauptsächlich zwei sehr unterschiedliche Verfahren genutzt: Sensoren im Boden, die punktgenaue Informationen liefern, und die Messung per Satellit, die mehrere Quadratkilometer abdeckt. Ein drittes Verfahren könnte in Zukunft den Größenbereich dazwischen abdecken, um beispielsweise Aussagen über den Feuchtezustand eines bestimmten Ackers zu machen: die Bodenfeuchtemessung mit kosmischen Neutronen (CRNS = Cosmic-Ray Neutron Sensing).

Mit dem CRNS will die wissenschaftliche Community die Lücke zwischen den beiden etablierten Verfahren schließen, und Forschende der PTB schaffen die notwendige metrologische Grundlage dafür, dass Bodenfeuchtemessungen effektiv, metrologisch gesichert und konsistent über alle Längenskalen hinweg funktionieren. Zusätzlicher Vorteil ist, dass das Verfahren kostengünstig weltweit eingesetzt werden kann – auch in weniger wohlhabenden Ländern, die stark von Wassermangel betroffen sind.

Das Messprinzip des CRNS nutzt die natürliche kosmische Strahlung, die fortlaufend aus dem Weltraum auf die Erde trifft und in Wechselwirkung mit der Atmosphäre dort Neutronenstrahlung erzeugt. Abhängig von der Menge an Wasser im Boden werden die Neutronen an der Landoberfläche reflektiert. Diese Reflexion misst dann ein über dem Boden stehender Detektor. Mit CRNS kann die mittlere Bodenfeuchte im Bereich der Wurzelzone innerhalb eines Radius von etwa 100 m rund um den Detektor erfasst werden.

Das von der PTB entwickelte Messverfahren ist Teil des Forschungsprojektes SoMMet (Soil Moisture Metrology), an dem insgesamt 18 Forschungseinrichtungen aus 11 Ländern beteiligt sind. Ihr Ziel ist die verbesserte Vergleichbarkeit und Interoperabilität unterschiedlicher Messungen, um bestmögliche Informationen über die Bodenfeuchte zu gewinnen. Das Projekt wird von der Europäischen Partnerschaft für Meteorologie gefördert, die von dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont Europa der Europäischen Union sowie von den teilnehmenden Staaten kofinanziert wird.

Die PTB-Wissenschaftler hoffen, dass sie bei Projektende im September kommenden Jahres (2025) der Weltorganisation für Meteorologie handfeste Ergebnisse zur Verfügung stellen können, die dann in ihre Empfehlungen zur Messung der Bodenfeuchte einfließen. Das würde die Messungen weltweit deutlich aussagekräftiger machen und Klimamodellen ebenso zugutekommen wie einem besseren Verständnis aller Zusammenhänge zwischen Boden, Wetter und Klima.

Weitere Informationen:

Arbeitsgruppe Neutronenspektrometrie,
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt
<https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt6/fb-64/643-neutronenspektrometrie.html>

Homepage des Forschungsprojekts SoMMet
 (Soil Moisture Metrology)
<https://www.sommet-project.eu/home>

(aus: Pressemitteilung Physikalisch-Technische Bundesanstalt vom 30. April 2024)

Patient See: Mensch und Gewässer sind gar nicht so verschieden, wenn sie krank sind

Wie wir Menschen können auch Seen unter einer Vielzahl von gesundheitlichen Störungen leiden: von hohen Temperaturen über Probleme mit dem Kreislauf, der Atmung, der Ernährung oder dem Stoffwechsel bis hin zu Infektionen und Vergiftungen. Darauf weisen Forscher unter Leitung der schwedischen Universität Uppsala mit dem Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) in einer aktuellen Studie hin. Um Seen vor chronischen Leiden und bedrohlichen Zuständen zu schützen und sie zu heilen, sollten ähnliche Strategien wie in der menschlichen Gesundheitsversorgung angewandt werden: Prophylaxe, regelmäßiges Screening, Behandlung und Schadensbegrenzung.

Weltweit gibt es 1,4 Millionen Seen, deren Oberfläche größer als 10 ha ist. Rund 12 % der gesamten Weltbevölkerung leben in einem Umkreis von 3 km um diese Seen und nutzen sie zur Trinkwassergewinnung, für die Fischerei, zur Erholung oder für den Tourismus. Diese wichtigen Funktionen können Seen am besten für den Menschen erfüllen, wenn sie in einem guten Gesundheitszustand sind.

In einer aktuellen Studie schlägt die internationale Forschergruppe vor, die Terminologie und die Ansätze des menschlichen Gesundheitswesens zu nutzen, um den Zustand der globalen Seesysteme zu bewerten. So wäre es möglich, Seen mit mehreren Gesundheitsproblemen als "multimorbide" zu bezeichnen, und regelmäßige Untersuchungen, ähnlich wie beim Menschen, könnten helfen, Probleme in Seen frühzeitig zu erkennen. Die Analogien verdeutlichen, dass Seen lebendige Systeme sind, die Sauerstoff, sauberes Wasser und eine ausgewogene Energie- und Nährstoffversorgung benötigen.

Das Team nutzte die Daten von LakeATLAS, einem Teil des globalen Kompendiums HydroATLAS, zu etwa 1,4 Millionen Seen weltweit, um Störungen des Kreislaufs wie Austrocknung sowie "Erkrankungen" des Stoffwechsels wie Versauerung und Versalzung, Probleme mit der Ernährung wie Nährstoffüberschuss, Störungen der Atmung wie Sauerstoffmangel sowie andere Beeinträchtigungen zu untersuchen.

Doch wann ist ein See gesund – oder krank? Viele Länder haben in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte bei der Bewertung des Gesundheitszustandes ihrer Binnengewässer gemacht. Es gibt Ansätze, wie z. B. die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRRL), diese Bewertungen länderübergreifend zu harmonisieren.

Ein zentrales Konzept ist dabei der Vergleich der aktuellen Situation mit Referenzbedingungen, die häufig als Bedingungen ohne oder mit nur geringem menschlichem Einfluss definiert werden. Der Ansatz zur Bewertung von Abweichungen von den Referenzbedingungen ähnelt der Praxis im Gesundheitsbereich. Bislang gibt es jedoch kein einfaches globales System, um den Gesundheitszustand von Seen zu klassifizieren.

Die typischen Krankheiten, an denen Seen auf der ganzen Welt heute leiden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Schwere Kreislaufprobleme: ausgetrocknet

Unter Kreislauf versteht man bei Seen die Verfügbarkeit und Dynamik von Wasser. Ein ernsthaftes Kreislaufproblem mit zahlreichen Kaskadeneffekten für die Gesundheit der Seen stellt die Austrocknung dar. Die Forschenden schätzen, dass rund 115.000 Seen weltweit doppelt so viel Wasser verdunsten, wie sie durch direkte Niederschläge erhalten. Das macht sie insbesondere dann anfällig für eine Austrocknung, wenn die Zuflüsse ebenfalls austrocknen.

2. Falsche Ernährung: Invasive Quaggamuschel verändert Nährstoffangebot, Ackerland als Risiko für Eutrophierung

Auch Störungen im Nährstoffhaushalt eines Sees führen in der Regel zu einer Beeinträchtigung seiner Ökosystemleistungen. So kann die Ertragsfähigkeit eines Sees durch Nährstoffmangel rasch abnehmen. In einem Gewässer mit einem natürlich-eutrophen Nährstoffgehalt finden Fische dann nicht mehr genügend Nahrung, weil weniger Algen wachsen. Ein Beispiel dafür ist die invasive Quaggamuschel, die in Massenbeständen das Seewasser so stark filtern kann, dass der Nährstoffgehalt deutlich sinkt.

Viel häufiger ist jedoch das Gegenteil der Fall: Sind zu viele Nährstoffe in einem Gewässer vorhanden, spricht man von Eutrophierung. Sie kann zu (giftigen) Algenblüten führen, welche zum Beispiel die Trinkwassergewinnung gefährden. Ähnlich wie in der menschlichen Medizin gibt es auch für Seen Risikofaktoren. Die Hauptursache für die weltweite Ausbreitung und Intensivierung von Algenblüten und die daraus folgende Toxinproduktion ist die menschengemachte Eutrophierung durch häusliche, industrielle und landwirtschaftliche Einträge, die durch den Klimawandel wahrscheinlich noch verschärft wird.

3. Atemnot: Sauerstoffverarmung in Seen dramatischer als in den Ozeanen

Seen können auch ein Sauerstoffproblem haben: Niedrige Sauerstoffgehalte treten vor allem bei Algenblüten, hohen Temperaturen und geringer Wasserzirkulation auf. Bei hohen Temperaturen passiert das, weil in wärmerem Wasser weniger Sauerstoff gelöst werden kann. Kleinlebewesen und Fische ersticken. Weltweit sind immer mehr Seen von Sauerstoffarmut betroffen, sogar stärker als die Ozeane, und es gibt keine Anzeichen für eine Erholung. Der auch als Hypoxie bezeichnete Sauerstoffmangel betrifft sogar Seen mit guter Wasserqualität, wie z. B. den Genfersee, weil mildere Winter zu einer unvollständigen Durchmischung des Seewassers führen, wodurch der tiefste Bereich des Sees langfristig von der Atmosphäre abgeschnitten wird.

Das Wissenschaftlerteam schlägt daher eine Einteilung in einem mehrstufigen System von kritisch bis exzellent anhand definierter Vitalfunktionen vor. "Exzellent" wäre dann: Alle Vitalfunktionen wie Sauerstoffsättigung, Nährstoffkonzentration, Temperatur, pH-Wert und Wasserklarheit liegen im Normalbereich. Gemäß der EG-WRRRL entsprechen diese Ergebnisse einem guten ökologischen und chemischen Zustand des Sees.

Wenn die Gesundheitsprobleme der Seen unbehandelt bleiben, stehen wichtige Ökosystemleistungen nicht mehr oder nur noch teilweise zur Verfügung, was auch das Wohlergehen von Menschen gefährdet. Das Forscherteam empfiehlt daher koordinierte, sektorenübergreifende und multidisziplinäre Präventions- und Behandlungsstrategien, die auch eine Überwachung der Fortschritte und des Gesundheitszustands der Seen beinhalten müssen.

Einige Symptome für den Gesundheitszustand von Seen, wie Algenblüten, Fischsterben oder schwimmende Verschmutzungen wie Müll, lassen sich mit Methoden wie der Satellitenbeobachtung leicht erkennen. Andere Probleme können jedoch nur durch diagnostische Tests festgestellt werden, die – ähnlich wie diagnostische Tests für Menschen – aufwendig und teuer sein können.

Das Forscherteam empfiehlt zusätzliche Untersuchungen, einschließlich der Untersuchung von Wasserproben oder der Installation kostengünstiger Sensoren, um ein umfassenderes Bild der Gesundheit von Seen zu erhalten. Die Forschenden weisen auch darauf hin, dass viele Gesundheitsprobleme in Seen zwar bekannt sind, aber noch nicht behandelt werden. Die bessere Behandlung von Abwässern, die Abmilderung der Folgen des Klimawandels und die Bekämpfung von Schäden, die durch Menschen und nicht-heimische Arten in der Nähe von Seen verursacht werden, sollten Priorität haben.

Fachartikel:

Weyhenmeyer, G.A., A.V. Chukwuka, O. Anneville, J. Brookes, C.R. Carvalho, J.B. Cotner et al. (2024): Global lake health in the Anthropocene: Societal implications and treatment strategies. – *Earth's Future*, 12(4).

DOI: 10.1029/2023EF004387

Weitere Informationen:

Forschungsgruppe Aquatisch-terrestrische Kopplung und Regimewechsel, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei

<https://www.igb-berlin.de/hilt>

(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei vom 6. Mai 2024)

Mikroplastik im Meer: Neue Methode

Abriebe von Partikeln entstehen nicht nur im Straßenverkehr, sondern zum Beispiel auch in der Schifffahrt. Farbanstriche und Beschichtungen gegen Bewuchs und Korrosion bestehen überwiegend aus Kunststoffen. Durch Verwitterung und Verschleiß entsteht Mikroplastik – Partikel, die kleiner sind als 5 Millimeter.

Um herauszufinden, wie viel Mikroplastik auf diesem Weg in Meer gelangt, kombinierte ein Forschungsteam des Helmholtz-Zentrums Hereon verschiedene chemisch-analytische und mathematisch-statistische Methoden. So konnte das Wissenschaftlerteam verschiedene Typen von Partikeln genauer erfassen und sicher voneinander unterscheiden. Dadurch lässt sich das potentielle Risiko besser einschätzen, das von Partikeln aus Beschichtungen und Farbanstrichen ausgeht.

Derartige Partikel könnten vermehrt auch durch den Ausbau der Offshore-Windenergie und die zunehmende Schifffahrt in die Meeresumwelt gelangen. Die Studie wurde daher unter anderem durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Zusammenhang mit dem BMDV-Expertenetzwerk gefördert. Dort werden Abriebe aus der Verkehrsinfrastruktur und dem Verkehr selbst untersucht.

Bei der Untersuchung von Partikeln in Offshore-Windparks kommt die neu entwickelte Methode nun direkt zum Einsatz. Das Wissenschaftlerteam war im April 2024 mit dem Forschungsschiff ATAIR des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) unterwegs, um die deutschen Meeresgewässer zu überwachen. Dabei nahmen die Forschenden auch Wasser- und Sedimentproben in Offshore-Windparks und in der Deutschen Bucht, die sie im Labor auf Partikel aus Farbanstrichen und Beschichtungen untersuchten.

Die Probenahme fand im Rahmen des europäischen Interreg-Projekts Anemoui statt. Bis Ende des Jahres 2026 untersuchen dabei elf Partner aus sechs verschiedenen Ländern des Nordseeraums die stofflichen Emissionen von Offshore-Windenergieanlagen. Neben Partikeln aus Farbanstrichen und Beschichtungen stehen ebenfalls Spurenmetalle und organische Schadstoffe im Fokus der Untersuchungen.

Der Ausbau der Offshore-Windenergie in Nordsee und Ostsee ist ein wichtiger Bestandteil der Energiewende. Die Untersuchungen von Hereon und BSH tragen dazu bei, die Meeresumweltüberwachung kontinuierlich zu verbessern. So können die Auswirkungen von neuartigen Substanzen auf die Meeresumwelt bewertet und wirksame Maßnahmen umgesetzt werden, die den Eintrag von Mikroplastik in die Meere reduzieren.

Fachartikel:

Mater, J.H., L. Hildebrandt, M. Fischer, O. Klein, T. Zimmermann, F. Fensky, A. Siems, A. Zonderman, E. Hengstmann, T. Kirchgeorg, D. Pröfrock (2024): An analytical strategy for challenging members of the microplastic family: Particles from anti-corrosion coatings. *PubMed* May 15:1470.134173.

DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134173

Weitere Informationen:

Institut für Umweltchemie des Küstenraumes, Helmholtz-Zentrum Hereon

https://www.hereon.de/institutes/coastal_environmental_chemistry/index.php.de

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum Hereon vom 22. April 2024)

Temperaturrekord in der Nordsee: Deutsche Bucht so warm wie noch nie

Die Ozeane sind so warm wie nie zuvor gemessen. Auch die Nordsee hat 2023 diesen alarmierenden Rekord erreicht, wie Messungen der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH) des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), ergaben. Die Daten der Langzeitreihe "Helgoland Reede" zeigen auch: Es ist nicht das erste Jahr, in dem die Deut-

sche Bucht marine Hitzewellen erlitten hat. Die hohen Temperaturen und extremen Ereignisse sind eine Folge des Klimawandels und könnten auch deutliche Folgen für das Ökosystem haben.

Auch die ersten Monate des Jahres 2024 deuten darauf hin, dass diese Entwicklung nicht abbricht: Januar, Februar, März und April 2024 gehören im Mittel alle zu den "Top 10" der jeweiligen wärmsten Monate seit dem Jahr 1962. Der März 2024 war mit einer mittleren Wassertemperatur von 6,9 °C sogar der wärmste März seit 1962. Die Temperaturdaten der Langzeitreihe Helgoland Reede zeigen, dass die mittlere Wassertemperatur im Jahr 2023 bei knapp 11,9 °C lag. Damit war das Jahr 2023 ein Rekordjahr seit Beginn der Langzeitdatenreihe 1962. Das Rekordjahr begann bereits im Januar, dieser war mit rund 7,2 °C der zweitwärmste je gemessene Januar. Am Tag mit der höchsten Wassertemperatur 2023, dem 12. September, haben die AWI-Forschenden eine Temperatur von 19,5 °C gemessen; dies stellt jedoch keinen Rekordwert in der Langzeitreihe dar.

Das Jahr 2023 war geprägt von marinen Hitzewellen. Es ist aber nicht das erste Jahr, in dem die Nordsee marine Hitzewellen erlebt. In einer aktuellen Studie haben die AWI-Forschenden die Daten der Oberflächenwassertemperatur der Helgoland Reede zwischen den Jahren 1962 und 2018 ausgewertet. Marine Hitzewellen treten nicht nur im Sommer auf, auch in anderen Jahreszeiten können sie vorkommen; sogar im Winter, wenn die Wassertemperaturen deutlich oberhalb der üblichen Werte liegen. Die Forschenden konnten sehen, dass die Häufigkeit von starken marinen Hitzewellen nach den 1990er Jahren zugenommen hat, mit einer Konzentration auf die Monate März bis April und Juli bis September. Das dritte Quartal des Jahres wies dabei die höchste Häufigkeit von Hitzewellen im Meer auf.

Seit dem Jahr 1990 beobachten die AWI-Forschenden auf Helgoland und Sylt neue Temperaturmuster. Im Sommer gibt es demnach deutlich mehr wärmere Tage und im Winter deutlich weniger extrem kalte Tage. So lag zwischen den Jahren 1962 und 1990 noch in insgesamt 24 Monaten die durchschnittliche Temperatur unter 3 °C; seit dem Jahr 1990 war das lediglich in fünf Monaten der Fall. Auf der anderen Seite gab es bis zum Jahr 1990 lediglich acht Monate mit durchschnittlichen Temperaturen über 17 °C, aber ab 1990 bis einschließlich 2023 ganze 53 Monate. Höhere Temperaturen als erwartet treten nun auch früher im Jahr auf. Die Deutsche Bucht hat insbesondere nach den 1990er Jahren einen erheblichen Temperaturanstieg erlebt. Insgesamt sehen die Forschenden den Klimawandel und die damit einhergehende globale Erwärmung als einen Hauptgrund für die hohen Oberflächentemperaturen der Ozeane und das vermehrte Auftreten extremer Ereignisse wie mariner Hitzewellen.

Die Daten zeigen auch einen Zusammenhang zwischen den monatlichen Temperaturen in der Deutschen Bucht und den Temperaturen auf dem deutschen Festland. Denn: Marine Hitzewellen entstehen häufiger im Spätsommer, während oder kurz nach atmosphärischen Hitzewellen, als die Temperaturen ihren Höchststand erreichten. Dies deutet auf eine Kopplung zwischen Meeres- und atmosphärischen Temperaturen hin. Die Nordsee erwärmt sich so schnell, weil sie ein Flachmeer ist, das von Landmassen umgeben ist. Deshalb sind die Temperatur-Trends für das Festland absolut konform mit denen für die Wassertemperatur.

Was bedeuten diese Ergebnisse für die Nordsee und ihr Ökosystem? Die ansteigenden Wassertemperaturen im Meer und extreme Temperaturereignisse wie marine Hitzewellen können biologische Reaktionen hervorrufen. Aufgrund der Durchmischung der Wassersäule an der Küste werden sich marine Hitzewellen wahrscheinlich nicht nur auf die Oberflächengewässer, sondern auch auf die Lebensräume am Meeresboden auswirken. In der Nordsee sind bereits dekadische Veränderungen eingetreten, etwa bei der Häufigkeit von Arten oder der Zusammensetzung von Gemeinschaften. Die Temperatur ist dabei eine der wichtigsten Triebkräfte für die Artenvielfalt und -verteilung.

Meeresorganismen reagieren vielfältig auf Klimaveränderungen. Was genau dabei passiert, wird gerade erforscht, etwa wie sich marine Hitzewellen auch auf das planktonische Nahrungsnetz auswirken, also zum Beispiel auf die Zusammensetzung oder die Häufigkeit (Abundanz) von Plankton-Gemeinschaften und einzelnen Arten. In einer Mesokosmos-Studie konnten die AWI-Wissenschaftler bereits zeigen, dass der gleichzeitige Einfluss von Erwärmung, Versauerung und verändertem Nährstoff-Verhältnis die Planktodynamik verändert, wobei kleinere Planktonarten begünstigt werden. Dies kann sich wiederum auf marine Nahrungsnetze auswirken, denn Plankton ist die Lebensgrundlage vieler Meerestiere. Der Temperaturanstieg und die Zunahme mariner Hitzewellen während der letzten Dekaden, die im Zusammenhang mit dem globalen Wandel in der deutschen Bucht aufgetreten sind, gibt Anlass zur Sorge für Ökologie und Gesellschaft.

Seit dem Jahr 1962 messen Forschende der Biologischen Anstalt Helgoland nahezu täglich die Temperatur sowie den Salz- und Nährstoffgehalt in der deutschen Bucht und bestimmen die Zusammensetzung des Planktons. Inzwischen ist die Helgoland Reede eine der wichtigsten und detailliertesten ökologischen Langzeit-Datenreihen. Sie ermöglicht es Wissenschaftlern des AWI und aus aller Welt, lückenlos die Folgen des Klimawandels in der Nordsee in den letzten 60 Jahren zu belegen und zu unterscheiden, ob Veränderungen natürliche zyklische Schwankungen sind oder vom Menschen verursachte Trends. In der "World Data Bank PANGAEA" des Alfred-Wegener-Instituts werden die Daten für nachkommende Generationen archiviert und bereitgestellt.

Fachartikel:

Giménez, L., M. Boersma, K. Wiltshire (2024): A multiple baseline approach for marine heatwaves. – *Limnology and Oceanography*, Vol. 69, 638-651.

DOI: 10.1002/Ino.12521

Moreno, H.D., M. Köring, J. Di Pane, N. Tremblay, K. Wiltshire, M. Boersma et al. (2022): An integrated multiple driver mesocosm experiment reveals the effect of global change on planktonic food web structure. – *Communications Biology*, 5(1), 179.

DOI:10.1038/s42003-022-03105-5.

Weitere Informationen:

Abteilung Ökologie von Schelfmeersystemen,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
<https://www.awi.de/ueber-uns/organisation/mitarbeiter/detailseite/inga-kirstein.html>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung vom 4. Juni 2024)

Vorhersage lokaler Sturzflutgefahren

Forschende der Universität Freiburg haben einen Index entwickelt, um die Gefahr von Sturzfluten einzuordnen, der lokale Gegebenheiten berücksichtigt. In die Vorhersage fließen neben Niederschlagsdaten hydrologische und hydraulische Modelle ein. Mit Hilfe der Vorhersagen können Alarm- und Einsatzpläne verbessert werden.

Große Teile Baden-Württembergs und Bayerns waren im Frühsommer 2024 von Starkregen, Hochwasser und deren Folgen betroffen. Neben Flusshochwassern bergen Sturzfluten in solchen Situationen eine große Gefahr. Diese sind schwer vorherzusagen, da bei ihrem Auftreten neben dem Niederschlag viele weitere Faktoren entscheidend sind. Ein Team unter der Leitung von Wissenschaftlern der Universität Freiburg hat hierzu einen Index entwickelt, der die jeweils erwartete lokale Gefahr von Sturzfluten angibt.

In den sogenannten Sturzflutindex (SFI) fließen neben dem Niederschlag Eigenschaften des jeweiligen Gebiets mit ein. Relevant ist etwa, wie viel Wasser die lokalen Böden aufnehmen können: Handelt es sich um versiegelte Flächen? Ist der Boden bereits feucht oder gesättigt? In welchem Maße ist er mit Pflanzen bedeckt? Eine weitere Frage ist, wie das Wasser abfließt: Ist die Gegend flach oder hügelig? Treffen mehrere spontan gebildete Flüsse an einer Stelle aufeinander? Auf Basis von Bodenkarten und Daten etwa zu Landnutzung und Versiegelung berechnen die Forschenden diese lokalen Gegebenheiten mit Hilfe von hydrologischen und hydraulischen Computermodellen.

Besonders gefährlich sind Sturzfluten dann, wenn das Wasser mit hoher Geschwindigkeit fließt, der Wasserstand hoch ist, oder bei einer Kombination aus beiden Faktoren. In solchen Fällen könnten Fußgänger oder Fahrzeuge den Halt verlieren und weggeschwemmt werden. Um die Gefahr in einem bestimmten Gebiet abzuschätzen, haben die Forschenden vier Risiko-Klassen definiert: Keine bis geringe Gefahr, mäßige Gefahr, erhebliche bis große Gefahr oder sehr große Gefahr. Bei dieser Einordnung beziehen die Wissenschaftler historische Erfahrungswerte mit ein. In welche Klasse ein Gebiet fällt, hängt davon ab, welcher Anteil der lokalen Flächen laut Modell von gefährlichen Sturzfluten betroffen sein wird.

Um den SFI zu testen, bestimmten die Forschenden Gefahren bei früheren Hochwassern anhand historischer Daten. Tatsächlich sagte der Index die jeweils betrachteten Sturzfluten korrekt vorher. Der SFI bietet, wie sich herausstellte, einen deutlichen Mehrwert gegenüber bloßen Starkregenwarnungen. Mit Hilfe der Vorhersagen können Bewohner betroffener Gebiete in Zukunft rechtzeitig gewarnt werden sowie Alarm- und Einsatzpläne objektiviert und verbessert werden. Langfristig hilft der Index, vorzusorgen und die lokalen Gefahren durch Sturzfluten zu verringern. Um seinen Einsatz voranzutreiben, ist das Forschungsteam bereits mit mehreren Landesämtern im engen Kontakt.

Der SFI wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts AVOSS (Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potentiale, Unsicherheiten und Grenzen) entwickelt. An der Forschung beteiligt sind Wissenschaftler mehrerer Universitäten und Forschungseinrichtungen

aus ganz Deutschland, die mit Meteorologen und Ingenieurbüros zusammenarbeiten.

Weitere Informationen:

Projektseite AVOSS, Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedene Skalen: Potentiale, Unsicherheiten und Grenzen.

<https://www.avoss.uni-freiburg.de/>

(aus: Pressemitteilung Universität Freiburg vom 12. Juni 2024)

Klimaforschung in Gewässern: Parkli Wassersensoren zum Nachbauen

Die Hochschule Reutlingen, das Herman-Hollerith-Zentrum (HHZ) Böblingen und eine Gesellschaft für Open Science haben gemeinsam im Rahmen des Forschungsprojekts "Parkli – Partizipative Frühwarnsysteme zur Bekämpfung lokaler Folgen des Klimawandels durch Citizen Science Aktivitäten in der Umweltinformatik" an der Entwicklung eines Wassersensors gearbeitet, um ein Langzeitmonitoring zu ermöglichen.

Gewässer erbringen wesentliche Ökosystemdienstleistungen, die für das Überleben und Wohlergehen der Menschheit essenziell sind. Dazu zählen die Versorgung mit sauberem Trinkwasser, die Regulierung des Klimas und der Atmosphäre sowie die Bereitstellung von Nahrung und Erholungsräumen. Aquatische Ökosysteme unterstützen zudem die biologische Vielfalt, regulieren den Wasserhaushalt und tragen zur Bodenbildung bei. Diese Faktoren sind besonders wichtig, da sie helfen, natürliche Schwankungen und Störungen abzufedern und die Resilienz gegenüber Umweltveränderungen zu erhöhen.

Die Erwärmung der Atmosphäre hat direkte Auswirkungen auf den Wasserkreislauf, was zu veränderten Niederschlagsmustern, erhöhter Verdunstung und einer Intensivierung von Wetterextremen führt. In der Folge kommt es häufiger und intensiver zu Hochwasser sowie verlängerten Dürreperioden, die den Wasserstand und die Wasserqualität beeinträchtigen. Diese Veränderungen bedrohen die Fähigkeit der Gewässer, ihre essenziellen Dienstleistungen zu erbringen, und erhöhen das Risiko von Schadstoffausbreitung und Eutrophierung. Der Anstieg der Gewässertemperatur kann ebenfalls die Lebensbedingungen für aquatische Arten verschlechtern und die biologische Vielfalt sowie die ökologische Funktionalität von Gewässerökosystemen verringern.

Die Überwachung und das Monitoring von Gewässern ermöglichen es, Veränderungen frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zur Erhaltung der Biodiversität und zur Förderung der Resilienz gegenüber dem Klimawandel einzuleiten. Dies trägt zur langfristigen Sicherung der Ökosystemdienstleistungen bei und unterstützt die Anpassung an veränderte klimatische Bedingungen.

Daher haben die Projektbeteiligten an der Entwicklung eines Wassersensors gearbeitet, um ein kostengünstigeres Langzeitmonitoring zu ermöglichen. Der Sensor mit Boje kann einfach nachgebaut werden, da alle Anleitungen und Spezifikationen online frei verfügbar sind. Im Rahmen eines Hackathons, der in Zusammenarbeit mit Studierenden des Studienganges Human-

Centered-Computing stattfand, konnten Daten des Wassersensors bereits analysiert und veranschaulicht sowie der Umgang mit der Plattform aktiv geübt werden.

Der Parkli-Wassersensor zur Überprüfung der Wasserqualität erzeugt hochwertige Messreihen für die Parameter pH-Wert, Trübung, Leitwert und Temperatur in unterschiedlichen Wasserschichten. Bei der schwierigen und umfassenden Aufgabe der Gewässerüberwachung kann er daher eine sinnvolle Unterstützung bieten. Das Forschungsprojekt Parkli wird durch die Baden-Württemberg Stiftung im Programm "Innovationen zur Anpassung an den Klimawandel" gefördert.

Weitere Informationen:

Projektwebseite Parkli
<http://www.parkli.de>

(aus: Pressemitteilung Hochschule Reutlingen vom 14. Juni 2024)

Baden-Württemberg

Projekt "Masterplan Wasserversorgung" zeigt Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

Der Klimawandel hat bereits spürbare Auswirkungen auf die Wasserversorgung. Diese werden sich in den kommenden Jahren und Jahrzehnten verschärfen. Das Umweltministerium und das Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg haben daher mit dem Projekt "Masterplan Wasserversorgung" landesweit die Versorgungsstruktur der Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg erhoben. Das Projekt prognostiziert die Entwicklung der Wasserressourcen bis zum Jahr 2050. Es schätzt zudem die Bevölkerungsentwicklung und den zukünftigen Trinkwasserbedarf ab, analysiert die heutige Versorgungsstruktur und gibt den Verantwortlichen vor Ort konkrete Empfehlungen, wie sie Wassermangel in Zukunft vorbeugen können.

Neben dem Klimaschutz ist die Anpassung an den nicht mehr vermeidbaren Klimawandel das Gebot der Stunde – schließlich werden Wetter- und Wasserextreme zunehmen. Mit den Daten des Projekts können Kommunen und Wasserversorger tätig werden, um zukünftigen Wasserkrise vorzubeugen. Denn Trinkwasser von hoher Qualität ist ein Grundbedürfnis der Bürger. Die Menschen in Baden-Württemberg erwarten zurecht, dass jederzeit einwandfreies Trinkwasser in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Diesem Anspruch will die Landesregierung gerecht werden. Der "Masterplan Wasserversorgung" legt einen Grundstein dafür, dass die Trinkwasserversorgung auch in Zukunft gesichert bleibt.

Nach einer etwa einjährigen Phase der Datenerhebung wurden die Ergebnisse der zweiten Charge den beteiligten Kommunen übergeben. Diese zweite Welle analysiert die Wasserversorgung von 235 Städten und Gemeinden in neun Landkreisen: Schwäbisch Hall, Hohenlohekreis, Neckar-Odenwald-Kreis, Freudenstadt, Rottweil, Zollernalbkreis, Sigmaringen, Emmendingen und Ortenaukreis. Die Analyse zeigt, dass die Versorgungssicherheit aktuell grundsätzlich gegeben ist. Bei fast allen Versorgungsbereichen kann der mittlere Bedarf in vollem Umfang gedeckt werden.

Die Klimaprognosen des Projekts besagen jedoch, dass in manchen Teilen des Landes im Jahr 2050 bis zu 20 % weniger Grundwasser neu gebildet werden. In den Sommern ist zudem mit einer deutlichen Temperaturzunahme, längeren Trockenperioden und häufigeren extremen Wetterereignissen wie Starkregen zu rechnen. Diese Veränderungen ziehen einen erhöhten Wasserbedarf in der Landwirtschaft und der öffentlichen Wasserversorgung nach sich. Bei 20 % der untersuchten Kommunen besteht daher mit Blick auf das Jahr 2050 Handlungsbedarf. Die Empfehlungen für die verantwortlichen Kommunen und öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen reichen von einer Anpassung der Bezugsrechte bei einem Zweckverband bis zur Prüfung, bisher ungenutzte lokale Wasservorkommen zu erschließen und entsprechende eigene Infrastruktur zu bauen.

Noch größerer Handlungsbedarf besteht laut der Analysen hinsichtlich des so genannten zweiten Standbeins. Dies beschreibt die Möglichkeit, die Wasserversorgung aufrecht zu erhalten, wenn das größte Wasservorkommen oder die größte Bezugsquelle ausfallen sollte. Ein zweites Standbein ist aktuell nur bei etwa 20 % der Versorgungsbereiche uneingeschränkt vorhanden. Bis zum Jahr 2050 sinkt dieser Wert sogar auf unter 1 %, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden.

Die Daten zur Wasserversorgung, die in das Projekt "Masterplan Wasserversorgung" einfließen, werden für das ganze Land Baden-Württemberg je nach Kommune nach einer einheitlichen Methodik und unter Einbindung von Ingenieurbüros erhoben und bewertet. Die Projektlaufzeit ist auf 5 Jahre angelegt.

Weitere Informationen:

Portal "Wasser", Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/wasser>

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg vom 19. Juni 2024)

Brandenburg

Dem Wasser auf der Spur – "Bodenfeuchte-Netzwerk Brandenburg" startet

Brandenburg kann künftig auf mehr Wissen zur Verteilung des Wassers im Boden hoffen. Denn mit dem "Bodenfeuchte-Netzwerk Brandenburg", das jüngst seine Arbeit aufgenommen hat, werden erstmals großflächig Daten zur Bodenfeuchte im Land erhoben. Möglich macht dies das sogenannte "Cosmic-Ray Neutron Sensing" (CRNS), bei dem oberirdische Messstationen Daten zu Flächen von je 5 bis 10 ha in der oberen Bodenschicht sammeln. Initiiert wurde das Netzwerk vom Institut für Wasser- und Stofftransport in Landschaften an der Universität Potsdam, gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig. Weitere Unterstützung erhält das Projekt durch das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), das Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) und das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK).

Brandenburg zählt zu den trockensten Regionen Deutschlands. Im Zuge des Klimawandels dürfte sich diese Problematik noch

weiter verschärfen und Wasser vielerorts zum knappen Gut werden. Welche Formen der Landnutzung künftig wo möglich sind, dürfte wesentlich vom Wissen über die Verteilung des Wassers im Boden abhängen. Doch Beobachtungsdaten zur Bodenfeuchte liegen in Brandenburg vor Ort kaum vor. Messungen waren bislang allenfalls punktuell möglich. Mit dem neuen "Bodenfeuchte-Netzwerk Brandenburg" soll sich dies ändern: Das Netzwerk wird mithilfe der neuen CRNS-Sonden großflächig über Brandenburg verteilt Daten zur Wasserspeicherung im Boden erfassen. Diese Zeitreihen lassen sich dann mit Informationen zur Bodenbeschaffenheit kombinieren, um landesweit Bodenwasserspeicherung und Wasserhaushalt in Brandenburg besser einschätzen zu können.

Die Daten des Netzwerks werden über Datenfernübertragung gesammelt und nach einer ersten Aufbereitung durch eine Arbeitsgruppe der Universität Potsdam und das UFZ auch den Landesämtern zur Verfügung gestellt. Dort soll insbesondere die Simulation des Landschaftswasserhaushalts mit diesen Vor-Ort Daten abgeglichen werden, um eine bessere Beurteilung von Trockenheitsphasen zu ermöglichen.

Mit dem neuen Netzwerk nimmt Brandenburg eine Pionierrolle bei der Erfassung der Bodenfeuchte mithilfe modernster Messverfahren ein. Das verdient Anerkennung, insbesondere weil dabei so viele wissenschaftliche Institutionen erfolgreich zusammenarbeiten, von der Potsdamer Universität über das UFZ in Leipzig bis hin zum Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) und dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF). Hinzu kommen Landesbetriebe wie das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR), das Landesamt für Umwelt (LfU) und der Landesbetrieb Forst Brandenburg. Ziel muss es sein, in der Praxis anwendbare Verfahren für die Brandenburger Landwirtschaftsbetriebe zu entwickeln. Dafür werden in Projekten wie diesem gegenwärtig die wissenschaftlichen Grundlagen gelegt.

Weitere Informationen:

Institut für Umweltwissenschaften und Geographie,
Universität Potsdam
<https://www.uni-potsdam.de/de/umwelt/>

*(aus: Pressemitteilung Universität Potsdam
vom 22. Mai 2024)*

Brandenburg

Hochwasserschutz an der Elbe: Umweltminister Vogel leitet Deichbaumaßnahme bei Wentdorf mit Spatenstich ein

In Brandenburg wurde die Sanierung eines gefährdeten Deichabschnitts bei Wentdorf begonnen. Dem Hochwasser 2013 hielt der Abschnitt stand, allerdings muss der Deich für künftige Hochwasser ertüchtigt, erhöht und verstärkt werden. Dafür sind rd. 3,3 Mio. € an EU-, Bundes- und Landesmitteln für die Baumaßnahmen vorgesehen.

Seit dem Jahr 1997 wurden an der Elbe über 99 % der Deiche erhöht und erweitert, denn: Hochwasserschutz ist eine Daueraufgabe. Die ständige Kontrolle der Deiche, ihre Ertüchtigung und Sanierung sind notwendig, um den Schutz vor Hochwassern dauerhaft sicherzustellen. Bei den anstehenden Baumaßnahmen wird zudem der Deich erhöht und zur Abwehr eines 100-jährlichen Hochwassers angepasst. Denn auch wenn das Land Brandenburg in den letzten Jahren eher mit Niedrigwasser zu kämpfen hatte, haben die Überschwemmungen – insbesondere in der Prignitz – Anfang des Jahres gezeigt, dass die Region auch weiterhin auf Hochwasserereignisse vorbereitet sein muss.

Bei der halbjährlich stattfindenden Deichschau im November 2022 und einer anschließenden Baugrunduntersuchung wurde festgestellt, dass eine grundhafte Sanierung der Deiche erforderlich ist. Das startende Bauvorhaben hat zum Ziel, durch die Sanierung und Erhöhung des Deichabschnitts Wentdorf zwischen Deich-Kilometer 23,2 und 23,9 die Hochwassersicherheit auf dem für die Prignitz vorgegebenen Niveau herzustellen. Das bedeutet eine Ausrichtung der Deichhöhe am aktuell geltenden Bemessungshochwasserstand von 7,99 m am Pegel Wittenberge. Hinzu kommen der für die Elbehauptdeiche übliche Freibord von 1 m sowie in diesem Fall aufgrund des Baugrundes ein Setzungszuschlag von 0,1 m.

Die Deiche an der Elbe werden zur Abwehr eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ100) konstruiert und gebaut. Eine Besonderheit ist in diesem Abschnitt die Kerndichtung des Deiches durch eine gedichtete Stahlspundwand über die gesamte Länge. Das Vorhaben beinhaltet auch den Neubau eines Deichverteidigungsweges. Die für die Maßnahme anzulegende temporäre Baustraße Richtung Wentdorf wird nach Abschluss der Sanierung wieder zurückgebaut.

Die Bauarbeiten sollen insgesamt ein Jahr dauern. Dafür werden rd. 3,3 Mio. € in den Bau aus Mitteln des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) der EU, der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GAK) des Bundes und des Landes veranschlagt. Insgesamt wurden seit dem Jahr 1997 bereits rd. 190 Mio. € für die Deiche und Anlagen an der Elbe investiert. Von den insgesamt 76 km Elbehauptdeich von Gnevsdorf bis zur Landesgrenze Mecklenburg-Vorpommern, die im Rahmen des Programms Elbdeicherweiterung bearbeitet werden, sind seit dem Jahr 1997 bereits über 99 % der Deichabschnitte mindestens auf den Bemessungshochwasserstand von 7,45 m am Pegel Wittenberge erhöht und erweitert worden. Knapp 30 % des Elbehauptdeichs in der Prignitz wird nach Abschluss der Maßnahme bei Wentdorf auf die aktuelle Bemessungshöhe von 7,99 m am Pegel Wittenberge ausgebaut sein.

Weitere Informationen:

Portal "Gewässerunterhaltung", Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg
<https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/gewaesser-und-anlagenunterhaltung/>

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg vom 25. Mai 2024)

Niedersachsen

Gewässerschonende Bewirtschaftung: Beratung zu Themen rund um die Nährstoffbelastung von Gewässern wird fortgesetzt

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sieht verbindliche Umweltziele für Europas Gewässer vor, beispielsweise einen guten mengenmäßiger und chemischer Zustand von Grundwasserkörpern sowie einen guten chemischen und ökologischen Zustand für alle natürlichen Oberflächenwasserkörper. Dazu leistet Niedersachsen mit dem Beratungsangebot zur gewässerschonenden Landbewirtschaftung bereits seit 2010 einen wichtigen Beitrag.

Das kostenlose Angebot richtet sich an landwirtschaftliche Betriebe und wird von erfahrenen Beratungsdienstleistern im Auftrag des Landes Niedersachsen durchgeführt. Im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz hat der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) nun die Verfahren zur Auftragsvergabe für den aktuellen Beratungszeitraum (2023 bis 2025) erfolgreich abgeschlossen und so die lückenlose Weiterführung der bisherigen Beratung sichergestellt.

Zwischen Dezember 2023 und April 2024 konnte das Verfahren für insgesamt 19 Beratungsgebiete abgeschlossen werden, fünf mehr als im vorangegangenen Zeitraum (2021 bis 2023). Damit deckt das aktuelle Beratungsgebiet eine Fläche von rund 3,3 Mio. ha ab, von denen rund 1,7 Mio. ha landwirtschaftlich genutzt werden. Neben Niedersachsen und Bremen entfallen jetzt auch Gebiete auf das Bundesland Hamburg. Im gesamten Beratungsgebiet befinden sich Teilbereiche von Grund- und Oberflächenwasserkörpern, bei denen Handlungsbedarf in Bezug auf die Nährstoffbelastung aus diffusen landwirtschaftlichen Quellen besteht. Inbegriffen sind zudem die Einzugsgebiete von zehn WRRL-relevanten Seen in Niedersachsen.

Nach Abschluss des Vergabeverfahrens durch den NLWKN wurden die Ingenieurbüros Gerics Ingenieure GmbH (Gerics), die Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt (IGLU), der Ingenieurdienst Umweltsteuerung GmbH (INGUS) sowie die Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK) mit der Durchführung der Gewässerschutzberatung nach EG-WRRL beauftragt. In bereits bestehenden Beratungsgebieten wird damit die bisherige Beratung fortgesetzt. In erstmalig vergebenen Gebieten wurden bereits erste Auftaktveranstaltungen durchgeführt, um die dortigen Landwirte über das Beratungsangebot zu informieren.

Schwerpunkt und Ziel der kombinierten Gewässerschutzberatung ist eine verbesserte Stickstoff- und Phosphoreffizienz und die damit einhergehende Reduktion von Nitrat- bzw. Stickstoff- und Phosphoreinträgen in Grund- und Oberflächengewässer. Je nach Beratungsgebiet kommen ergänzend bedarfsgerecht Vertiefungen als zusätzliche Beratungsinhalte hinzu. Diese informieren über die gewässerschonende Bewirtschaftung von Moorstandorten, den reduzierten oder alternativen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und das pflanzenbauliche Wassermanagement.

Durch die Verabschiedung der EG-WRRL durch den Europäischen Rat im Jahre 2000 wurde der Grundstein für eine europaweite Gewässerschutzberatung gelegt. Seitdem hat das Land Niedersachsen sich der Umsetzung "Ergänzender Maßnahmen" gemäß Artikel 11 Absatz 4 der EG-WRRL angenommen. Ziel ist dabei, eine Gewässerschutzberatung zu entwickeln, die zur Förderung einer nachhaltigen gewässerschonenden Landnutzung beiträgt. Für die Umsetzung der Maßnahme gewährt die EU finanzielle Unterstützung aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER). Die Gewässerschutzberatung wird aus EU-Mitteln und niedersächsischen Landesmitteln kofinanziert.

Weitere Informationen:

Website des NLWKN zur EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL)
<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserrahmenrichtlinie/eg-wasserrahmenrichtlinie-38770.html>

(aus: Pressemitteilung Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz vom 23. Mai 2024)

Nordrhein-Westfalen

Klimakrise verstärkt Dürren und Starkregen – Eckpunkte der "Zukunftsstrategie Wasser" vorgelegt

Um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen und Wasserressourcen nachhaltig zu sichern, bereitet das Umweltministerium Nordrhein-Westfalen derzeit eine umfassende "Zukunftsstrategie Wasser" vor.

Hierzu hat das Umweltministerium insgesamt 17 zentrale Eckpunkte vorgestellt, die den Dialog mit den wasserwirtschaftlichen Akteuren, Verbänden und Institutionen eröffnen, um zukünftige Lösungen und konkrete Maßnahmenpakete zu diskutieren und zu vereinbaren. Die häufiger werdenden Extremwetter wirken sich unmittelbar auf die Wasserversorgung, die Abwasserentsorgung, die Hochwassersicherheit sowie die Gewässerökologie aus, daher sind entsprechende Maßnahmen geboten.

Durch die Klimakrise werden Wetterextreme mit Dürren und Starkregen in Zukunft öfter eintreten. Deshalb ist es essentiell, dass die Wasserressourcen klimastabil und nachhaltig gestaltet werden. Gerade in dicht besiedelten Industrieregion wie Nordrhein-Westfalen ist eine nachhaltige Wasserversorgung mit großen Herausforderungen verbunden, die der Klimawandel weiter verschärft. Die Zukunftsstrategie Wasser soll alle Beteiligten an einen Tisch holen, um gemeinsam zu analysieren und zu vereinbaren, wie die Wasserressourcen in Nordrhein-Westfalen nachhaltig und klimastabil gesichert werden können.

Um die Eckpunkte der Zukunftsstrategie mit Experten zu diskutieren und gemeinsam konkrete Maßnahmen zu identifizieren, richtete das Umweltministerium Anfang Juni eine erste Tagung aus. Ein zentraler Punkt war dabei der Hochwasserschutz. Denn für die Sicherheit der Bürger sowie für die Absicherung der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung kommt dem Hochwasserschutz und der Hochwasservorsorge immer größere Bedeutung zu. Entsprechend des 10-Punkte-Arbeitsplans "Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels" gilt es zum Beispiel,

Synergieeffekte zwischen Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Gewässerrenaturierung zu nutzen.

Wichtig ist ein nachhaltiges Wassermanagement zudem für den Strukturwandel im Rheinischen Revier und die Energiewende. Für die Trinkwasserversorgung werden in Nordrhein-Westfalen jährlich mehr als eine 1 Mrd. m³ Wasser gefördert. Um die Wasserversorgung auch in langen Trockenzeiten für die verschiedenen Nutzungen zu sichern, sollen Einsparpotenziale identifiziert und genutzt werden.

Hohe Temperaturen und geringere Niederschläge im Klimawandel führen auch zu fallenden Grundwasserständen und einer geringeren Wasserführung in Gewässern, wodurch gleichzeitig die Schadstoffkonzentrationen steigen können. Daher gilt es, Schadstoffeinträge konsequent weiter zu minimieren. Auch technische Fragen sollen erörtert werden, um beispielsweise die Abwasserbehandlung fortschrittlich und robust weiterzuentwickeln. Trends und Ursachen von trockenfallenden Gewässern sollen systematisch erfasst und Gegenmaßnahmen entwickelt und priorisiert werden. Dabei kommt der naturnahen Entwicklung des Wasserhaushalts eine wichtige Bedeutung zu, da zum Beispiel Auen und Schwammlandschaften zur gesicherten Mindestwasserführung in den Oberflächengewässern beitragen.

Jedoch sind nur rd. 10 % aller Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen derzeit in einem sehr guten oder guten ökologischen Zustand. Gesunde Gewässer mit ihren vielfältigen Lebensräumen sind aber unverzichtbar für die biologische Vielfalt, den Hochwasserschutz, die Klimaanpassung und die Trinkwasserversorgung. Die bestehenden Gewässer können diese vielen wertvollen Leistungen nur erbringen, wenn sie nachhaltig behandelt werden und den Raum erhalten, sich zu entfalten. Betrachtet werden hierzu in der Zukunftsstrategie Wasser auch Aspekte des Bodenschutzes, da Böden wichtige Funktionen als Speicher und Filter für Wasser haben. Für den Wasserhaushalt in Städten ist zudem die Entkopplung von Niederschlagswasser und Kanalisation ein wichtiges Ziel, um die Auswirkungen von Starkregen und Dürren zu mildern. Damit für die wichtigen Aufgaben der Wasserwirtschaft ausreichend gut qualifiziertes Personal zur Verfügung steht, sollen zudem gemeinsame Ansätze in der Aus- und Fortbildung sowie beim fachlichen Wissensmanagement diskutiert werden.

Die 17 Eckpunkte der Zukunftsstrategie Wasser im Überblick

- Sicherheit geht vor! Der Hochwasserschutz wird klimaft.
- Überflutungen beherrschen und Starkregenvorsorge stärken.
- Talsperrenland NRW – zukunftssicher und klimaangepasst.

- Versorgungssicherheit garantieren! Sicherstellung von Wasser in bester Qualität und ausreichender Menge für Mensch und Wirtschaft.
- Niedrigwassermanagement in NRW! Mengenbewirtschaftung neu denken und Landschaftswasserhaushalt stärken.
- Klimaresiliente Gewässer schaffen! Mehr Biodiversität und Klimaresilienz durch naturnahe Maßnahmen blau-grüner Infrastruktur.
- Wasserspeicher Boden! Böden als Speicher und Filter stärken.
- Lebensqualität in die Städte! Wir verbessern den Wasserhaushalt in der Stadt.
- Spitzenplatz in der Abwassertechnik sichern! Neue Herausforderungen an die Abwasserbeseitigung meistern.
- Schadstoffbelastungen reduzieren! Punkt- und diffuse Eintragsquellen beherrschen – auch vor dem Hintergrund des Klimawandels.
- Ohne Wasser keine Zukunft! Wasserwirtschaft als elementare Grundlage des Strukturwandels im Rheinischen Revier.
- Keine Energiewende ohne Wasser! Nachhaltige und ökologische Wasserverwendung.
- Europäische Nachbarschaft flussgebietsbezogen leben! Enge Abstimmung intensivieren, gemeinsame Ansätze für Bewirtschaftung- und Schutz der Gewässer entwickeln.
- Neue Wasserexperten braucht das Land! Fachkräfte für eine starke Wasserwirtschaft im demographischen Wandel.
- Gemeinsame Kommunikation stärken! Öffentlichkeitsarbeit und Umweltbildung weiterentwickeln.
- Wasserinfrastruktur für zukünftige Generationen sichern! Initiative zur Bestandserhaltung und neue Infrastrukturen für neue Herausforderungen.
- Neue Formen der Zusammenarbeit! Initiative zur Verbesserung wasserwirtschaftlicher Strukturen.

Weitere Informationen:

Portal "Umwelt und Wasser", Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
<https://www.umwelt.nrw.de/themen/umwelt/umwelt-und-wasser>

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen vom 14. Mai 2024)

Ausbildung

TU Dresden startet neuen internationalen Masterstudiengang "Water Security and Global Change"

Die Technische Universität Dresden (TUD) hat mit dem Indian Institute of Technology Madras (IITM) und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen den neuen gemeinsamen Masterstudiengang "Water Security and Global Change" gestartet. Er wird unter dem Dach des "Global Water and Climate Adaptation Centre – ABCD-Centre" organisiert. Weitere Partner sind das Asian Institute of Technology (AIT) in Bangkok und das Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources der Universität der Vereinten Nationen (UNU-FLORES) in Dresden. Das Programm wird vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) mit Mitteln des Auswärtigen Amtes gefördert.

Der Studiengang bündelt das wasserspezifische Fachwissen aller Partnerinstitute und konzentriert sich auf die Bedürfnisse der regionalen, nationalen und internationalen Akteure. Inhalte sind z. B. Wasserressourcenmanagement, Wasserpolitik und Governance, Wasserqualität und -verschmutzung, Verständnis des Wassersystems sowie allgemeine Fragen zu den Auswirkungen des globalen Wandels, ethischen und sozialen Dimensionen, Kommunikation und Führung. Das interdisziplinäre Studium und die aktuelle Forschung befähigen die Studierenden in diesem Masterprogramm, die Herausforderungen der Wassersicherheit und der Klimaanpassung in einem globalen Umfeld anzugehen.

Die Studierenden beginnen das Studium am IIT Madras und verbringen mindestens ein Semester an der TU Dresden und der RWTH Aachen, wobei das IITM fünf und die TUD und RWTH jeweils sechs Kurse anbieten. Der Studiengang ist modular aufgebaut und beinhaltet ein Mobilitätsfenster für ein Auslandsstudium sowie Möglichkeiten zur Spezialisierung. Abschließend haben die Studierenden die Möglichkeit, ihre Masterarbeit an einer Universität ihrer Wahl unter der Betreuung eines oder mehrerer Partner, d. h. Unternehmen, Regierungsbehörden und Nichtregierungsorganisationen und/oder assoziierten Universitäten, zu schreiben. Weitere Informationen sind online verfügbar.

Die ABCD-Centre-Gemeinschaft lädt motivierte Studierende ein, sich für dieses Programm zu bewerben, um zukünftige Führungskräfte in der Klimaanpassungswissenschaft zu werden.

Weitere Informationen:

Weitere Einzelheiten zum Programm, Informationen über die Zulassungskriterien und Link zur Bewerbung:
<https://abcd-centre.org/master-program>

Dezernent Bereich Bau und Umwelt &
Referent Internationales, TU Dresden
<https://tu-dresden.de/>

(aus: Pressemitteilung Universität Dresden vom 23. April 2024)

Projektbericht

Extreme Nässe und Hochwasser in Deutschland – Eine hydrologische und meteorologische Betrachtung der Ereignisse von Herbst 2023 bis Frñhsommer 2024

1 Hydrologische Situation

Nach einer mehrjährigen Phase mit tendenziell unterdurchschnittlichen Niederschlägen und teils großer Trockenheit in Deutschland (KELLER et al., 2019; TIJDEMAN & MENZEL, 2021) begann bereits im Herbst 2023 ein Zeitraum außergewöhnlicher Nässe. Zwischen dem 1. Oktober 2023 und dem 31. März 2024 fielen im Deutschlandmittel etwa 540 mm Niederschlag, das entspricht einer Abweichung vom vieljährigen Mittel in Höhe von + 150 % im Vergleich zur Normalperiode 1961 bis 1990, bzw. + 144 % bezogen auf den Zeitraum 1991 bis 2020.

Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes sind das etwa 2/3 der gesamten Niederschlagsmenge in Deutschland in einem durchschnittlichen Niederschlagsjahr. Damit ist der Winter 2023/2024 das mit Abstand niederschlagsreichste Winterhalbjahr seit Beginn der systematischen Messungen im Jahre 1881. Nahezu flächendeckend konnten somit bestehende Boden-

feuchtedefizite aufgefüllt werden, und die Grundwasserstände zeigten zum Ende des Winters vielerorts Maximalstände an (Abb. 1). In weiten Teilen Süddeutschlands lagen die prozentualen Abweichungen vom langjährigen Niederschlagsmittel sogar deutlich über den gesamtdeutschen Werten.

Aufgrund der Sättigung der Böden sowie anhaltender Niederschläge kam es im Dezember 2023 zu einer ersten Hochwasserwarnlage. Vor allem in der zweiten Monathälfte fielen verbreitet ergiebige Niederschläge, die oft in Verbindung mit Schneeschmelze in mehreren Bundesländern zu Weihnachts- und Neujahrshochwassern führten. Besonders betroffen waren die Flussgebiete von Ems, Weser und Elbe, aber auch an Main, Mosel, Mittel- und Niederrhein sowie im Nordosten Bayerns kam es gegen Ende des Jahres 2023 zu großen Hochwassern. Unter den zahlreichen regionalen Extremereignissen sind die langanhaltenden Überschwemmungen in Norddeutschland hervorzuheben, die die niedersächsische Landesregierung veran-

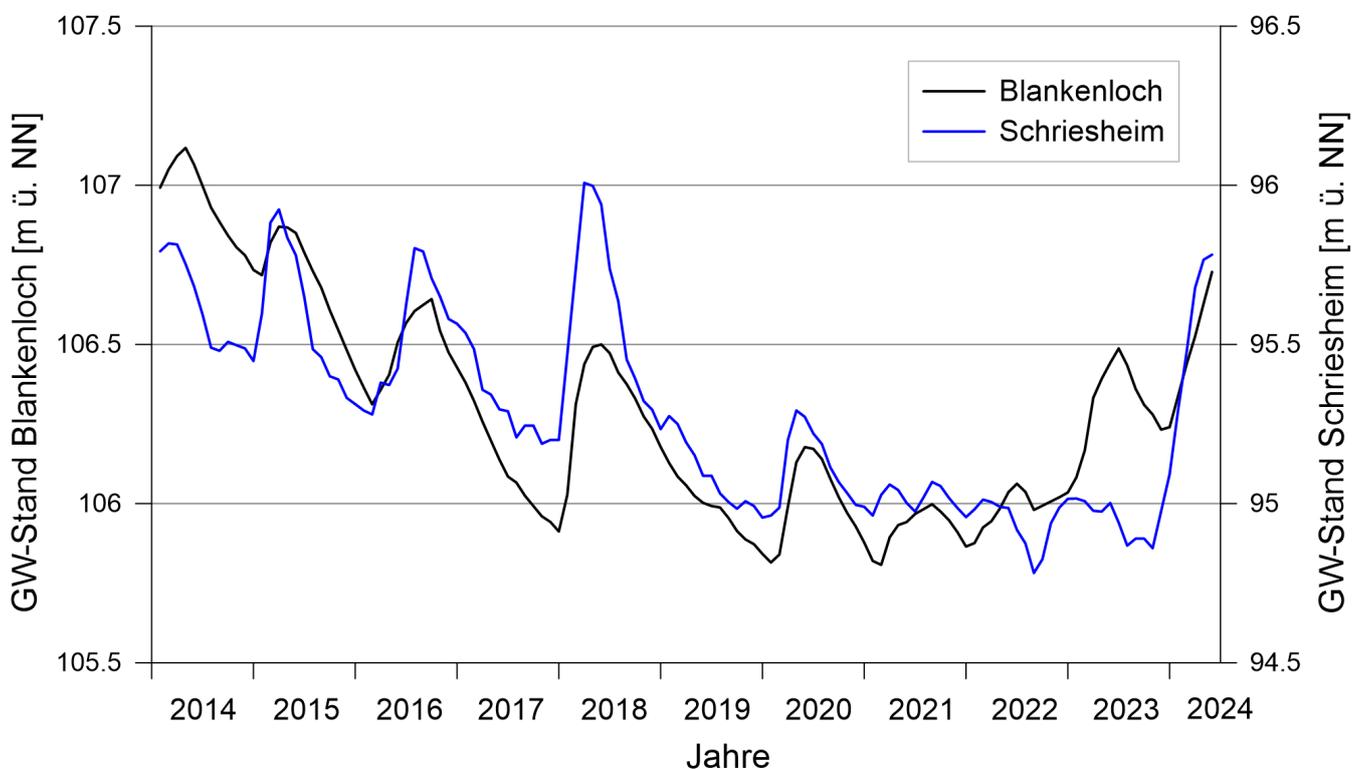


Abbildung 1

Ganglinien der Grundwasserstände an den Grundwassermessstellen Blankenloch (bei Karlsruhe) und Schriesheim (bei Heidelberg). Berücksichtigt sind die Monatswerte der Messungen bis einschließlich Mai 2024. Erkennbar sind die steilen Anstiege der Grundwasserstände gegen Ende 2023/Anfang 2024. Die Daten der beiden Messstellen im Bereich der quartären Lockergesteine des Oberrheingrabens sind Beispiele der Grundwasserstands-Entwicklung der vergangenen zehn Jahre. Sie sind keinesfalls repräsentativ für andere Grundwassergebiete. Eigene Darstellung, auf Basis von Daten der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (<https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/>).

lassten, die Bundeswehr um Hilfe zu bitten. Kurz darauf wurde der europäische Katastrophenschutzmechanismus ausgelöst, in dessen Folge u.a. französische Hochwasserhelfer ein mobiles Deichsystem an der Aller errichteten.

Während im März 2024 die ergiebige Niederschlagsphase über ganz Deutschland zunächst beendet schien und im April 2024 in Teilen Mittel- und Nordostdeutschlands bereits erste Anzeichen einer sich etablierenden Trockenheit auftraten, setzte sich die überdurchschnittlich feuchte Witterung in Süddeutschland fort. Ein nächster Höhepunkt war das Hochwasser im Saarland und im südlichen Rheinland-Pfalz Mitte Mai 2024, als von Nordbaden über das südliche Rheinland-Pfalz bis ins Saarland 24-Stunden-Niederschlagssummen von 70 mm bis über 100 mm gemessen wurden. Entsprechend schnell bildeten sich Hochwasser mit Schwerpunkten im Saarland, im südlichen Rheinland-Pfalz und im angrenzenden Frankreich, die insbesondere im Saarland zu 20- bis 100-jährlichen Hochwasserereignissen führten.

Gegen Ende Mai 2024 entwickelte sich in weiten Teilen Süddeutschlands eine überregionale Unwetterlage. Allein in den vier Tagen zwischen dem 31. Mai und 3. Juni 2024 fielen im Großraum zwischen Bodensee, Albvorland und Unterfranken im Westen, Alpenvorland im Süden, Mittelfranken im Norden und Niederbayern im Osten Gebietsniederschläge von bis zu 150 mm, im Alpenvorland teilweise bis zu 300 mm. Während zu Beginn großflächiger Dauerregen dominierte, änderte sich die Niederschlagsdynamik hin zum Auftreten zahlreicher konvektiver Zellen mit Starkniederschlägen, die oft eine hohe Stationarität aufwiesen. Tagessummen von deutlich über 100 mm Niederschlag waren keine Seltenheit. Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes hatten die akkumulierten Niederschlagssummen in weiten Teilen Süddeutschlands eine statistische Wiederkehrzeit von mehr als 100 Jahren.

Aufgrund der Regenfluten und der sich lokal bereits entwickelnden Überschwemmungen wurde in mehreren Landkreisen Bayerns der Katastrophenfall ausgerufen und tausende Einwohner vorsorglich evakuiert. Außergewöhnlich große Hochwasser mit Abflüssen, die nach heutiger Statistik seltener als einmal in hundert Jahren auftreten, d. h. HQ100 deutlich überschreiten, traten vor allem an einigen rechtsseitigen Donauzuflüssen auf (Abb. 2). Hier und in anderen Regionen kam es zu zahlreichen Damnbrüchen, Überflutungen und Hangrutschungen, die die Infrastruktur, insbesondere den Bahnverkehr, tagelang stark beeinträchtigten.

Zahlreiche Pegel überschritten die für Bayern höchste Meldestufe 4. Auch entlang der Donau selbst kam es zu massiven Schäden und Beeinträchtigungen, z. B. wurden Teile der Altstadt von Passau überflutet. Mit einer statistischen Wiederkehrzeit von ca. 10 Jahren war das Hochwasser an der unteren Donau aber deutlich von früheren Extremen, wie z. B. dem Hochwasser im Juni 2013, entfernt (Abb. 2). Auch in Baden-Württemberg gab es zahlreiche Hochwasserereignisse, die sich aber meist im Rahmen von 5- bis maximal 50-jährlichen Ereignissen bewegten (Abb. 3).

2 Meteorologische Analyse

Die Ursachen für die Hochwassersituation im Saarland und später in Süddeutschland erscheinen zunächst wenig spektakulär. Mitverantwortlich war zunächst ein kräftiges, blockierendes Hoch, das sich bereits im März/April 2024 über Skandinavien

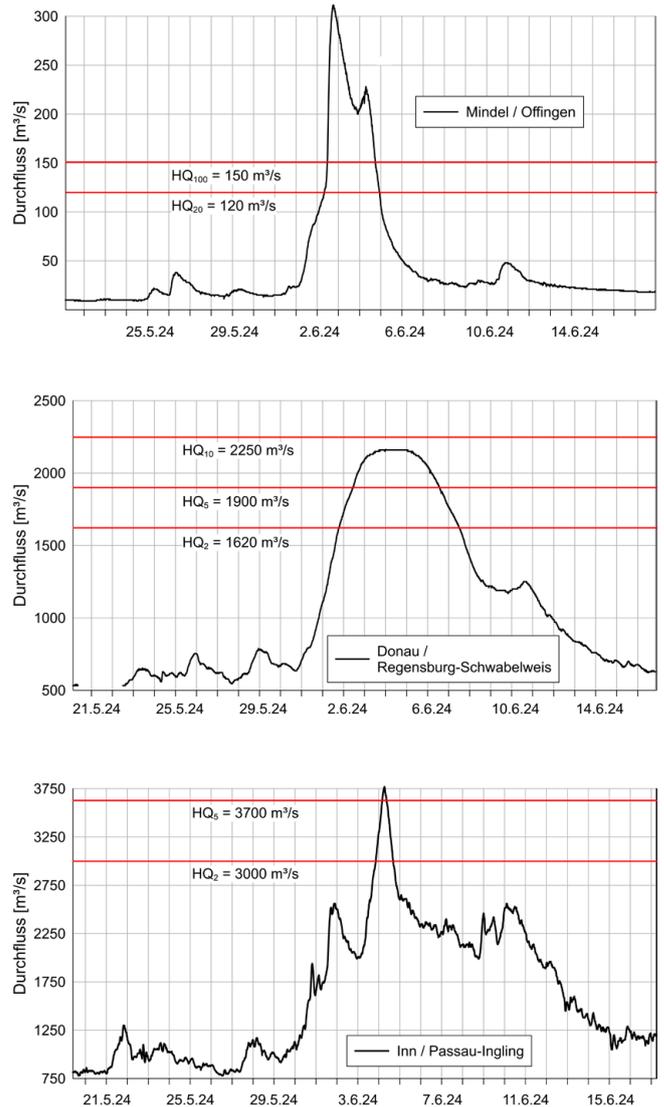


Abbildung 2
 Abflussverlauf vom 20. Mai bis 17. Juni 2024 an den Pegeln Mindel bei Offingen, ein rechter Donauzufluss, Donau bei Regensburg-Schwabelweis und Inn bei Passau-Ingling. Einige Donauzuflüsse aus dem Alpenvorland wie Günz und Mindel führten Anfang Juni 2024 extreme Hochwasser und verschärften die Situation an der Donau. In Regensburg trat zwar nur ein knapp 10-jährliches Hochwasser auf, das aber lange auf hohem Niveau verharrte und nur zögerlich zurückging. Am Inn in Passau trat ein etwa 5-jährliches Hochwasser in Form eines ausgeprägten Scheitels auf. Im Einzugsgebiet des Inns fiel im Vergleich zu anderen Regionen weniger Niederschlag, der zudem in höheren Lagen als Schnee zwischengespeichert wurde und so die Hochwassersituation entschärfte. Durch konvektive Starkniederschläge im gesamten deutschen Einzugsgebiet der Donau stiegen die Ganglinien der Flüsse auch nach Mitte Juni immer wieder an, so dass die Hochwasserwarnungen noch lange bestehen blieben. Eigene Darstellungen, auf Basis von 15-Minuten Werten (Rohdaten). Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, www.lfu.bayern.de.

etablierte, u. a. durch die frühzeitige Abschwächung des Polarwirbels in der polaren Stratosphäre. Dadurch wurden Höhenwinde weit nach Süden abgelenkt und führten relativ kalte Luftmassen nach Mitteleuropa. Flankiert wurde das großräumige Hoch von tiefem Druck über der Biskaya, der feuchte Luftmassen vom Atlantik nach Mitteleuropa führte. Im Bereich des Aufein-

**Abbildung 3**

Am Neckar, hier in Heidelberg, trat um den 4. Juni 2024 ein etwa 10-jährliches Hochwasser auf (Fotos: Lucas Menzel).

andertreffens der beiden Luftmassen kam es zu ausgedehnten Hebungsvorgängen mit anhaltenden und ergiebigen Niederschlägen.

Auffällig ist, dass im Nordatlantik seit mehr als einem Jahr ungewöhnlich hohe Wassertemperaturen gemessen werden, wie sie bisher noch nicht beobachtet wurden. Damit war der Wasserdampfgehalt der atlantischen Luftmassen für die Jahreszeit sehr hoch, was zu einer verstärkten Labilisierung der Luftmassen und einer Intensivierung der Niederschlagsprozesse über Mitteleuropa führte. Hervorzuheben ist auch die zeitliche Persistenz der Großwetterlagen, die für die lange Dauer der Niederschläge bzw. die immer wieder auflebende Niederschlagsdynamik verantwortlich waren. Weite Teile Nord- und Nordostdeutschlands verblieben dagegen im Einflussbereich des großräumigen Hochs, sodass es dort lange trocken blieb und bereits Mitte Mai hohe Waldbrandgefahr bestand. Die Hochwassersituation Mitte Mai 2024 im Südwesten und Westen Deutschlands entwickelte sich, indem auf der Vorderseite des Tiefs mit Kern über der Biskaya feuchte subtropische Luft entlang einer Tiefdruckrinne nordwestwärts über Baden-Württemberg, Südhessen, das Saarland und das südliche Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen geführt wurde.

Die Randbedingungen für die teils extremen Hochwasser in Süddeutschland Ende Mai/Anfang Juni 2024 wurden also durch die schon länger bestehende Konstellation mit ergiebigen Niederschlägen und hohen Bodenvorfeuchten gesetzt. Die Situation kulminierte jedoch in der Ausbildung einer sogenannten Vb-Wetterlage. Diese tritt durchaus mehrmals im Jahr auf (HAMOUDA et al., 2023), führt zu ergiebigen Niederschlägen und kann – muss aber nicht – zu brisanten Hochwassersituationen führen.

Gegen Ende Mai 2024 bildete sich zwischen zwei nahezu stationären Hochdruckgebieten mit Kern über dem östlichen Atlantik/Nordspanien bzw. über NW-Russland eine Tiefdruckrinne, die von der Adria bis zur Ostsee reichte. Gleichzeitig waren die Wasseroberflächentemperaturen des Mittelmeeres für die Jahreszeit ungewöhnlich hoch, so dass außergewöhnlich feuchtwarme Luftmassen auf der typischen Vb-Zugbahn von der Adria ostwärts um den Alpenbogen herum nach Mitteleuropa zogen. Dabei nahmen sie durch die Verdunstung der Landoberflächen weitere Feuchtigkeit auf. Es erfolgte Eindrehen über dem Süden Deutschlands und eine ausgedehnte Warmluftadvektion über kühlerer Atlantikluft. Das dabei entstandene Regengebiet war sehr ortsfest; zu den hohen Niederschlagsmengen trugen im weiteren Verlauf auch zunehmend konvektive Einflüsse bei, die

durch eine nordöstliche Strömung nach Süddeutschland geführt wurden und zu zahlreichen Niederschlagsspitzen beitrugen.

Anfang Juni 2024 war die extrem nasse Phase dann jedoch keineswegs beendet. Es trat zunächst ein Zwischenhocheinfluss in Süddeutschland auf, der eine Zufuhr feucht-warmer Luftmassen aus Südeuropa bewirkte. Damit verschärften sich die Temperaturgegensätze zwischen Nord- und Süddeutschland. Bereits Mitte Juni überquerte ein atlantischer Langwellentrog die Mitte Deutschlands, der die labilen atmosphärischen Bedingungen durch hohe Beträge der vertikalen Windscherung verstärkte. Eine Unwetterlage entstand, die von Westdeutschland über die Mitte des Landes zog. Sie war durch organisierte, langlebige, aber recht mobile Gewittersysteme und Superzellen geprägt. In deren Gefolge trat nicht nur Starkniederschlag auf, sondern es entstanden Schäden durch Hagel und hohe Windgeschwindigkeiten mit teils Orkanstärke. Eine nachhaltige Beruhigung der in weiten Teilen Deutschlands wechselhaften und zu wiederholten Niederschlägen neigenden Witterung war bis zur Fertigstellung dieses Berichtes Ende Juni 2024 nicht absehbar.

3 Fazit

Die außergewöhnliche Nässe in vielen Regionen Deutschlands, die bereits im Oktober 2023 begann, beendete eine mehrjährige Periode mit vergleichsweise geringen Niederschlägen und häufigen hydrologischen Dürren. Neben einer deutlichen Verbesserung der Grundwassersituation kam es zwischen Ende 2023 und Frühsommer 2024 zu zahlreichen Hochwasserereignissen, die deutschlandweit Schäden in Milliardenhöhe verursachten und auch Menschenleben forderten.

Bei isolierter Betrachtung der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen der jeweiligen Einzelereignisse lassen sich keine beispiellosen Besonderheiten feststellen. Erst eine Gesamtschau führt zu denkwürdigen Ergebnissen:

- Stark positive Abweichungen der Luft- und Meeresoberflächentemperaturen über nahezu den gesamten Zeitraum.
- Besonders langanhaltende Niederschlagsperioden mit häufigem, oft durch Starkregen verstärktem Dauerregen und weit überdurchschnittlichen Niederschlagssummen.
- Hohe räumliche Stationarität der Niederschlagsgebiete.
- Bemerkenswerte Häufung von Hochwasserereignissen unterschiedlicher Ursache in kurzer Zeit.

Besonders auffällig waren die konvektiven Niederschlagsspitzen, welche insbesondere in die Dauerregenlage Ende Mai bzw. Anfang Juni in Süddeutschland eingelagert waren und

bislang Seltenheitswert hatten. Derartige Situationen wurden jedoch schon mehrfach für die Randbedingungen einer wärmeren Atmosphäre prognostiziert.

Hervorzuheben ist die gute Vorwarnung durch den Deutschen Wetterdienst. Die Vorhersagbarkeit der Starkregenlagen ermöglichte lange Vorwarnzeiten und die Niederschlagsvorhersagen waren zuverlässig, auch wenn die genauen Niederschlagsschwerpunkte natürlich kaum vorhersehbar waren. Die Hochwasserzentralen waren entsprechend gut informiert, gaben rechtzeitig Warnungen heraus und konnten zumindest für die größeren Flüsse belastbare Vorhersagen treffen. Auch die Zusammenarbeit zwischen Katastrophenschutz, Feuerwehren und Rettungsdiensten funktionierte überwiegend sehr gut. Erfreulich war auch die grenzüberschreitende Hilfeleistung.

Ein wesentlicher Aspekt, der nach wie vor als kritisch angesehen werden muss, ist die Gefahrenwahrnehmung in Teilen der Bevölkerung. So wurde vom Verfasser dieses Beitrages beobachtet, dass bei deutlich steigendem Wasserstand bereits teilweise überflutete Parkplätze angefahren wurden, um dort Autos abzustellen. Ähnliches berichten auch die Feuerwehren, die häufig Autofahrer aus misslichen Lagen befreien mussten, in welche diese durch Fehleinschätzungen der jeweiligen Situation geraten waren. Hier scheint noch viel Aufklärungsarbeit nötig zu sein.

Literaturverzeichnis

- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD): Thema des Tages, https://www.dwd.de/SiteGlobals/Forms/ThemaDesTages/ThemaDesTages_Formular.html.
- HAMOUDA, M.E., C. CZAKAY, C. PRIMO, A. HOFF & B. AHRENS (2023): Zu atmosphärischen Ursachen für extreme Hochwasserereignisse in Mitteleuropa. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 67(5), 209–219.
- HOCHWASSERNACHRICHTENDIENST BAYERN, <https://www.hnd.bayern.de/>.
- HOCHWASSERVORHERSAGEZENTRALE BADEN-WÜRTTEMBERG, <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/>.
- KELLER, T., M. KRAFT, V. MAURER, L. MENZEL & E. TIJDEMAN (2019): Das hydrometeorologische Jahr 2018: Subtropensommer und extreme Trockenheit. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 63(2), 113–116.
- LHP – Länderübergreifendes Hochwasserportal, <https://hochwasserzentralen.info/>.
- TIJDEMAN, E. & L. MENZEL (2021): The development and persistence of soil moisture stress during drought across southwestern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2009–2025, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2009-2021>.

*Prof. Lucas Menzel,
Professur für Hydrologie und Klimatologie, Universität Heidelberg
lucas.menzel@uni-heidelberg.de*

Deutsche Hydrologische Gesellschaft

Forschungsstipendien für hydrologische Feldstudien

Die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG) vergab dieses Jahr wieder Feldstipendien, um Nachwuchswissenschaftler bei innovativen hydrologischen Feldstudien zu unterstützen. Die Förderung dient dazu, junge Forschende dazu zu befähigen, eigenverantwortlich und auf hohem wissenschaftlichem Niveau Prozessverständnis für die hydrologische Grundlagenforschung oder für angewandte Forschungsfelder zu erlangen oder Pilotstudien für Projektanbahnungen durchzuführen.

In der diesjährigen Ausschreibung der DHG Forschungsstipendien waren insgesamt 4 Nachwuchswissenschaftler erfolgreich, die mit ihren Anträgen sehr aktuelle Themen mit innovativen Lösungen angesprochen haben. Die Forschenden werden innerhalb der kommenden 12 Monate ihre Forschungspläne in Albanien, Deutschland und Chile umsetzen.

Aaron Neill von der Justus-Liebig-Universität Gießen plant die Entwicklung, Erprobung und Validierung einer innovativen, bildbasierten Methode zur Erkennung von Feucht- und Trockengebieten in Einzugsgebieten. Diese Informationen sollen Aufschluss über den hydrologischen Zusammenhang von Landschaftselementen und deren Beitrag zur Abflussbildung geben. Hierzu wird Herr Neill im Schwingbach Environmental Observatory (Hessen) Zeitraffer-Farbinfrarotaufnahmen und automatische In-situ-Isotopenmessungen verwenden, wobei ein mobiles Isotopenlabor zum Einsatz kommt.

Marius Lauer vom Institut für Umweltwissenschaften und Geographie an der Universität Potsdam wird sich mit Bewässerungsstauseen im Seman-Einzugsgebiet in Albanien beschäftigen. Diese sind essenziell für die Wasserversorgung, den Hochwasserschutz und die landwirtschaftliche Bewässerung, allerdings nimmt die Kapazität dieser Reservoirs seit dem Jahr 1990 aufgrund von Sedimentation stetig ab. Herr Lauer wird daher die Sedimentationsprozesse untersuchen, die Sedimentfracht bewerten und darauf aufbauend die zu erwartende Lebens- bzw. Nutzungsdauer der Stauseen beurteilen. Dabei werden Bathymetrie mit Fernerkundung und GIS-Analysen kombiniert, um eine umfassende Analyse der Sedimentdynamik durchzuführen.

Christina Radtke von der Abteilung Hydrologie und Flussgebietsmanagement der Technischen Universität Braunschweig plant, das Prozessverständnis für die Nährstoffdynamik in der urbanen Grunewaldseenkette in Berlin zu verbessern. In dieser Seenkette fließt das Wasser mit Hilfe von Pumpen entgegen der natürlichen Fließrichtung und das Ökosystem unterliegt hohen Nährstoffbelastungen aus den städtischen Mischwasserkanälen. Auf Basis einer Vielzahl an Messungen wird ein Datensatz erstellt, mit welchem die Nährstoffdynamik im Gesamtsystem der Grunewaldseenkette nachvollzogen werden kann.

Frieder Tautz vom Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam wird in den Patagonischen Regenwäldern den Kohlenstoffkreislauf untersuchen. Bedingt durch Landschaftsstörungen und getrieben durch starke Nieder-

schlags- und Abflussereignisse können diese Wälder episodisch als Quelle oder Senke für Kohlenstoff fungieren. Die Messung dieser zeitlichen Variabilität ist aber besonders aufwendig. Unter Anwendung nicht-invasiver, kontinuierlicher und flächendeckender umweltseismologischer Messmethoden soll ein Monitoring von ökohydrologische Prozessraten wie Abfluss, Niederschlag oder Großholzmobilität erfolgen.

Die DHG-Feldstipendien werden einmal jährlich ausgeschrieben und sind für die volle Bandbreite der hydrologischen Prozessstudien, aber auch für interdisziplinäre Studien vorgesehen. Durch die Stipendien haben die Nachwuchswissenschaftler frühzeitig die Möglichkeit, selbständig und in Eigenverantwortung innovative Forschungsarbeiten auf hohem wissenschaftlichem Niveau durchzuführen.

Die nächste Ausschreibung erfolgt im Frühjahr 2025; Deadline für die nächste Beantragung ist am 31. Mai 2025. Weitere Informationen hierzu finden Sie auf der Homepage der DHG unter www.dhydrog.de.

*Prof. Peter Chiffard, Schriftführer
Deutsche Hydrologische Gesellschaft*

Tag der Hydrologie 2025: Resilienz des Wasserhaushalts – Bewältigung von Hochwasser, Hitze und Trockenheit (Universität Augsburg, 19. bis 21. März 2025)

Hochwasser, Dürren und Hitzewellen nehmen weltweit zu. In Deutschland zeigt sich dies sowohl in einer ganzen Serie von Trockenjahren (2018, 2019, 2020 und erneut 2022 und 2023) als auch in einer zunehmenden Häufigkeit von Starkniederschlags- und Hochwasserereignissen. Der globale Klimawandel spielt dabei eine grundsätzlich verstandene Rolle. Aber: Damit aus veränderten Niederschlägen regional Hochwasser oder Wasserknappheit entstehen, sind auch veränderte Landnutzung und -bewirtschaftung, insbesondere Bodenversiegelung, Verdichtung und Entwässerung, von entscheidender Bedeutung. Sie beeinflussen z. B. direkt Wasserverluste durch Abfluss und können damit gleichermaßen Hochwasser und Wasserknappheit bewirken.

Der Tag der Hydrologie 2025 an der Universität Augsburg widmet sich diesem aktuellen Thema – besonders, wie die Resilienz des Landschaftswasserhaushaltes verbessert werden kann, und zwar unter Berücksichtigung der kombinierten Effekte von Klima- und Landnutzungswandel. Neben Fragen der Modellierung und der Messung dieser kombinierten Effekte und ihrer Trends werden auch Anpassungsmaßnahmen und die Herausforderungen bei deren Umsetzung adressiert. Für letztere sind transdisziplinäre Forschungsansätze gefragt, deren Kommunikation während des TdH 2025 ebenfalls Raum gegeben wird.

*Prof. Dr. Harald Kunstmann & Prof. Dr. Peter Fiener
Zentrum für Klimaresilienz & Institut für Geographie,
Universität Augsburg*

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

in der DWA (FgHW)

Resilienz im Hochwasser- und Starkregenmanagement – DWA-Themen T2/2024 erschienen

Angesichts der verheerenden Schäden, die Hochwasser und Überflutungen infolge von Starkregen seit dem Jahreswechsel 2023 auf 2024 allein in Deutschland angerichtet haben, stellt sich zunehmend drängender die Frage nach der Resilienz der deutschen Wasserwirtschaft und der Gesellschaft insgesamt gegenüber Naturgefahren. Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) hat sich in den vergangenen Jahren intensiv mit dieser Frage auseinandergesetzt und nun die Erkenntnisse der Expertinnen und Experten aus wasserwirtschaftlicher Sicht zusammengetragen. Aufgrund der offensichtlichen gesellschaftlichen Bedeutung des Wissens um die Möglichkeiten zur Stärkung der Resilienz möchte die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW) an dieser Stelle auf diesen Band besonders hinweisen.

Das Heft geht auf wesentliche Fragestellungen rund um den Begriff Resilienz ein. Es beschreibt die Herangehensweisen, mit denen die Widerstandskraft und die Fähigkeit zur Regeneration im Kontext von Überflutungsgefahren bewertet werden und es zeigt anhand von Praxisbeispielen die konkrete Umsetzung von Maßnahmen für eine Stärkung der Resilienz auf. Die Publikation, die eine Pflichtlektüre für alle Verantwortlichen in der Daseinsvorsorge sein sollte, ist über die DWA zu beziehen (<https://shop.dwa.de/>).

16. DWA-Hochwassertag am 6. November 2024 in Augsburg

Der diesjährige DWA-Hochwassertag trägt den Titel "Extremereignisse: Neue Erkenntnisse, Maßnahmenplanung und Herausforderungen". Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Umgang mit Extremereignissen bei Hochwasser und Starkregen in der praktischen Umsetzung. Die Veranstaltung nimmt daneben die Auswirkungen veränderter Wetterlagen auf Abflüsse und Schäden in den Fokus. Von besonderem Interesse ist in diesem Jahr auch die Sicht der Kommunen auf die Bewältigung extremer Hochwasser-/Starkregenereignisse. Mit der Frage nach der Zusammenarbeit von Kommunen mit den Experten der Wasserwirtschaft und des Katastrophenschutzes in Bayern wird nochmals die Thematik des Hochwassertages 2023 aufgegriffen. Angesichts der überwältigenden Überflutungen im Mai und Juni 2024 wurde die Bedeutung dieses Aspektes nochmals besonders deutlich. Die Veranstaltungsteilnehmer sind eingeladen, sich an der offenen Diskussion zu beteiligen. Für den Erfahrungsaustausch und die Diskussion mit Kollegen und Ausstellern steht in den Pausen wie immer genügend Zeit zur Verfügung. In die-sem Sinne bietet der diesjährige Hochwassertag wieder die gute Gelegenheit, sich über die vielfältigen Aspekte beim Umgang mit dem Überflutungsrisiko zu informieren. Wir freuen uns, Sie in Augsburg zu begrüßen. Programm und Anmeldung finden Sie u. a. unter www.fghw.de.

Hydrologie im Anthropozän – FgHW-Forum, Heft 45.24 erschienen

Der Tagungsband zum diesjährigen "Tag der Hydrologie 2024" in Berlin ist erschienen und steht kostenfrei zum Download bereit (<https://de.dwa.de/de/publikationen-7094.html>).

Mit diesem Band der Reihe des FgHW-Forums legt Herr Dr. Christian Reinhardt-Imjela sein letztes Werk als Redakteur der Schriftenreihe vor. Das Heft enthält insgesamt 17 Beiträge zum "Tag der Hydrologie". Die Aufsätze beleuchten die Themenfelder Hydrologie und Mensch, Hydrologie und Stadt, Hydrologie und Ökologie sowie Hydrologie und Technik. Der nachfolgende Auszug aus dem Vorwort soll Sie darauf einstimmen:

Im Jahr 2024 feierte der "Tag der Hydrologie" in Berlin sein 25-jähriges Bestehen. Seit der ersten Veranstaltung 1999 in Kaiserslautern haben die hydrologischen Wissenschaften und die Wasserwirtschaft Antworten auf offene Fragen geliefert, Kenntnislücken gefüllt und wichtige Beiträge zur Lösung gesellschaftlicher Probleme geleistet. Andererseits zeigen die jüngsten hydrologischen Extremereignisse, wie beispielsweise das Ahrhochwasser 2021, dass es gegenwärtig – und zweifellos auch in der Zukunft – große Herausforderungen an Hydrologie und Wasserwirtschaft in einer sich wandelnden Welt gibt. Allen voran bleiben der globale Klimawandel und seine Folgen sowie die nachhaltige Bewirtschaftung der knapper werdenden Wasserressourcen besondere Aufgaben der Wissenschaft und Praxis.

Die Vielfalt der wissenschaftlichen Herausforderungen kommt auch in den Beiträgen der vier o. g. Themenfelder zum Ausdruck. Der Tagungsband enthält eine Auswahl dieser Beiträge, die auf dem Tag der Hydrologie vorgestellt wurden.

Besuchen Sie die Seiten der FgHW (www.fghw.de) – gerne können Sie den Band dort digital und kostenfrei beziehen.

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

Neue Publikationen

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.) (2024):

FAQ Starkregen. Häufig gestellte Fragen zu Hochwassergefahren infolge von Starkregen. Infoblatt, 7 Seiten.

Download: [https://www.bestellen.bayern.de/application/app/istarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:4015,AARTxNR:lfu_was_00340,AARTxNODENR:369481,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/app/istarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:4015,AARTxNR:lfu_was_00340,AARTxNODENR:369481,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X)

Blanken, P. (2024): Essentials of Water: Water in the Earth's Physical and Biological Environments. 1. Auflage, 342 Seiten, Cambridge University Press.

ISBN: 9781108984379

Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2024):

Instrumente zur Förderung naturverträglicher dezentraler Wasserrückhaltmaßnahmen (NWRM). Autoren: Beisecker, R., Seith, T., Krähling, J., Dießelberg, F., Strom, A., Kröcher, J., Hannappel, S., Thormann, B., Herzog, W., Becker, C., Schubert, K.; NaBiV Heft 176, 352 Seiten, Verlag Bundesamt für Naturschutz.

ISBN: 978-3-7843-4077-7

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) (2024):

Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation an der Mittelelbe von Tangermünde bis Geesthacht – 2D-Modellierung Mittelelbe. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-2175, Koblenz. Autoren: Schramm, W., Promny, M., Hatz, M.; 182 Seiten. DOI: 10.5675/BfG-2175.

Download: https://www.bafg.de/DE/Service/Presse/_doc/2024/240412_elbe2D.html

Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) & Bund-Länder-Arbeitsgruppe Klimaschutz und Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur (BLAG ALFFA) (Hrsg.) (2024):

Fokus Wasser – Folgen des Klimawandels und Maßnahmen zur Anpassung. Beispiele und Lösungsansätze für Wechselwirkungen zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Aquakultur und Binnenfischerei. 104 Seiten.

Download: <https://www.lawa.de/Publikationen-363-Aktuelle-Veroeffentlichungen.html>

Gutmann, A., Raddatz, F., Bader, H., García Ruales, J., Zenetti, J., Flemmer, R., Putzer, A., Kramm, M. (Hrsg.) (2024):

Rechte für Flüsse, Berge und Wälder. Eine neue Perspektive für den Naturschutz? 112 Seiten, oekom.

ISBN: 978-3-98726-039-1

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) (Hrsg.) (2024):

Die IKSE in den Jahren 2021-2023. 34 Seiten.

Download: <https://www.ikse-mkol.org/publikationen/>

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2024):

Überwachung der Umweltradioaktivität in Nordrhein-Westfalen. Gemeinsamer Jahresbericht 2022 der amtlichen Messstellen für Umweltradioaktivität. 39 Seiten.

Download: <https://www.lanuv.nrw.de/index.php?id=47>

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2024):

Grundwasser-Überwachungsprogramm – 2022. Ergebnisse 2022. Grundwasserschutz 65, 46 Seiten.

Download: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10597>

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2024):

Temperaturrekord und Achterbahnfahrt des Niederschlags. Bericht, 26 Seiten.

Download: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10605>

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK) des Landes Brandenburg (Hrsg.) (2024):

Biber im Land Brandenburg. Artenvielfalt erhalten – Konflikte lösen. 11 Seiten.

Download: <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/ueber-uns/oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/detail/~06-03-2024-biber-im-land-brandenburg>

Mukhopadhyay, B., Singh, V. (2024):

Applied Hydrology. 1. Auflage, 962 Seiten, Cambridge University Press.

ISBN: 9781009376105

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2023):

Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für die Grundwasserstände in Niedersachsen. KliBiW Phase 7 – Abschlussbericht. Grundwasser Band 60, 244 Seiten.

Download: <https://webshop.nlwkn.niedersachsen.de/globaler-klimawandel-gw-60.html>

Singh, V., Singh, R., Paul, P., Bisht, D., Gaur, S. (2024):

Hydrological Processes Modelling and Data Analysis. A Primer. 1. Auflage, 285 Seiten, Springer Singapore.

ISBN: 978-981-97-1318-9

Succow, M., Jeschke, L. (2024):

Deutschlands Moore. Ihr Schicksal in unserer Kulturlandschaft. 2. Auflage, 544 Seiten, Natur+Text.

ISBN: 978-3-942062-60-2

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2024):

Zusammenführung der bundesweiten Modellierung von Wasserhaushalt (LARSIM-ME) und Stoffeinträgen (MoRE). Autoren: Morling, K., Fuchs, S., Krumm, J., Haag, I.; Texte 37/2024, 133 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zusammenfuehrung-der-bundesweiten-modellierung-von>

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2024):

Non-Target Screening in Schwebstoff- und Biotaprobieren. Autoren: Dierkes, G., Boulard, L., Wick, A.; Texte 77/2024, 71 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/non-target-screening-in-schwebstoff-biotaprobieren>

Van Stan, J., Simmons, J. (2024):

Hydrology and Its Discontents. Contemplations on the Innate Paradoxes of Water Research. 1. Auflage, 166 Seiten, Springer Cham.

ISBN: 978-3-031-49770-4.

Termine

Die folgenden Ankündigungen entsprechen dem Wissensstand zum Redaktionsschluss am 30. Juni 2024.

Fachforum: Gewässer im Klimawandel – Grundwasser

28. August 2024 bei der Natur- und Umweltschutz-Akademie NRW (NUA) in Recklinghausen oder online

Webseite: <https://www.umweltbundesamt.de/service/termine/fachforum-gewaesser-im-klimawandel-grundwasser>

Gemeinsame Tagung der Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Europe German Language Branch (SETAC GLB) und der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)

8. bis 11. September 2024 in Gießen und Homberg/Ohm

Webseite: www.setac-glb.de/tagung-2024

Kolloquium Wasserressourcen Deutschlands im Wandel – Herausforderungen und Anpassungsmöglichkeiten

11./12. September 2024 in Koblenz

Webseite: www.bafg.de ->Veranstaltungen

40. Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL): Vierzig Jahre Einfluss auf Süßwassersysteme

16. bis 20. September 2024 in Dresden

Webseite: <https://www.dgl-ev.de/> und <https://www.dgl-jahrestagungen.de/>

13. REKLIM Regionalkonferenz: Klimawandel in Regionen. Regionale Klimaanpassung in Nord- und Ostdeutschland: Herausforderungen und Lösungsansätze

25. September 2024 in Berlin

Veranstalter: Helmholtz-Forschungsverbund Regionale Klimaänderungen und Mensch

Webseite: <https://www.reklim.de/konferenz-2024/>

ExtremWetterkongress 2024 (EWK) und KlimaManagement Tagung (KMT)

25./26. September 2024 in Hamburg

Webseite: <https://extremwetterkongress.org/>

14th Water Research Horizon Conference

26./27. September 2024 in Leipzig

Eine Kooperation von Water Science Alliance (WSA) und Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ).

Webseite: <https://water-research-horizon.de/wrhc.html>

XXVIII. Sächsisches Altlastenkolloquium (SALKO)

4./5. November 2024 in Dresden

Webseite: <https://www.dgfz.de/salko2024>

24. Gewässermorphologisches Kolloquium – Sedimentmanagement in Flussgebieten: Von der Quelle bis zur Senke

5./6. November 2024 in Koblenz

Webseite: www.bafg.de ->Veranstaltungen

16. DWA-Hochwassertag – Extremereignisse: Neue Erkenntnisse, Maßnahmenplanung und Herausforderungen

6. November 2024 in Augsburg

Webseite: <https://eva.dwa.de/details.php?id=6333&lv=1>

Kolloquium "Umgang mit Unsicherheiten in und von hydrologischen Vorhersagen – Wo stehen wir?"

18./19. November 2024 in Koblenz

Webseite: www.bafg.de ->Veranstaltungen

5. Workshop zur Alpen Hydrologie

20. bis 22. November 2024

am Universitätszentrum Obergurgl (Österreich)

Webseite: www.dhydrog.de -> News -> Veranstaltungen

QUISS-Symposium: Quecksilberbelastung in deutschen Fließgewässern: Monitoring und Gewässermanagement

5. Dezember 2024 in Koblenz

Webseite: www.bafg.de ->Veranstaltungen

5. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium

19./20. Februar 2025 an der Hochschule Bochum

Webseite: <https://www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau/bochumer-hydrometrie-kolloquium/>

Tag der Hydrologie 2025: Resilienz des Wasserhaushalts – Bewältigung von Hochwasser, Hitze und Trockenheit

19. bis 21. März 2025 an der Universität Augsburg

Webseite: <https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/zentrum-fur-klimaresilienz/forschung/veranstaltungen/tag-der-hydrologie-2025/>

Erläuterung zur Titelseite

Die Titelseite dieser Ausgabe illustriert das Starkregenereignis vom 29. Mai 2018 und dessen unmittelbare Auswirkungen in Form von Überflutungen am Aachener Westbahnhof. Neben der hier gezeigten Unterführung waren ausgedehnte Bereiche der Aachener Innenstadt betroffen, was zu über 400 Einsätzen der Feuerwehr sowie zu einem Stromausfall im Stadtzentrum führte. Das Ereignis war der Anlass für ausführliche Untersuchungen, welche im ERS Forschungsprojekt "Rainwater Living Lab" durchgeführt wurden. Teile der Ergebnisse sind auf der Titelseite abgebildet.

So zeigt die Collage oben links die gekoppelte Simulation der Interaktion oberflächlicher Abflüsse mit den Prozessen im Kanalnetz. Die Gegenüberstellung der dokumentierten Überflutung anhand einer Aufnahme, kleines Foto oben, und der Simulation ergibt eine gute Übereinstimmung. Eine Darstellung der meteorologischen Analyse, unten links, stellt die Zugbahn sowie die Niederschlagsintensität des Starkregenereignisses zu unterschiedlichen Zeitpunkten dar. Die kombinierte Betrachtung der Wirkungskette von Niederschlag bis Überflutungsfolgen sowie deren interdisziplinäre Analyse zeichnete das Forschungsprojekt und den hier dargelegten Artikel aus.

Das zweite Foto zeigt die erneute starkregeninduzierte Überflutung der Unterführung am Aachener Westbahnhof am 2. Mai 2024 – also fast sechs Jahre später. Die wiederholte Überflutung macht erneut die hohe Relevanz und Aktualität des Forschungsbeitrags im Starkregenrisikomanagement deutlich.

*Dr.-Ing. Julian Hofmann,
M. A. Tim Franke und
M. Sc. Peter Schleifer
RWTH Aachen University*

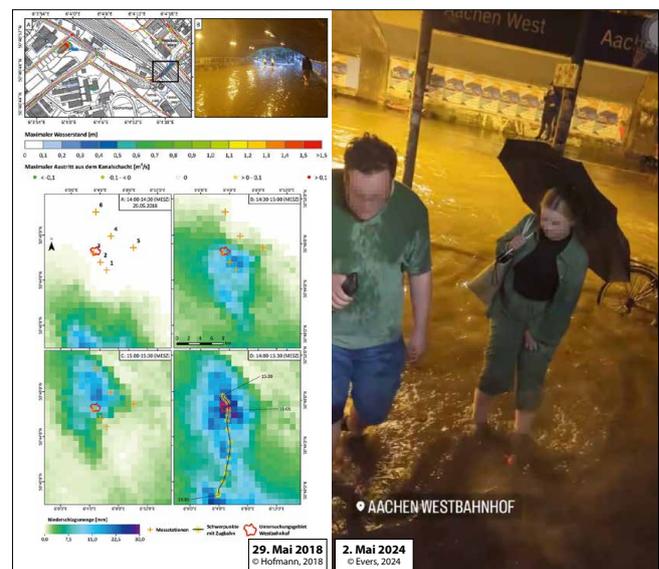


Bild 1: J. Hofmann (2018)

Bild 2: F. Evers (2024)