

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management



Entwicklung einer Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums Schadenspotenzial bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL

Verfahren zur Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser

Projektbericht:
Rekonstruktion der Hochwasserwelle der Ahr im Juli 2021 mithilfe eines hydraulischen Modells des Rheins

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

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

- Hydrologische Prozesse und Kreislaufgeschehen von 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: Dezember 2021)

Prof. Dr. Axel Bronstert,
Universität Potsdam

Prof. Dr.-Ing. Markus Disse,
Technische Universität München

Stephanie Gudat,
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz

Prof. Dr. Bruno Merz,
Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam

Dr. Volker Mohaupt,
Umweltbundesamt

Dr. Heike Puhmann,
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg

Prof. Dr. Britta Schmalz,
Technische Universität Darmstadt

Dr. Natalie Stahl-van Rooijen,
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Sebastian Wrede,
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Redaktion:

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

Proofreading Englisch: ISL Übersetzungsbüro, 56068 Koblenz

Anschrift:

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

Verlagsrechte:

Die eingereichten Aufsätze und Kurzberichte müssen Originalarbeiten sein. Sie dürfen in der vorgelegten oder in ähnlicher Form weder an anderer Stelle eingereicht noch veröffentlicht sein. Mit der Annahme des Manuskripts 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) 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 treated from qualitative, quantitative and ecological aspects

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

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

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

Assoziierte Editoren (Stand: Dezember 2021)

Prof. Dr.-Ing. Jens Bender,
Duale Hochschule Baden-Württemberg

Prof. Dr. Günter Blöschl,
Technische Universität Wien

Prof. Dr. Markus Casper,
Universität Trier

Prof. Dr. Bernd Cyffka,
Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt

Norbert Demuth,
Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz

Dr. Svenja Fischer,
Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt,
Universität Hannover

Dr. Dr. Dietmar Mehl,
biota GmbH

Prof. Dr. Lucas Menzel,
Universität Heidelberg

Prof. Dr. Konrad Miegel,
Universität Rostock

Prof. Dr. Günter Meon,
Technische Universität Braunschweig

Prof. Dr. Elisabeth I. Meyer,
Universität Münster

Prof. Dr. Heribert Nacken,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Dr. Enno Nilson,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Angela Pfister,
Emschergenossenschaft

Dr. Ina Pohle,
Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin

Prof. Dr. Frido Reinstorf,
Hochschule Magdeburg-Stendal

Prof. Dr. Benny Selle,
Beuth Hochschule

Prof. Dr. Benedikt Toussaint,
Taunusstein

Prof. Dr. Markus Weiler,
Universität Freiburg

Prof. Dr. Rolf Weingartner,
Universität Bern

Inhalt | Contents

Vorwort | Foreword

Ermittlung des Schadenspotenzials zur Bewertung des Hochwasserrisikos	4
---	---

Fachartikel | Scientific reports

DOI: 10.5675/HyWa_2023.1_1 Juliane Grüneberg Entwicklung einer Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums Schadenspotenzial bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL Development of a method for the application of the significance criterion damage potential in the review of the flood risk assessment according to the European Floods Directive	6
DOI: 10.5675/HyWa_2023.1_2 Paul L. Ohlert, Martin Bach & Lutz Breuer Verfahren zur Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser Methods for regionalisation of nitrate concentration in groundwater	20

Hydrologische Notizen | Hydrological notes

Aktuelles Latest news	34
Ausbildung Education	46
Interview Interview – Uli Looser/Global Runoff Data Centre (GRDC)	47
Projektberichte – Workshops – Konferenzen Projekt reports – Workshops – Conferences	
Projektbericht Rekonstruktion der Hochwasserwelle der Ahr im Juli 2021 mithilfe eines hydraulischen Modells des Rheins	52

Nachrichten | News

Deutsche Hydrologische Gesellschaft German Hydrological Society	60
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften Association for Hydrological Sciences	61
Neue Publikationen New publications	62
Termine Events	63

Jahresinhaltsverzeichnis 2022

Inhaltsverzeichnis Heft 1 bis 6, 66. Jahrgang 2022	64
--	----

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

Ermittlung des Schadenspotenzials zur Bewertung des Hochwasserrisikos

Das Auftreten von Hochwasser ist Merkmal der natürlichen hydrologischen Dynamik. Hochwasser sind als hydrologische Extrema durch zeitlich begrenzt auftretende, erhöhte Wasserstände gekennzeichnet. Die Ursachen sind dabei regelmäßig meteorologisch determiniert (niederschlagsverursachte Abflüsse, Sturmfluten usw.). Es können aber auch andere Ereignisse verantwortlich sein, z. B. geologisch bedingte Naturgefahren (Erdbeben, Erdbeben usw.). Hochwasserereignisse können zudem bei extremen Ausmaßen zu eigenen oder mit anderen Ereignissen verknüpften Naturkatastrophen führen.

In der hydrologischen Statistik werden an gewässerkundlichen Pegeln gewonnene Daten zu Hochwasserständen oder Hochwasserabflüssen zunächst als maximale Werte, bezogen auf eine bestimmte Zeit, erfasst. Im stochastischen Konzept werden Hochwasserereignisse als Zufallsereignisse betrachtet. Einem Hochwasserkollektiv (im Regelfall Jahreshöchstwerte) wird dabei eine Wahrscheinlichkeitsfunktion angepasst. Dies ermöglicht, die Eintrittswahrscheinlichkeit im beobachteten Bereich zu ermitteln, aber auch im noch unbeobachteten Extrapolationsbereich seltene und sehr seltene Hochwasser im Hinblick auf ihre Auftretenswahrscheinlichkeit abschätzen zu können.

Gerade die Extrapolation (der Blick in die Zukunft) setzt jedoch streng genommen voraus, dass die im beobachteten Bereich maßgeblichen (hydrologischen) Regimefaktoren sich auch in der Zukunft nicht signifikant ändern. Insbesondere angesichts des bereits nachweisbaren und sich weiter beschleunigenden Klimawandels, aber auch aufgrund starker anthropogener Veränderungen in hydrologischen Einzugsgebieten ist das (klassische) stochastische Konzept zunehmend kritisch zu sehen. Zu stark ändern sich vor allem Wetterlagen, Niederschlagscharakteristika, Temperaturen, aber auch Böden und Landnutzungen wie z. B. großflächig absterbende Wälder in Folge der Dürren der letzten Jahre, sodass eine dahingehende Homogenität der Beobachtungsdaten immer weniger vorausgesetzt werden kann.

Für die nächsten Jahrzehnte wird von internationalen und nationalen Fachleuten eine deutliche Zunahme von Häufigkeit, Dauer und Höhe extremer hydrologischer Ereignisse, auch und gerade von Hochwasser, nahezu einhellig erwartet. Verschiedene deutsche Bundesländer reagieren z. B. bereits durch Vorgabe und Anwendung von Zuschlagsfaktoren ("Klimaänderungsfaktor") für die hydrologische Bemessung bei Planung und Bau von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen.

Jüngst wurde in dieser Zeitschrift eine Arbeit zum katastrophalen Hochwasser im Ahrtal im Jahr 2021 veröffentlicht (VOROGUSHYN et al., 2022; DOI: 10.5675/HyWa_2022.5_2), die auch die Notwendigkeit einer Einbeziehung historischer Hochwasserereignisse im Rahmen der Extremwertstatistik belegt. Die Autoren zeigen, dass die Bestimmung von Hochwasserquantilen ohne Berücksichtigung historischer Hochwasser unangemessen ist, um die reale Gefährdung im Ahrtal abzubilden, was sicher auch andernorts gelten wird. Insofern wird mit den bisherigen Ansätzen die

Gefahr deutlich unterschätzt. Es bedarf der steten Weiterentwicklung der methodischen Grundlagen des Hochwasserschutzes.

Die europaweiten Vorgaben der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) sind in Deutschland 1:1 im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) umgesetzt. Diese Rechtsgrundlagen setzen den wesentlichen Handlungsrahmen des Hochwasserschutzes.

Das Auftreten von Hochwasser an Binnengewässern und im Küstenbereich bildet zunächst eine Naturgefahr. Von einem Risiko wird erst ausgegangen, wenn für Menschen, Umwelt, Kulturgüter, Wirtschaft oder Sachwerte eine Gefahr, Beeinträchtigung oder Schädigung ausgehen kann. Das "Hochwasserrisiko" nach Artikel 2 der EG-HWRM-RL ist von daher als "Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen auf (1) die menschliche Gesundheit, (2) die Umwelt, (3) das Kulturerbe und (4) die wirtschaftlichen Tätigkeiten" definiert. Insofern steht das Hochwasserrisiko mithin für die Kombination aus Eintrittswahrscheinlichkeit (der Jährlichkeit bzw. des Wiederkehrintervalls) eines Hochwassers und den möglichen Schäden (vgl. § 73 Absatz 1 Satz 2 WHG).

Derzeit läuft der 3. Umsetzungszyklus der EG-HWRM-RL (2021 bis 2027). In diesem Rahmen steht eine Überprüfung und ggf. Aktualisierung der Bewertung des Hochwasserrisikos und insbesondere der ausgewiesenen Hochwasserrisikogebiete durch die Bundesländer an. Bislang hatten die Bundesländer zur Bewertung des Hochwasserrisikos zwar grundsätzlich vergleichbare, aber letztlich doch bundeslandspezifische Methoden angewandt. Der Ausschuss "Hochwasserschutz und Hydrologie" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AH) empfiehlt vor diesem Hintergrund eine harmonisierte und bundeseinheitliche Vorgehensweise im 3. Zyklus, insbesondere im Hinblick auf das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial".

Zu dieser Thematik wird im aktuellen Heft der HyWa das in Kooperation mit dem LAWA-AH entwickelte "Göttinger Konzept zur Entwicklung einer Methodik zur Anwendung des Signifikanzkriteriums Schadenspotenzial bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL" vorgestellt. Der mehrstufige und strukturierte Ansatz dient ausschließlich zur Bewertung potenziell nachteiliger Folgen des Schutzgutes "wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte" mithilfe einer Schadenspotenzialermittlung und bezieht sich auf Binnenhochwasser und bedarfsweise Küstenhochwasser.

Eine grundsätzlich deutschlandweit einheitliche Vorgehensweise hat den Vorteil, dass eine Gleichbehandlung zwischen den zu bewertenden Gewässerabschnitten und Überflutungsflächen bei der Bewertung des Hochwasserrisikos erfolgt. Das Konzept lässt aber auch aufgrund bisher vorliegender länderspezifischer Besonderheiten bei der Umsetzung Unterschiede zu. Insgesamt ist das "Göttinger Konzept" als deutlicher Fortschritt im Sinne

einheitlicher methodischer Grundlagen zur Bewertung des Hochwasserrisikos zu bewerten und kann beitragen, vor allem die Hochwasservorsorge auf eine fundiertere Datengrundlage zu stellen. Hierzu kann auch die zentrale und flächendeckende Verwendung des Vermögenswerte-Datensatzes für Deutschland, abgeleitet aus Satellitendaten des europäischen Copernicus-Erdbeobachtungsprogrammes, seinen Beitrag leisten (BEAM Germany).

Dr. Dr. Dietmar Mehl,

Dr. Tim G. Hoffmann,

biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH

Juliane Grüneberg

Entwicklung einer Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums Schadenspotenzial bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL

Development of a method for the application of the significance criterion damage potential in the review of the flood risk assessment according to the European Floods Directive

Die europäische Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) verpflichtet die Mitgliedsstaaten zu Beginn jedes Berichtszyklus, die Bewertung des Hochwasserrisikos einschließlich der Bestimmung der Risikogebiete zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren. Der Ausschuss "Hochwasserschutz und Hydrologie" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser empfiehlt im Rahmen dessen, zur Harmonisierung der Ländervorgehen das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" anzuwenden. Dies soll ab dem dritten Zyklus, beginnend im Jahr 2022, erfolgen.

In diesem Artikel wird ein Konzept zur Entwicklung einer bundeseinheitlichen Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" einschließlich der Schadenspotenzialermittlung bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL vorgestellt. Dieses sogenannte "Göttinger Konzept" wurde durch den Einsatz verschiedener qualitativer Methoden erstellt. Es listet strukturiert, zusammenfassend und transparent Prüf- und Arbeitsschritte mit Arbeitsanweisungen und Bearbeitungshinweisen auf, die sich in erster Linie an die zuständigen Behörden richten. Dabei bezieht es Hinweise und Anforderungen einschlägiger Dokumente ein und verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz. Über die Einbindung einer Schadenspotenzialermittlung wird eine ökonomische Bewertung in das bestehende nationale Vorgehen zur Bewertung potenziell nachteiliger Folgen auf das Schutzgut "wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte" integriert. Monetäre Werthöhen und ihre räumliche Verteilung, die Exposition und die Schadanfälligkeit sowie Vulnerabilität werden dabei einbezogen. Das Ergebnis der Schadenspotenzialermittlung sind monetäre Schäden, die als Teilinformationen zur Abschätzung von Hochwasserrisiken und der Ausweisung von Risikogebieten genutzt werden.

Schlagwörter: EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL), Hochwasserrisiko, Risikobewertung, Signifikanzkriterium, Schadenspotenzial, Hochwasserschaden

The European Floods Directive obliges the member states at the beginning of each reporting cycle to review and, if necessary, update the preliminary flood risk assessment including the identification of areas of potential significant flood risk. Within this framework, the Committee "Flood Protection and Hydrology" of the German Working Group on water issues recommends the significance criterion "damage potential" in order to harmonize the approaches of the federal states. This is to be done from the third cycle onwards, starting in 2022.

This article presents a concept for the development of a nationwide uniform method for the application of the significance criterion "damage potential" including the damage potential assessment in the review of the preliminary flood risk assessment according to the Floods Directive. This so called "Göttingen concept" was developed by using different qualitative methods. It lists test and work steps with work instructions and processing notes in a structured, summarizing and transparent way. Thereby, the concept is primarily addressed to the responsible authorities. It incorporates references and requirements of relevant documents and follows a holistic approach. By incorporating a damage potential assessment, an economic assessment is integrated into the existing national procedure for assessing potential adverse impacts on "economic activities and significant material assets". Monetary values and their spatial distribution, exposure and damage susceptibility and vulnerability are included. The result of the damage potential assessment is monetary damages, which are used as partial information for the assessment of flood risks and the identification of areas of potential significant flood risk.

Keywords: floods directive, flood risk, risk assessment, significance criterion, damage potential, flood damage

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Hochwasser als natürliche Ereignisse stellen trotz vieler Anstrengungen in der Vergangenheit nach wie vor für den Menschen und die Umwelt eine bedeutende Bedrohung dar (BAUMGARTEN et al., 2011). Faktoren wie der globale Klimawandel, Landnutzungsänderungen und die Zunahme von Personen und Vermögenswerten in Flussnähe könnten sogar zu einem Anstieg von Hochwasserrisiken führen (HEINRICHS & GRUNENBERG, 2009;

CIS, 2012). So beliefen sich die Sachschäden des Elbehochwassers 2002 auf ca. 9 Mrd. € und der Flutkatastrophe im Juni 2013 trotz zahlreicher Maßnahmen zur Gefahren- und Schadensabwehr auf über 6,6 Mrd. € (IKSE, 2004; BUNDESMINISTERIUM DES INNERN, 2013). Mitte Juli 2021 verursachte das Tief "Bernd" in Deutschland nach Stark- und langanhaltendem Dauerregen durch Hochwasser Schadenssummen von über 34 Mrd. € (Stand März 2022) und forderte viele Todesopfer (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN UND FÜR HEIMAT & BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN, 2022). Um hochwasserbedingte nachteilige Folgen auf die Schutzgüter

"menschliche Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten" zu verringern, schafft die Richtlinie 2007/60/EG (Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, EG-HWRM-RL) einen Rahmen zur Bewertung und zum Management von Hochwasserrisiken (Art. 1 EG-HWRM-RL). Hochwasserrisiko wird als Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses mit den hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen auf die Schutzgüter verstanden (Art. 2 Satz 2 EG-HWRM-RL; § 73 Abs. 1 WHG). Die europäischen Mitgliedsstaaten sind gemäß der Richtlinie verpflichtet, eine Bewertung des Hochwasserrisikos und auf Grundlage dessen eine Bestimmung von Risikogebieten vorzunehmen (Art. 4 und 5 EG-HWRM-RL; § 73 WHG). Im Kern der Bewertung des Hochwasserrisikos sollen Informationen über signifikante vergangene Hochwasser sowie deren nachteilige Folgen zur Abschätzung zukünftiger Hochwasser genutzt werden. Erforderlichenfalls können auch potenziell nachteilige Folgen zukünftiger Hochwasser über Vorhersagemodelle bewertet werden (Art. 4 EG-HWRM-RL; CIS, 2013). Die EG-HWRM-RL und auch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geben aber keine Methoden und Kriterien zur Bewertung (potenziell) nachteiliger Folgen, des Risikos und der Bestimmung von Risikogebieten vor (FGG WESER, 2018). Für die Risikogebiete sind Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten sowie Managementpläne zu erstellen (Art. 6 und 7 EG-HWRM-RL; §§ 74, 75 WHG). Alle Ergebnisse sind in sechsjährigen Zyklen zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren (Art. 4, 5 und 14 EG-HWRM-RL; § 3 WHG). In Deutschland ergeben sich für ausgewiesene Risikogebiete seit der Einführung des Hochwasserschutzgesetzes II im Juli 2017 Rechtsfolgen, die sich beispielsweise in baulichen Schutzvorschriften widerspiegeln (Hochwasserschutzgesetz II; § 78 WHG).

Die Umsetzung der EG-HWRM-RL wird in Deutschland über den Ausschuss "Hochwasserschutz und Hydrologie" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AH) bearbeitet und koordiniert (LAWA, o. J.). Dieser hat einheitliche, zwischen den Ländern abgestimmte Empfehlungen für die Risikobewertung und Bestimmung der Risikogebiete sowie der Überprüfung herausgegeben. Zur Bewertung (potenziell) nachteiliger Folgen sowie zur Abschätzung eines potenziell signifikanten Risikos werden Überprüfungsschritte und Signifikanzkriterien mit Schutzgutbezug zur Anwendung angeraten. Auch wenn die Bewertung potenziell nachteiliger Folgen zukünftiger Hochwasser gemäß Art. 4 Abs. 2 Buchstabe d EG-HWRM-RL nicht zwingender Bestandteil der Bewertung des Hochwasserrisikos ist, ist sie wesentlicher Bestandteil in den Empfehlungen des LAWA-AH (LAWA-AH, 2009; LAWA-AH, 2017). So wird für den zweiten Berichtszyklus in Überprüfungsschritt A) "Signifikante Personen- und Sachgefährdungen" das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" oder alternativ das Signifikanzkriterium "betroffene Flächengröße von zusammenhängenden Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieflächen durch ein potenzielles Extremereignis" empfohlen (LAWA-AH, 2017). Trotz dieser konkreten Empfehlungen sind die Ländervorgehen im Überprüfungsschritt A) im zweiten Zyklus hinsichtlich der Anwendung der Signifikanzkriterien heterogen (LAWA-AH, 2018b; MÖLKNER, 2018).

Um eine weitere Harmonisierung der Ländervorgehen zu erreichen, wurde auf der Sondersitzung "Harmonisierung" des LAWA-AH im November 2016 für den dritten Zyklus (Zeitraum 2022 bis 2027) eine bundeseinheitliche Bewertung anhand von Schadenspotenzialen befürwortet (LAWA-AH, 2018b). Dies ist auch in den Empfehlungen zur Überprüfung der Bewertung

des Hochwasserrisikos festgehalten (LAWA-AH, 2017). Wie das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" methodisch umzusetzen ist, wird nicht beschrieben. Mit dieser Ausarbeitung ist derzeit die vom LAWA-AH gegründete Kleingruppe (KG) "Bewertung des Hochwasserrisikos" beauftragt. Die KG steht der Herausforderung gegenüber, das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" in die bestehende Struktur der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos zu integrieren und eine passende bundesweit einheitliche Methode der Schadenspotenzialermittlung als ökonomische Bewertung zu entwickeln.

Zum einen ist dieser praktische Handlungsbedarf Auslöser für die wissenschaftliche Annahme dieser Herausforderung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit. Zum anderen soll der zunehmenden wissenschaftlichen und politischen Bedeutung der praktischen Abschätzung von Schadenspotenzialen aufgrund vergangener hochwasserbedingter Schadenssummen in Milliardenhöhe Rechnung getragen werden. Der Arbeitsbereich Umwelt- und Ressourcenökonomik der Universität Göttingen hat bereits Erfahrung bei der Integration sozioökonomischer Bewertungen in die Umsetzungsprozesse der EG-Wasserrahmenrichtlinie (Kosteneffizienz, Prüfung der Inanspruchnahme abweichender Tatbestände) und der EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (Folgenabschätzung, Kosten-Nutzen-Analyse) (MARGGRAF et al., 2017; SAUER et al., 2015).

Das Ziel dieser Studie ist die erstmalige Erstellung eines Konzeptes, welches die Entwicklung einer bundeseinheitlichen Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" und zur Schadenspotenzialermittlung bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos einschließlich der Bestimmung von Risikogebieten gemäß EG-HWRM-RL ermöglicht.

Das Göttinger Konzept verfolgt folgende Absichten zur Unterstützung des Harmonisierungsprozesses:

- Umsetzung von Anforderungen und Hinweisen aus Politik und Wissenschaft zur (Überprüfung der) Bewertung potenziell nachteiliger Folgen zur Einschätzung von Hochwasserrisiko, zur Bestimmung von Risikogebieten und zur Anwendung von Schadenspotenzialermittlungen,
- Anwendung eines ganzheitlichen Ansatzes über die Berücksichtigung der Anforderungen und Hinweise auf verschiedenen Ebenen (EU, Bund, Länder), der Überprüfungsschritte gemäß LAWA-AH, der zukünftigen Zyklen sowie weiterer Verwendungszwecke,
- Bereitstellung einer Entscheidungshilfe, bei der die politische Entscheidungsautonomie der zuständigen Behörden erhalten bleibt und
- Offenlegung von notwendigen Arbeitsschritten und Entscheidungsmöglichkeiten in strukturierter, zusammenfassender und transparenter Form sowie Eingrenzung anhand von Anforderungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Über die Auswahl der Literatur und der Forschungsmethoden soll das Göttinger Konzept einen Beitrag zur Vernetzung von Wasserwirtschaftsverwaltung und qualitativer Forschung leisten. Adressaten des Göttinger Konzeptes sind insbesondere die für die Umsetzung der EG-HWRM-RL zuständigen Behörden

der Wasserwirtschaftsverwaltung in Deutschland und deren Arbeitsgremien (LAWA-AH, KG "Bewertung des Hochwasserrisikos", Flussgebietsgemeinschaften), externe Auftragnehmer im Rahmen der Entwicklung der Methode und darüber hinaus Akteure in der Bewertung von Hochwasserschäden und -risiken sowie die interessierte Öffentlichkeit.

1.2 Definition relevanter Begrifflichkeiten

- In Schadenspotenzialermittlungen oder -analysen im Sinne von Schadensanalysen werden folgende Informationen mithilfe von Geoinformationssystemen verschnitten und ausgewertet: Daten über die Gefahr (Überflutungsflächen und Ausprägungen weiterer Flutcharakteristiken eines Hochwasserereignisses mit festgelegter Wahrscheinlichkeit), die Exposition von Risikorezeptoren zur Gefahr (Standortdaten und Exposition gegenüber den Flutcharakteristiken), Risikorezeptor- und monetäre Wertkonzentrationen, die Flächennutzung und die Vulnerabilität der Risikorezeptoren (MESSNER & MEYER, 2006; RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK, 2018).
- Risikorezeptoren gelten gegenüber Hochwasser als schadanfällig und werden in Schadenspotenzialermittlungen in sogenannten Wertkategorien wie beispielsweise Hausrat, Wohnkapital oder Kfz klassifiziert (MEYER, 2005; MESSNER & MEYER, 2006).
- Die Vulnerabilität der Risikorezeptoren bzw. Wertkategorien wird als funktioneller Zusammenhang zwischen den erwarteten Schäden und ihrer Schadanfälligkeit und Exposition definiert (MESSNER & MEYER, 2006; CIS, 2012).
- Als Ergebnis der Ermittlung können potenzielle bzw. zu erwartende Schäden in monetärer Form ausgegeben werden (MEYER, 2005). Diese Schäden sind im Zusammenhang mit der EG-HWRM-RL als potenziell nachteilige Folgen zu verstehen. In der Bewertung des Hochwasserrisikos kann solch ein Ergebnis als Teilinformation zur Abschätzung von Hochwasserrisiko genutzt werden.

- Das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" und die Schadenspotenzialermittlung werden im Göttinger Konzept ausschließlich zur Bewertung potenziell nachteiliger Folgen des Schutzgutes "wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte" im Sinne des Art. 4 Abs. 2 Buchstabe d EG-HWRM-RL und der sich daraus ergebenden Einschätzung des Teilrisikos für ein Extremereignis bzw. Bestimmung von Risikogebieten verwendet.

- Schadenspotenzial wird demnach als potenziell geschädigter Teil der vorhandenen, monetär ausgedrückten Werte dieses Schutzgutes in der Überflutungsfläche eines prognostischen Extremereignisses definiert. Das Schadenspotenzial wird unter Anwendung eines Schadensfunktionstyps (z. B. Wasserstands-Schadensfunktionen) ermittelt.

2 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der Komplexität der Thematik sowie der praktischen Ausrichtung der Studie wurden verschiedene qualitative Methoden zur Erstellung des Göttinger Konzeptes genutzt.

Die Datenerhebung erfolgte anhand vier Erhebungsformen (Abb. 1). Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche wurden einschlägige Dokumente einbezogen: EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, Wasserhaushaltsgesetz, Dokumente der Gemeinsamen Umsetzungsstrategie für die EG-HWRM-RL über die Plattform CIRCABC (Communication and Information Resource Centre for Administrations, Businesses and Citizens), Dokumente des LAWA-AH über die Plattform WasserBLICK, Niederschriften zum Thema von Sitzungen der Wasserwirtschaftsverwaltung, Studien zu Schadenspotenzialermittlungen sowie Dokumentationen von und Informationen über Schadenspotenzialermittlungen der Länder, die bereits im ersten und/oder zweiten Berichtszyklus der EG-HWRM-RL ein Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" angewendet haben.

Um Unterschiede zwischen den Ländern herauszuarbeiten und Erfahrungen abzufragen, wurde im Dezember 2017 vor einem Workshop des LAWA-AH zum Thema "Schadenspotenziale" ein Fragebogen an die Umweltministerien aller Länder verschickt. Die Versendung als auch der Rücklauf des Fragebogens erfolgte in digitaler Form über einen Verteiler der Geschäftsstelle des LAWA-AH. Der Fragebogen war in vier Abschnitte unterteilt, die sich mit dem Abstimmungsbedarf von Begrifflichkeiten, Informationsquellen zu Schadenspotenzialermittlungen, der bisherigen Durchführung der Risikobewertung gemäß EG-HWRM-RL sowie Schadenspotenzialermittlung und Einschätzungen zu einer zukünftigen standardisierten Schadenspotenzialermittlung befassen. Die Rücklaufquote lag bei 100 %. Ein Auszug aus den Fragen und Ergebnissen wird in Tabelle 1 gegeben.

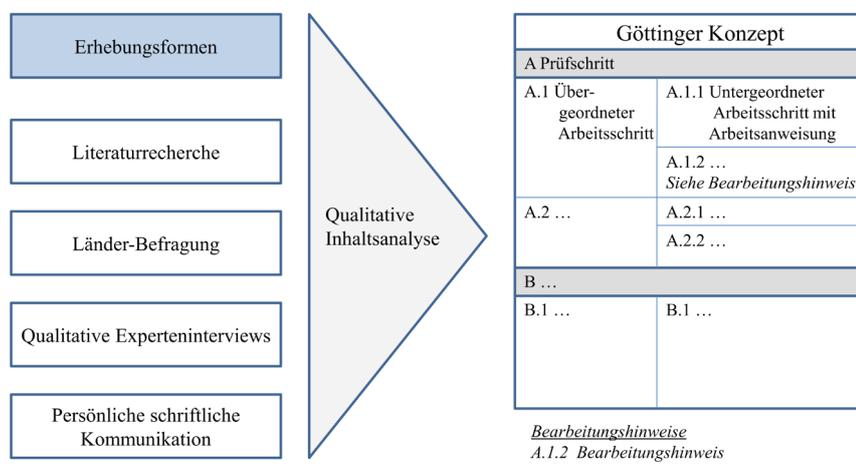


Abbildung 1
Methodisches Vorgehen zur Erstellung des Göttinger Konzeptes.
Methodical procedure for the creation of the Göttingen concept.

Um offene Fragen zu klären, die nicht mithilfe der Literatur beantwortet werden konnten, wurden sechs unterschiedliche, semistrukturierte, leitfadengestützte Experten-

Tabelle 1
 Auszug aus den Fragen und Ergebnissen des Fragebogens zur Erstellung des Göttinger Konzeptes. Hintergrund blau: Themenbereich; Hintergrund grau: Auszug Fragen; Hintergrund weiß: Auszug Ergebnisse.
Excerpt from the questions and results of the questionnaire for the development of the Göttingen Concept. Background blue: subject area; background gray: excerpt questions; background white: excerpt results.

Bereich des Fragebogens	Auszug aus den Fragen und Ergebnissen
Abstimmungsbedarf von Begrifflichkeiten	Wie wird der Begriff Schadenspotenzial definiert?
	Wird sehr unterschiedlich definiert, z. B. als monetäre Schäden je Landnutzung oder Vermögenswerte in einem überfluteten Gebiet.
Informationsquellen zu Schadenspotenzialermittlungen	Werden Schadenspotenzialanalysen bereits in anderen Zusammenhängen in der Wasserwirtschaftsverwaltung durchgeführt?
	12 x Ja, z. B. zur Bewertung von Maßnahmen und zur Bestimmung und Festsetzung von ÜSG.
Bisherige Durchführung der Risikobewertung und ggf. Schadenspotenzialermittlung	Wurden bei dem Hochwasserszenario der vorläufigen Risikobewertung bestehende Schutzmaßnahmen berücksichtigt?
	11 x Nein, 4 x Ja.
	Länder mit einem Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" im 2. Zyklus.
	Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Thüringen, Berlin.
	Davon Länder mit Einschätzungen über mögliche Schäden (z. B. 50 überflutete Keller entsprechen 500.000 € Schaden).
Einschätzungen zu einer zukünftigen standardisierten Schadenspotenzialermittlung	Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Saarland.
	In welche Arbeitsschritte sollte ihrer Meinung nach die Schadenspotenzialermittlung unterteilt werden?
	Feststellen des gefährdeten Bereiches, Ermittlung der Wassertiefen, Ermittlung der Nutzungen, Ermittlung von Vermögenswerten, Festlegung von Schadensfunktionen, Verknüpfung der Elemente, Berechnung der Schadenshöhe. ➤ Gemäß aller Antworten sollen im Ergebnis der Bewertung monetären Schäden vorliegen.
	Ist eine weitere Verwendung des ermittelten Schadenspotenzials denkbar?
	11 x Ja, 1 x Nein, 5 x Keine Festlegung.

interviews im Zeitraum von Ende 2017 bis 2020 persönlich oder telefonisch durchgeführt. Die Experten wurden ausgewählt, weil sie Ersteller einschlägiger Dokumente des LAWA-AH oder Beteiligte an der Umsetzung der Risikobewertung oder Schadenspotenzialermittlungen sind. Die Dokumentation fand anhand von Transkriptionen mithilfe von der Software "easytranscript" und Protokollen statt. Weitere Informationen wurden aus der persönlichen schriftlichen Kommunikation mit Mitgliedern der LAWA-AH Kleingruppe "Bewertung des Hochwasserrisikos" und Experten gewonnen.

Die qualitativen Daten wurden über eine inhaltlich-strukturierende Inhaltsanalyse unter Verwendung von inhaltlichen Kategorien ausgewertet. Zur Erstellung des Göttinger Konzeptes erfolgte die Kategorienentwicklung gemischt induktiv-deduktiv unter Verwendung der Strategie der Subsumtion. Es fand eine kontinuierliche Überarbeitung und Anpassung des Kategoriensystems statt, wobei die Kategorien letztendlich den Prüfschritten, übergeordneten Arbeitsschritten und untergeordneten Arbeitsschritten des Göttinger Konzeptes entsprechen.

Je untergeordnetem Arbeitsschritt wurde eine Arbeitsanweisung und wenn nötig ein Bearbeitungshinweis basierend auf den der Kategorie zugeordneten Informationen sowie daraus resultierenden Schlussfolgerungen formuliert und in den Gesamt-

zusammenhang des Göttinger Konzeptes gebracht. Die Arbeitsanweisungen wurden im Imperativ verfasst, um Adressaten zur praktischen Umsetzung aufzufordern.

Alle Daten wurden in einem Zeitraum von August 2017 bis Dezember 2020 erhoben. Ein erstes Göttinger Konzept wurde am 6. August 2018 fertiggestellt. Es bildete eine Grundlage zur Erstellung eines Arbeitspapiers (CHRIST et al., 2018), welches das weitere Vorgehen der KG maßgeblich mitbestimmt hat. So sind wissenschaftliche Erkenntnisse aus dieser Forschungsarbeit in den laufenden Umsetzungsprozess eingeflossen wie auch Erkenntnisse und Arbeitsschritte aus dem laufenden Prozess in dem Göttinger Konzept berücksichtigt worden.

3 Ergebnisse: Vorstellung des Göttinger Konzeptes

3.1 Hauptanforderungen

Es wurde eine Vielzahl an Anforderungen und Hinweisen zur (Überprüfung der) Bewertung potenziell nachteiliger Folgen zur Einschätzung von Hochwasserrisiko, zur Bestimmung von Risikogebieten und zur Anwendung von Schadenspotenzialermittlungen aus der einschlägigen Literatur ermittelt. Eine Liste der zusammengefassten Hauptanforderungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2	
Im Göttinger Konzept berücksichtigte Hauptanforderungen. <i>Main requirements considered in the Göttingen concept.</i>	
Hauptanforderungen	
•	Beachtung rechtlicher Grundlagen (EG-HWRM-RL, WHG)
•	Harmonisierung auf Bundesebene unter Beachtung länderspezifischer Besonderheiten in der Umsetzung (LAWA-AH, 2017)
•	Transparente Darlegung gegenüber der Kommission und der Öffentlichkeit (CIS, 2013; CIS, 2021; LAWA-AH, 2019a)
•	Beachtung der Verhältnismäßigkeit hinsichtlich Detaillierungsgrad, Aufwand und Kosten unter Berücksichtigung der Zielstellung sowie Nutzung vorhandener oder leicht abzuleitender Informationen (Erwägungsgrund 18 EG-HWRM-RL, Art. 4 EG-HWRM-RL; CIS, 2012; ARUVÄLI, 2018)
•	Beachtung geschaffener und empfohlener Strukturen, Bausteine und Arbeitsschritte zur Bewertung potenziell nachteiliger Folgen und zur Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos (CIS, 2012; LAWA-AH, 2017; LAWA-AH, 2018a)
•	Beachtung vorhergehender Empfehlungen des LAWA-AH zu Signifikanzkriterien mit gleichem/ähnlichem Zweck sowie Erreichung einer positiven Weiterentwicklung des im zweiten Zyklus empfohlenen Signifikanzkriteriums "Flächengröße von zusammenhängenden Siedlungs- und Gewerbe-/Industrieflächen" (LAWA-AH, 2009; LAWA-AH, 2017)
•	Beachtung angewandeter Signifikanzkriterien der Länder mit gleichem oder ähnlichem Zweck
•	Beachtung eines fundierten wissenschaftlichen Aufbaus von Schadenspotenzialermittlungen im Sinne von Schadensermittlungen
•	Offenlegung weiterer Verwendungszwecke der entwickelten Methode der Schadenspotenzialermittlung oder Teilen davon (LAWA-AH, 2018b)

3.2 Aufbau des Göttinger Konzeptes

Unter GRÜNEBERG (2022) ist das Göttinger Konzept in voller Länge mit zugehörigem Abkürzungsverzeichnis und detaillierten Quellenangaben abrufbar. Die 15 Prüfschritte, die 63 übergeordneten und die 104 untergeordneten Arbeitsschritte mit Arbeitsanweisungen werden in übersichtlicher Tabellenform präsentiert (Abb. 1). Die Bearbeitungshinweise werden unter dem tabellarischen Aufbau aufgeführt. Eine Übersicht über die Prüfschritte und übergeordneten Arbeitsschritte wird in Tabelle 3 gegeben.

Die Reihenfolge der Prüfschritte und der übergeordneten Arbeitsschritte orientiert sich an einem logischen Aufbau und teilweise einer zeitlichen Abfolge. Die Reihenfolge ist nicht als Hierarchie zu verstehen, weshalb eine Auflistung mit Großbuchstaben gewählt wurde. Die in diesem Text genannten Verweise in der Form "Buchstabe.Zahl.Zahl" stehen für "Prüfschritt.übergeordneterArbeitsschritt.untergeordneterArbeitsschritt". Teile des Göttinger Konzeptes und insbesondere der Schadenspotenzialermittlung werden mehrmals durchlaufen (Tab. 3). Zwischen den Arbeitsschritten bestehen Zusammenhänge, die über Verweise im Göttinger Konzept kenntlich gemacht werden.

In den Arbeitsanweisungen werden teilweise Entscheidungsmöglichkeiten aufgezeigt. Sie wurden eingegrenzt, wenn ermittelte Anforderungen, wissenschaftliche Erkenntnisse oder Hinweise aus den einschlägigen Dokumenten dies rechtfertigten.

Durch den gewählten ganzheitlichen Ansatz beziehen sich nicht alle Arbeitsschritte ausschließlich auf die Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial". So sind beispielsweise die Arbeitsschritte der Ermittlung der Kulisse (B.2) sowie der Gefahr (D) und der Plausibilisierung durch Expertenwissen (L.3) auch für die Anwendung anderer Signifikanzkriterien relevant.

3.3 Inhalt des Göttinger Konzeptes

Aufgrund der Länge und Komplexität des Göttinger Konzeptes wird im Folgenden auf grundlegende Ergebnisse, wesentliche Arbeitsschritte und Besonderheiten eingegangen. Notwendige

Hintergrundinformationen und zentrale Begründungen werden dargelegt.

3.3.1 Rahmenbedingungen (A, B)

Bei der Definition von Begrifflichkeiten ist vor allem der Begriff Schadenspotenzial(e) für die Zielstellung präzise abzugrenzen (A.1), da er in mehreren Texten des LAWA-AH mit verschiedenen Bedeutungen verwendet wurde. Als relevante Hochwasserarten werden Binnenhochwasser und bei Bedarf Küstenhochwasser empfohlen (B.1). Die zu bewertende Kulisse ergibt sich, wie auch im zweiten Zyklus gemäß LAWA-AH (2017), entlang der Gewässerabschnitte, an denen neue risikorelevante Erkenntnisse bzw. erhebliche Änderungen bekannt geworden sind (B.2.2). Im Göttinger Konzept wird eine Neubewertung aller bestehenden Risikogebiete mit den aktuellsten Signifikanzkriterien zur Diskussion gestellt (B.2.3), weil Risikogebiete aufgrund wechselnder Empfehlungen des LAWA-AH je Zyklus mit unterschiedlichen Signifikanzkriterien verknüpft sein können.

3.3.2 Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" (C)

Im Göttinger Konzept finden klare Festlegungen bezüglich der Zugehörigkeit des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" zum Überprüfungsschritt "A) Signifikante Personen- und Sachgefährdungen" und des Schutzgüterbezuges auf "wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte" statt (C.1.1).

Das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" und die Schadenspotenzialermittlung sind wie folgt miteinander verbunden: Als Output der Schadenspotenzialermittlung werden Schadenspotenziale jeder Wertkategorie ausgegeben (H.5), die dem Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" als zugehörig definiert werden (C.1.3). Diese Schadenspotenziale werden in der Überflutungsfläche des Gewässerabschnittes aggregiert (H.4, H.5) und ggf. dem potenziell betroffenen Gesamtwert dieser Wertkategorien in dieser Aggregationsgröße (G.3) gegenübergestellt. Anhand der Signifikanzschwelle des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" wird beurteilt, ob die Schadenspotenziale signifikant sind oder nicht (L.2).

Tabelle 3	
Prüfschritte und übergeordnete Arbeitsschritte des Göttinger Konzeptes. <i>Test steps and superordinate work steps of the Göttingen concept.</i>	
Göttinger Konzept zur Entwicklung einer Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" einschließlich Schadenspotenzialermittlung	
A	Festlegung allgemeiner Rahmenbedingungen
A.1	Definition von Begrifflichkeiten und Sicherstellung einer konsistenten Verwendung
A.2	Erstellung eines Zeitplans unter Beachtung von Fristen
A.3	Festlegung von Zuständigkeiten und Abwägung zur Einbeziehung Dritter
B	Festlegung spezifischer Rahmenbedingungen
B.1	Auswahl relevanter Hochwasserarten
B.2	Bestimmung der Ausgangslage und Kulisse
C	Festlegung von (einheitlichen) Signifikanzkriterien für den Überprüfungsschritt "A) Signifikante Personen- und Sachgefährdungen"
C.1	Festlegung eines einheitlichen Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial"
C.2	Länderspezifische Ablösung von Signifikanzkriterien vorhergehender HWRM-Zyklen und länderspezifische zusätzliche Kriterien
C.3	Optional: Einführung weiterer Signifikanzkriterien mit Bezug zum Schutzgut "menschliche Gesundheit"
D	Ermittlung/Abschätzung der Hochwassergefahr
D.1	Festlegung einer hydraulischen Grundlage
D.2	Festlegung relevanter Flutcharakteristiken
D.3	Weitere Eingangsdaten und Faktoren unter Art. 4 Abs. 2 Buchstabe d EG-HWRM-RL
D.4	Ermittlung/Abschätzung von Überflutungsflächen und Intensität relevanter Flutcharakteristiken
D.5	Vereinfachung der Wassertiefe-Daten
Methode der Schadenspotenzialermittlung im Rahmen der Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial"	
E	Festlegung der räumlichen Skalen
E.1	Festlegung der Skala der Methode der Schadenspotenzialermittlung
E.2	Festlegung des Untersuchungsgebietes zur Ermittlung von Werten
E.3	Festlegung der Kulisse zur Ermittlung von potenziellen Schäden/Schadenspotenzialen
F	Ermittlung von Werten, deren Höhe und räumlicher Verteilung
F.1	Validierung der Datengrundlage der Landnutzung
F.2	Ergänzung von Landnutzungsdaten, Durchführung von Linienpufferung und Flächenpriorisierung
F.3	Auswahl von Wertkategorien
F.4	Nutzung vorhandener standardisierter Werte
F.5	Monetarisierung und ggf. Quantifizierung von Werten
F.6	Zuordnung der Wertkategorien zu Landnutzungsdaten
F.7	Berechnung standardisierter Werte
F.8	Verortung standardisierter Werte
F.9	Aggregation der Werte
F.10	Ausgabe der Höhe und räumlichen Verteilung der Werte
G	Ermittlung von potenziellen betroffenen/gefährdeten Werten in den Überflutungsflächen, deren Höhe und räumlicher Verteilung
G.1	Verschneidung der Überflutungsflächen mit dem Werte-Datensatz
G.2	Aggregation der potenziell betroffenen Werte
G.3	Ausgabe der Höhe und räumlichen Verteilung der potenziell betroffenen Werte
H	Ermittlung von potenziellen Schäden/Schadenspotenzialen, deren Höhe und räumlicher Verteilung
H.1	Anwendung eines Schadensfunktionstyps
H.2	Ermittlung der relativen Folgen/Schädigungsgrade und Ausgabe
H.3	Ermittlung der absoluten Folgen/potenziellen Schäden/Schadenspotenziale
H.4	Aggregation der potenziellen Schäden/Schadenspotenziale
H.5	Ausgabe der Höhe und räumlichen Verteilung der potenziellen Schäden/Schadenspotenziale

I Erstellung eines aktuellen Werte-Datensatzes	
I.1 Prüfung des Vermögenswerte-Datensatzes für Deutschland (Basic European Assets Map Germany, BEAM Germany)	Prüfung F
I.2 Prüfung der Möglichkeit zur Erstellung eines Werte-Datensatzes basierend auf dem Amtlichen Topographischen-Kartographischen Informationssystem (ATKIS)	Prüfung F
I.3 Vergleich von Optionen zur Erstellung eines Werte-Datensatzes	
I.4 Erstellung von Anforderungen an den Werte-Datensatz und den Auftragnehmer	
I.5 Erstellung eines aktuellen Werte-Datensatzes	Anwendung F
J Testweise Ermittlung von Schäden/Schadenspotenzialen durch Anwendung von verschiedenen Schadensfunktionstypen unter Verwendung des aktuellen Werte-Datensatzes	
J.1 Erstellung von Anforderungen an die testweise Anwendung und den Auftragnehmer	
J.2 Auswahl von Beispielgebieten	
J.3 Vorgabe, Ausgestaltung und Optimierung von Schadensfunktionstypen	
J.4 Durchführung der Schadenspotenzialermittlung im Rahmen der testweisen Anwendung	Anwendung mit Abweichungen G – H
J.5 Vergleich von Ergebnissen und Plausibilisierung	
J.6 Fazit der testweisen Anwendung und Empfehlungen für Schadensfunktionstypen	
K Finale Entscheidungen nach der testweisen Anwendung	
K.1 Festlegung eines bundesweit einheitlichen Schadensfunktionstyps und dessen Ausgestaltung	
K.2 Bestimmung der Ausgestaltung der Signifikanzschwelle	
K.3 Festlegung von länderspezifischen Signifikanzschwellen	Ggf. Anwendung G – H
L Anwendung durch die Länder: Ermittlung der Signifikanz der Schäden, der Signifikanz des Risikos und Festlegung von Risikogebieten	
L.1 Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" und Durchführung der Schadenspotenzialermittlung je Land im dritten HWRM-Zyklus	Anwendung G – H
L.2 Ermittlung der Signifikanz der potenziellen Schäden/Schadenspotenziale	
L.3 Plausibilisierung der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos durch Expertenwissen	
L.4 Bestimmung von Risikogebieten ("areas with potential significant flood risk", APSFR)	
M Erfüllung formaler Anforderungen: Dokumentation, Informationsweitergabe und Berichterstattung	
M.1 Interne Dokumentation von Entscheidungen	
M.2 Öffentliche Ausgabe von Ergebnissen	
M.3 Sicherstellung der Koordinierung und des Informationsaustausches	
M.4 Berichterstattung zu Art. 4 und Art. 5 EG-HWRM-RL	
N Überprüfung und Aktualisierung der Methode in zukünftigen HWRM-Zyklen	
N.1 Überprüfung und Anpassung der Methode	Prüfung und ggf. Anwendung F – H
N.2 Berücksichtigung langfristiger Entwicklungen	
N.3 Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" und Durchführung der Schadenspotenzialermittlung in zukünftigen HWRM-Zyklen	Anwendung G – H
N.4 Durchführung von Zeitvergleichen	
N.5 Prüfung der Anwendung bei Hinzukommen einer anderen signifikanten Hochwasserart	Prüfung und ggf. Anwendung mit Abweichungen G – H
O Optional: Ermittlung von weiteren Verwendungszwecken/Anwendungsbereichen der entwickelten Methode und Anwendung der Methode für diese Zwecke	
O.1 Ermittlung weiterer Verwendungszwecke/Anwendungsbereiche	
O.2 Durchführung von Teilen der Methode einschließlich Schadenspotenzialermittlung im Rahmen weiterer Verwendungszwecke/Anwendungsbereiche	Anwendung mit Abweichungen G – H

3.3.3 Ermittlung bzw. Abschätzung der Hochwassergefahr (D)

Zur Durchführung der Schadenspotenzialermittlung als Flächenbewertung sind klar abgegrenzte Überflutungsflächen unerlässlich. Ob Wassertiefen als Flutcharakteristik benötigt werden, hängt von der Wahl des Schadensfunktionstyps zur Berechnung von Schadenspotenzialen ab (D.2).

3.3.4 Schadenspotenzialermittlung

3.3.4.1 Skala

Die Skala der Schadenspotenzialermittlung wird auf Makro- oder Mesoskala eingegrenzt (E.1). Für die Ermittlung der Werte wird eine für Deutschland flächendeckende Bewertung vorgeschlagen (E.2), da die Lage zu bewertender Gewässerabschnitte noch nicht bekannt ist. Die Ermittlung der Schadenspotenziale erfolgt in den ermittelten Überflutungsflächen eines Extremereignisses entlang der Gewässerabschnitte mit erheblichen Änderungen bzw. neuen Erkenntnissen im Vergleich zum vorherigen Zyklus (E.3, B.2.2, D.1).

3.3.4.2 Ermittlung von Werten (E)

Der Begriff der "Werte" bezieht sich vereinfachend auf Rezeptoren wie Entitäten oder Güter und ist von monetären Werten und Vermögenswerten im Sinne des Begriffes "value" in CIS (2012) zu unterscheiden. In dem Prüfschritt der Ermittlung von Werten soll zunächst die für den Verwendungszweck bestmögliche Aufbereitung der Datengrundlage der Landnutzung erfolgen (F.1, F.2). Danach werden Wertkategorien als Risikorezeptoren festgelegt (F.3). Über die flächendeckende Ermittlung können mehr Wertkategorien, z. B. Personen, einbezogen werden, als im Rahmen des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" relevant sind. Die Höhe der Werte wird unter anderem aus der Statistik erhoben oder aus Studien übernommen und über Berechnungswege auf-

bereitet sowie ggf. regionalisiert (F.4, F.5). Ihnen werden aufbereitete Landnutzungsdaten zugeordnet (F.6), wodurch sie räumlich verteilt werden (F.8). Je festgelegter Wertkategorie ergibt sich ein standardisierter Wert (€/Quadratmeter oder €/Rasterzelle, ggf. auch Anzahl der Entitäten/Quadratmeter oder Anzahl der Entitäten/Rasterzelle) (F.7). Die standardisierten Werte können in unterschiedlichen Aggregationsgrößen summiert (F.9) und die Höhe und räumliche Verteilung der Werte unterschiedlich und ggf. öffentlich ausgegeben werden (F.10).

3.3.4.3 Ermittlung von potenziell betroffenen Werten (G)

Die Prüfschritte der Ermittlung potenziell betroffener Werte (G) als auch der Ermittlung von Schadenspotenzialen (H) sind auf die Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" einschließlich Kulissee, Hochwasserszenario und Wertkategorien ausgerichtet. Im Kern des Prüfschrittes G werden die Überflutungsflächen des Extremszenarios in der zu ermittelnden Kulissee mit dem aktuellen Werte-Datensatz verschnitten. Die Ausgabe der potenziell betroffenen Werte als auch der Schadenspotenziale erfolgt im Göttinger Konzept verwaltungsintern (G.3, H.5).

3.3.4.4 Ermittlung von Schadenspotenzialen (H)

In Prüfschritt H erfolgt die Kombination der Daten über die Höhe und räumliche Verteilung der potenziell betroffenen Werte in der potenziellen Überflutungsfläche mit den Informationen über die Schadanfälligkeit der Wertkategorien und ggf. der Exposition gegenüber der Wassertiefe. Die Vulnerabilität wird somit an dieser Stelle einbezogen. Die Arbeitsschritte sind hinsichtlich eines Einsatzes von drei verschiedenen Schadensfunktionstypen (a) Set an relativen Schadensfunktionen, b) Stufung eines pauschalen Ansatzes, c) Einfacher pauschaler Ansatz) offen formuliert, da diese im Rahmen einer testweisen Anwendung zur Überprüfung vorgeschlagen werden (J.3.1) und erst danach eine Festlegung auf einen einzelnen Schadensfunktionstyp erfolgen sollte (K.1.2). Die drei Schadensfunktionstypen unterscheiden sich anhand der Einbeziehung der Exposition der Wertkategorien gegenüber der Wassertiefe und der Einbeziehung der unterschiedlichen Schadanfälligkeit der Wertkategorien (J.3.1) (Abb. 2). Bei der Anwendung des Schadensfunktionstyps "a) Set an relativen Schadensfunktionen" werden in Abhängigkeit der Wertkategorie und Wassertiefe und bei Anwendung des Schadensfunktionstyps "b) Stufung eines pauschalen Ansatzes" in Abhängigkeit der Wassertiefe zunächst relative Schädigungsgrade ermittelt (H.2). Relative Schädigungsgrade stellen den prozentualen Anteil der potenziell betroffenen Werte dar, die geschädigt werden könnten (MEYER, 2005). Bei der Anwendung des Schadensfunktionstyps "c) Einfacher pauschaler Ansatz" entspricht die Ausgestaltung des pauschalen Ansatzes (z. B. 5 %) dem Schädigungsgrad für alle Wertkategorien und allen Wassertiefen, weshalb die Ermittlung einzelner Schädigungsgrade entfällt. Durch Multiplikation der Schädigungsgrade bzw. des Schädigungsgrades mit der Höhe der potenziell betroffenen

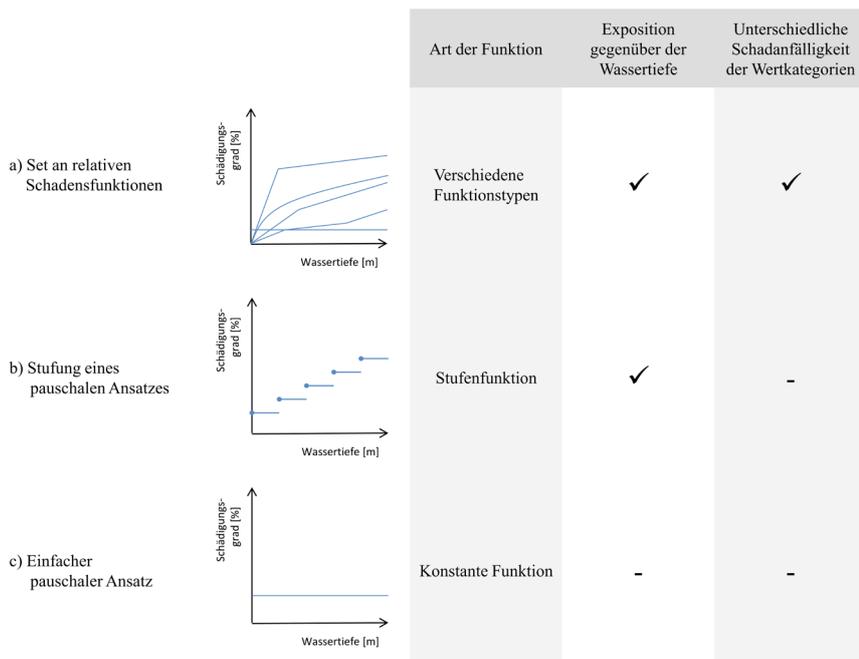


Abbildung 2
Zu prüfende Schadensfunktionstypen und ihre Charakteristika.
Damage function types to be tested and their characteristics.

Werte ergeben sich bei allen Möglichkeiten der Schadensfunktionstypen die Schadenspotenziale (H.3).

3.3.5 Erstellung eines Werte-Datensatzes (I)

Im Prüfschritt I werden Arbeitsschritte zur Erstellung eines aktuellen, flächendeckenden Werte-Datensatzes durch Dritte entsprechend der Arbeitsschritte der Ermittlung von Werten unter F beschrieben. Es wird eine Prüfung der Nutzung des vorhandenen Vermögenswerte-Datensatzes für Deutschland (BEAM Germany v2) sowie dessen Aktualisierung (I.1) und die Prüfung der Möglichkeit zur Erstellung eines Werte-Datensatzes basierend auf dem Amtlichen Topographischen-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) (I.2) empfohlen.

BEAM Germany v2 ist ein Produkt des europäischen Copernicus-Erdbeobachtungsprogrammes. Es liegt flächendeckend für Deutschland vor (AIRBUS DEFENCE AND SPACE, 2016) und entspricht als Ergebnis dem Arbeitsschritt F.10.

ATKIS wird bereits von sechs Ländern verwendet, die ein Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" anwenden (SENATSVERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ, 2019; RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK et al., 2015; MUEV, 2010; TMUEN, 2018; MKULNV, 2011; HYDROTEC & INFRASTRUKTUR UND UMWELT, 2018; HOFFMANN et al., 2011). Zudem wird es als eine Datengrundlage im Rahmen der Erstellung der Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten empfohlen (LAWA-AH, 2018c).

Die Nutzung des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem wird ausgeschlossen, da eine für Deutschland flächendeckende Verwendung zu übermäßig großen Datenmengen und Kosten führen könnte (SCHUMACHER & MEINEL, 2009; ZEUG et al., 2019).

3.3.6 Testweise Anwendung (J)

In Prüfschritt J werden die Arbeitsschritte G und H der Schadenspotenzialermittlung unter Berücksichtigung von Abweichungen basierend auf dem aktuellen Werte-Datensatz durchgeführt, um testweise potenziell betroffene Werte und potenzielle Schäden zu ermitteln (J.4). Die weiteren Ziele des Prüfschrittes J bestehen darin, Ausgestaltungen für die drei verschiedenen Schadensfunktionstypen zu recherchieren und ggf. zu optimieren (J.3) und die Auswirkungen der Schadensfunktionstypen und deren Ausgestaltungen in Beispielgebieten zu untersuchen. Zudem sollen Unterschiede zu Ergebnissen bestehender Länder-Methoden oder Schadensaufzeichnungen in Beispielgebieten offengelegt und wenn möglich plausibilisiert (J.5) sowie eine Empfehlungen für (einen) Schadensfunktionstyp(en) entwickelt werden (J.6).

3.3.7 Finale Entscheidungen (K)

Nach der testweisen Anwendung wird eine Auswertung der Ergebnisse durch die KG und die Länder vorgeschlagen. Dabei sollte auch eine Abschätzung der Folgen für Länder erfolgen, in denen keine Beispielgebiete untersucht wurden (K.1.1). Es wird empfohlen, einen bundesweit einheitlichen Schadensfunktionstyp zu bestimmen (K.1.2). Bei Wahl des Schadensfunktionstyps "a) Set an relativen Schadensfunktionen" oder "b) Stufung eines pauschalen Ansatzes" könnte als Ausnahme bei Nichtvorliegen von Wassertiefe-Daten die Anwendung des Schadensfunktionstyps "c) Einfacher pauschaler Ansatz" diskutiert werden. Es wird eine bundesweit einheitliche Ausgestaltung der Signifikanz-

schwelle vorgeschlagen (K.2). Bei Wahl des Schadensfunktionstyps "a) Set an relativen Schadensfunktionen" oder "b) Stufung eines pauschalen Ansatzes" können entweder die Gesamtschadenspotenziale in Euro (H.5.1 2b) oder der Anteil potenzieller Gesamtschadenspotenziale am potenziell betroffenen Gesamtwert in Prozent (Gesamtschädigungsgrad) (H.5.1 3a) in der Überflutungsfläche des jeweiligen Gewässerabschnittes mit neuen risikorelevanten Erkenntnissen bzw. erhebliche Änderungen als Aggregationsgröße angesetzt werden. Alle Länder, die bereits ein Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" angewendet haben, haben die erste Möglichkeit genutzt (SENATSVERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ, 2019; HOFFMANN & KREßNER, 2013; RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK, 2018; TMUEN, 2018; MUV et al., 2015; HYDROTEC & INFRASTRUKTUR UND UMWELT, 2018; RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK et al., 2015). Die zweite Möglichkeit kann den Vorteil bieten, dass unterschiedliche Wertkonzentrationen zwischen ländlich und städtisch geprägten Gebieten weniger zum Tragen kommen, da für ländliche Gebiete ein geringerer Schaden zur Identifikation der Signifikanz ausschlaggebend sein kann. Bei einer Wahl des Schadensfunktionstyps "c) Einfacher pauschaler Ansatz" ist ausschließlich die erste Möglichkeit sinnvoll, da ein pauschaler Ansatz in Prozent in allen Aggregationsgrößen den gleichen Gesamtschädigungsgrad annimmt.

Nach diesem Prüfschritt sind die Arbeiten zur Entwicklung der Methode zur Verwendung im dritten Zyklus abgeschlossen.

3.3.8 Anwendung durch die Länder (L)

Der Prüfschritt L beschreibt die Anwendung der Methode des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" durch die Länder im dritten Zyklus. Im Ergebnis liegt die Höhe der Gesamtschadenspotenziale oder der Gesamtschädigungsgrad in der Überflutungsfläche des Extremereignisses jedes untersuchten Gewässerabschnittes vor (L.1). Anhand der länderspezifischen Signifikanzschwelle kann die Signifikanz der Schadenspotenziale je Gewässerabschnitt beurteilt werden (L.2). Eine Plausibilisierung mit Expertenwissen wird bezüglich des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" im Einzelfall unter anderem vorgeschlagen, wenn Risikoabschnitte gegenüber vorheriger Signifikanzkriterien-Anwendung angepasst werden (L.3). Im Arbeitsschritt L.4 sollten Risikogebiete als rechtlicher Akt mit Expertenwissen unter Berücksichtigung der Ausweisungspraxis, Lückenschluss oder Gruppierung von Risikoabschnitten, der Abstimmung und Koordinierung mit angrenzenden Ländern bzw. Mitgliedsstaaten und bestehenden Risikogebieten bestimmt werden.

3.3.9 Erfüllung formaler Anforderungen (M)

Im Göttinger Konzept wird eine interne, zusammenfassende Dokumentation der zahlreichen diskutierten Entscheidungsmöglichkeiten, Festlegungen und Begründungen und eine öffentliche Ausgabe empfohlen (M.1, M.2.2). Die einschlägigen Empfehlungen des LAWA-AH sowie die durch die Länder und Flussgebietsgemeinschaften zu erstellenden Texte sollten hinsichtlich der Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" für den dritten Zyklus angepasst werden (M.2.1, M.2.3). Ergebnisse der Bewertung des Hochwasserrisikos sind unter anderem signifikante zukünftige Hochwasser als Punkte, Risikogebiete als Gewässerstrecken und die jeweils mit ihnen verbundene Art der (potenziell) nachteiligen Folgen (CIS, 2021). Die Berichterstattung der Höhe der Schadenspotenziale als potenziell nachteilige Folgen je zukünftigem Hochwasser sowie die

Darstellung in Hochwasserrisikokarten sind optional möglich (CIS, 2021; BFG, 2018; Art. 6 Abs. 5 EG-HWRM-RL) (M.4.2, M.2.5). Alle Stellen der elektronischen Berichterstattung an die europäische Kommission, die bezüglich des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" eine Rolle spielen, werden in den Bearbeitungshinweisen präzise aufgelistet (M.4.2 bis M.4.4).

3.3.10 Zukünftige HWRM-Zyklen (N)

Das Göttinger Konzept berücksichtigt eine zyklusbasierte Überprüfung und Aktualisierung der Methode und damit Weiterentwicklung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" und der Schadenspotenzialermittlung (N). Dabei sollte vor allem der Werte-Datensatz an zukünftige aktuelle Datengrundlagen der Landnutzung und Statistiken angepasst werden. Bei Vorliegen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse könnten auch neue Ausgestaltungen von Schadensfunktionstypen berücksichtigt werden (N.1). Sollte für die Bewertung des Hochwasserrisikos eine andere signifikante Hochwasserart identifiziert werden, kann die Eignung des Einsatzes der Methode im Sinne einer weiteren Verwendung untersucht werden (N.5, O.1).

3.3.11 Weitere Verwendungszwecke (O)

Als letzter Prüfschritt wird die Ermittlung von weiteren Verwendungszwecken bzw. Anwendungsbereichen der entwickelten Methode der Schadenspotenzialermittlung oder Teilen davon sowie des Werte-Datensatzes aufgeführt (O). Hinsichtlich der Effizienz ist es erstrebenswert, den größtmöglichen Nutzen aus den zu entwickelnden Produkten (Werte-Datensatz, entwickelter Schadensfunktionstyp etc.) zu ziehen. Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte eine umfangreiche Liste mit möglichen und bei Bedarf zu prüfenden Verwendungszwecken im Bearbeitungshinweis zusammengetragen werden, die viele Bereiche des Hochwasserrisikomanagements ansprechen (O.1).

3.3.12 Berücksichtigung länderspezifischer Besonderheiten

Das Göttinger Konzept lässt bei vielen Schritten länderspezifische Unterschiede zu (Tab. 4). Über den Einbezug länderspezifischer Statistiken und/oder Regionalisierungsverfahren könnten weiterhin länderspezifische Unterschiede im Werte-Datensatz erfasst werden (F.5). Es wird im Göttinger Konzept der Einwand

berücksichtigt, dass nicht in jedem Land hydraulische Berechnungsergebnisse der Überflutungsflächen und Wassertiefen vorliegen. Deshalb ist die Methode der Ermittlung bzw. Abschätzung der Hochwassergefahr offengelassen (D) und es wird die Prüfung des Schadensfunktionstyps "c) Einfacher pauschaler Ansatz" als vereinfachtes Verfahren ohne benötigte Wassertiefen vorgeschlagen (J).

4 Diskussion

Da der Fokus des Göttinger Konzeptes auf einer praktischen Anwendungsmöglichkeit liegt, galt es, den politischen Umsetzungsprozess der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Schadenspotenzialermittlungen zu vereinen. Die dargelegten Ergebnisse in Form von Anforderungen, Prüf- und Arbeitsschritten sowie den dazugehörigen Hintergrundinformationen und Begründungen zeigen die Komplexität der Entwicklung einer bundeseinheitlichen Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" auf.

4.1 Limitationen bei der Erstellung des Göttinger Konzeptes

Die für diese Studie relevanten Begrifflichkeiten werden in der Literatur teils unterschiedlich definiert. Bei der qualitativen Analyse war zu prüfen, welche Inhalte mit den Begrifflichkeiten verbunden sind. Die wissenschaftliche Verarbeitung der Texte des LAWA-AH war unter anderem aufgrund ihrer Kürze, Zusammenfassung aller Ländervorgehen und uneinheitlicher Begriffsverwendungen erschwert. Als nützliches Werkzeug haben sich ergänzende Experteninterviews und persönliche schriftliche Kommunikation erwiesen, in denen Fragen umfassend geklärt werden konnten. Die europäischen Hintergrundtexte sind wichtige Informationsquellen für den Umsetzungsprozess, die auf nationaler Ebene Beachtung finden sollten. In CIS (2012) wurden wissenschaftliche Erkenntnisse jedoch teilweise falsch wiedergegeben.

Eine transparente Nachvollziehbarkeit der Methodendokumentationen der Länder, die ein Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" bereits im zweiten Zyklus angewendet haben, ist auf-

Tabelle 4 Prüf- und Arbeitsschritte des Göttinger Konzeptes mit möglichen länderspezifischen Unterschieden. <i>Test and work steps of the Göttingen concept with possible federal state-specific differences.</i>	
Ermittlung der Kulisse/Definition von neuen risikorelevanten Erkenntnissen	B.2.2
Länge der Gewässerabschnitte	B.2.2, H.5.1, L.2
Vollständige Neubewertung mit aktuellen Signifikanzkriterien	B.2.3
Ablösung von Signifikanzkriterien vorhergehender Zyklen und Anwendung zusätzlicher Signifikanzkriterien	C.2, C.3
Definition des Extremhochwassers	D.1
Methode zur Ermittlung/Abschätzung der Hochwassergefahr	D
Bereitstellung der Gefahrendaten	D.4
Bereitstellung von Beispielgebieten und Länder-Methoden	J.2, J.5.2
Ggf. Ausgestaltung des Schadensfunktionstyps	K.1.3
Festlegung von Signifikanzschwellen	K.3
Plausibilisierung der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos und Bestimmung von Risikogebieten	L.3, L.4
Ermittlung von und Anwendung für weitere(n) Verwendungszwecke(n)	O

grund der Geheimhaltung externer Dienstleister oder knapper Informationen der Verwaltungen nicht vollständig möglich.

Da es sich bei der Festlegung auf eine Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" um einen laufenden, hochdynamischen Prozess der Wasserwirtschaftsverwaltung handelt, befindet sich das Themenfeld in ständiger Weiterentwicklung. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Studie kann es sein, dass sich während der zukünftigen Anwendung des Göttinger Konzeptes weitere Arbeitsschritte oder differenziertere Fragestellungen innerhalb eines bereits empfohlenen Arbeitsschrittes ergeben.

4.2 Bewertung der Erfüllung der Anforderungen

Die ermittelten Anforderungen (Tab. 1) und ihr Zusammenspiel wurden im Göttinger Konzept berücksichtigt. Bei der Anwendung des Göttinger Konzeptes können jedoch Herausforderungen bei der gleichzeitigen Umsetzung verschiedener Anforderungen auftreten. Bei jeder Entscheidung innerhalb der Arbeitsschritte sollten die Akteure deshalb im Sinne der Effizienz, wie in CIS (2012; 2018) und der EG-HWRM-RL empfohlen, im Rahmen von Abwägungsprozessen auf ein ausgeglichenes Verhältnis von Detaillierungsgrad zu Aufwand und Kosten zu Transparenz achten.

Die Anforderung einer positiven Weiterentwicklung des im zweiten Zyklus empfohlenen Signifikanzkriteriums "Flächengröße von zusammenhängenden Siedlungs-, Gewerbe- und Industrie-flächen" ist teilweise erreichbar. Als deutliche Weiterentwicklung zur Gefährdungsanalyse von Flächennutzungen mit Extremereignissen bietet die vorgestellte Methode den Einbezug der monetären Werthöhe, Schadanfälligkeit, der Vulnerabilität und ggf. der Exposition gegenüber der Überflutungstiefe von verschiedenen Wertkategorien. Kein adäquater Ersatz ist hinsichtlich des Schutzgutbezuges erreichbar.

Entscheidender Punkt der Harmonisierungsbemühungen ist, dass die Länder das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" in möglichst einheitlicher Form anwenden und damit die Empfehlungen des LAWA-AH annehmen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Göttinger Konzepten konnten erstmals die notwendigen Prüf- und Arbeitsschritte zur Entwicklung einer bundeseinheitlichen Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" einschließlich Schadenspotenzialermittlung bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos ab dem dritten Berichtszyklus der EG-HWRM-RL dargelegt werden. Das Göttinger Konzept kommt dem eigenen Wunsch des Ausschusses "Hochwasserschutz und Hydrologie" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AH) und der Länder nach, das Signifikanzkriterium "Schadenspotenzial" in diesen Umsetzungsschritt der EG-HWRM-RL zur Harmonisierung einzubeziehen, adressiert jedoch keine rechtlich bindende Anforderung. Über die Einbindung einer Schadenspotenzialermittlung wird eine ökonomische Bewertung in die bestehende Struktur des LAWA-AH zur Bewertung potenziell nachteiliger Folgen auf das Schutzgut "wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte" integriert. Über die Berücksichtigung von Anforderungen und Hinweisen aus der einschlägigen Literatur auf verschiedenen Ebenen (EU, Bund, Länder), der Berücksichti-

gung der Überprüfungsschritte gemäß LAWA-AH, der Einbeziehung zukünftiger HWRM-Zyklen und der optionalen Beachtung weiterer Verwendungszwecke konnte im Göttinger Konzept ein ganzheitlicher Ansatz realisiert werden. Das Göttinger Konzept gibt einen klaren Rahmen zur Entwicklung der Methode vor, z. B. die Ermittlung von monetären Schäden, die bundeseinheitliche Festlegung von Wertkategorien innerhalb des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial", die Notwendigkeit der Ermittlung bzw. Abschätzung von Überflutungsflächen und die bundeseinheitliche Festlegung auf einen Schadensfunktionstyp. Relevante Entscheidungsmöglichkeiten werden offengelegt, die anhand von Anforderungen, wissenschaftlichen Erkenntnissen und Hinweisen aus den einschlägigen Dokumenten begründet eingegrenzt werden. Den Adressaten werden trotz dessen viele Freiheiten bei der Ausgestaltung der Methode gegeben, z. B. bei der Auswahl von Wertkategorien und der Wahl von Berechnungswegen zur Monetarisierung der Werte. Länderspezifische Besonderheiten, die bereits im bisherigen Umsetzungsprozess der Bewertung des Hochwasserrisikos sowie Bestimmung von Risikogebieten inhärent waren, werden im Göttinger Konzept berücksichtigt und zugelassen. Die politische Entscheidungsautonomie der Wasserwirtschaftsverwaltung bleibt somit erhalten.

In der vorgestellten Methode werden über die Flächennutzung und die Gefahr durch Extremereignissen hinaus von auszuwählenden Wertkategorien die Exposition (Standortdaten und ggf. Exposition gegenüber der Wassertiefe), die monetären Werthöhen sowie deren räumliche Verteilung, die Schadanfälligkeit und die Vulnerabilität einbezogen. Die gewonnenen Ergebnisse über Schadenspotenziale als Schäden bzw. potenziell nachteilige Folgen werden als Teilinformation zur Abschätzung von Hochwasserrisiken und der Ausweisung von Risikogebieten genutzt. Die monetäre Ausgabe der Schadenspotenziale impliziert auch in Zukunft keine Berechnung des zum Extremszenarios zugehörigen Teilrisikos im Sinne jährlicher zu erwartender Schäden über die Multiplikation von Hochwasserwahrscheinlichkeit mit den ermittelten Schadenspotenzialen als Arbeitsschritt in der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos.

Die Prüf- und Arbeitsschritte einschließlich Arbeitsanweisungen und Bearbeitungshinweise werden den Akteuren zur Anwendung empfohlen. Das Göttinger Konzept kann weiterhin zur Erstellung einer Dokumentation der Methode eingesetzt werden, die im Rahmen der Berichterstattung gegenüber der Europäischen Kommission genutzt werden kann. Darüber hinaus kann das Göttinger Konzept zur Kommunikation mit anderen Mitgliedsstaaten und anderen Interessierten verwendet werden, um die grundsätzliche Vorgehensweise zur Entwicklung der Methode, Abwägungsprozesse und abgeschlossene sowie offene Arbeitsschritte darzulegen. Über die Auswahl der Literatur und die Forschungsmethoden leistet das Göttinger Konzept einen Beitrag zur Vernetzung von Wasserwirtschaftsverwaltung und qualitativer Forschung.

Die Zukunft wird zeigen, welche Entscheidungen zur Festlegung der Methode durch die Akteure getroffen werden und wie die Empfehlungen zur Anwendung des Signifikanzkriteriums "Schadenspotenzial" durch den LAWA-AH für den dritten Zyklus ausgestaltet werden. Eine erste probeweise Anwendung der Methode durch die Länder ist zur Ermittlung von Signifikanzschwellen denkbar. Die konkrete Anwendung des Signifikanzkriteriums

"Schadenspotenzial" einschließlich Schadenspotenzialermittlung hat eigenverantwortlich durch die Länder im dritten Zyklus bis zum 22. Dezember 2024 zu erfolgen.

Conclusions

With the Göttingen concept presented, it was possible for the first time to set out the necessary test and work steps for the development of a nationwide method for the application of the significance criterion "damage potential" including damage potential assessment in the review of the preliminary flood risk assessment from the third reporting cycle of the European Floods Directive onwards. The concept fulfills the wish of the Committee "Flood Protection and Hydrology" of the German Working Group on water issues and the federal states to include the significance criterion "damage potential" in this implementation step of the floods directive for harmonization, but does not address a legally binding requirement. By incorporating a damage potential assessment, an economic assessment is integrated into the existing structure of the LAWA-AH for assessing potential adverse consequences on "economic activities and significant material assets". A holistic approach could be realized in the concept by taking into account requirements and references from the relevant literature at various levels (EU, state, federal state), consideration of the review steps according to LAWA-AH, inclusion of future flood risk management cycles and optional consideration of additional uses. The concept provides a clear framework for developing the method, for example, on the determination of monetary damages, the nationwide specification of value categories within the significance criterion "damage potential", the need to determine or estimate floodplains and the nationwide specification of a damage function type. Relevant decision options are disclosed, which are justifiably narrowed down based on requirements, scientific findings and references from relevant documents. Despite this, the addressees are given freedom in designing the method, e.g., in selecting value categories and choosing monetization methods.

Federal state specific characteristics, which were already inherent in the previous implementation process of flood risk assessment and identification of risk areas, are taken into account and are admitted in the concept. The political decision-making autonomy of the water management administration is preserved.

In the presented method, beyond land use and hazard from extreme events, exposure (site data and, if applicable, exposure to water depth), monetary value levels and their spatial distribution, damage susceptibility and vulnerability of value categories to be selected are included. The obtained results on damage potentials as damages or potential adverse consequences are used as partial information for flood risk assessment and identification of flood risk areas. The monetary output of damage potentials does not imply any calculation of the partial risk associated with the extreme scenario in the sense of annual expected damages via multiplication of flood probability with the determined damage potentials as a work step in the review of the preliminary flood risk assessment.

The test and work steps, including work instructions and processing notes, are recommended for use to stakeholders. The concept can further be used to prepare a documentation of the method, which can be used in the context of reporting to the European

Commission. In addition, the concept can be used to communicate with other member states and other interested parties to outline the basic procedure for the development of the method, consideration processes and completed as well as open work steps. Through the selection of literature and research methods, the concept contributes to the interconnectedness of water resources management and qualitative research.

The future will show which decisions will be made by the stakeholders to define the method and what the recommendations for the application of the significance criterion "damage potential" will be by the LAWA-AH for the third cycle. An initial trial application of the method by the federal states is conceivable for the determination of significance thresholds. The specific application of the significance criterion "damage potential" including damage potential assessment has to be carried out by the federal states on their own responsibility in the third cycle by December 22, 2024.

Datenverfügbarkeit

Das während der Studie erzeugte Göttinger Konzept steht beim Fachinformationsdienst Geowissenschaften (FID GEO) zur Verfügung, [<https://doi.org/10.23689/fidgeo-5655>] (GRÜNEBERG, 2022). Die Verfügbarkeit einiger Referenzen, die im Rahmen einer Lizenz für die aktuelle Studie verwendet wurden, ist eingeschränkt, weshalb diese nicht öffentlich zugänglich sind.

Danksagung

Das Forschungsprojekt fand in Kooperation mit dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz und der Kleingruppe "Bewertung des Hochwasserrisikos" des Ausschusses Hochwasserschutz und Hydrologie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser statt. Allen Kooperationspartnern sei gedankt für ihre freundliche und konstruktive Zusammenarbeit.

Anschrift der Verfasserin

Juliane Grüneberg
Georg-August-Universität Göttingen
Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung
Umwelt- und Ressourcenökonomik
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen
juliane.grueneberg@agr.uni-goettingen.de

Literaturverzeichnis

- AIRBUS DEFENCE AND SPACE (2016): Report for the provision of EMSN-024: Nation-wide Asset mapping in Germany. Prepared for European Commission – Joint Research Centre. https://emergency.copernicus.eu/mapping/download/127105/EMSN024-Final_Report.pdf?redirect=list-of-components/EMSN024, Zugriff am 27. November 2020.
- BAUMGARTEN, C., CHRISTIANSEN, E., NAUMANN, S., PENN-BRESSEL, G., RECHENBERG, J. & A.-B. WALTER (2011): Hochwasser verstehen, erkennen, handeln! Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_new.pdf, Zugriff am 3. Juni 2021.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (o. J.): Ständiger Ausschuss Hochwasserschutz und Hydrologie. <https://www.lawa.de/Ausschuesse-361-Staendiger-Ausschuss-Hochwasserschutz-und-Hydrologie.html>, Zugriff am 4. März 2021.

- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS "HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2009): Vorgehensweise bei der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos nach EU-HWRM-RL. Beschlossen auf der 137. LAWA-VV am 17./18. März 2009 in Saarbrücken. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. <https://www.wasserblick.net/servlet/is/142658/Signifikanzkriterien50209.pdf?command=downloadContent&filename=Signifikanzkriterien50209.pdf>, Zugriff am 25. November 2020.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS "HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2017): Empfehlungen für die Überprüfung der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos und der Risikogebiete nach EU-HWRM-RL – beschlossen auf der 153. LAWA-Vollversammlung, 16./17. März 2017 in Karlsruhe. Vorläufige Risikobewertung (PFRA) ab dem 2. Zyklus der Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie in Deutschland. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Stuttgart. https://www.wasserblick.net/servlet/is/177323/PFRA_Empfehlungen_%C3%9Cberpr%C3%BCfung_2.Zyklus.pdf?command=downloadContent&filename=PFRA_Empfehlungen_%C3%9Cberpr%C3%BCfung_2.Zyklus.pdf, Zugriff am 25. November 2020.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS "HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2018a): Textbausteine (Summarytexte) für die Bewertung von Hochwasserrisiken, Risikogebiete nach §73 WHG. Vorgelegt im Mai 2018. Beschlossen auf der 156. LAWA-Vollversammlung 27./28. September 2018 in Weimar. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Erfurt. https://www.wasserblick.net/servlet/is/178449/Summarytexte_Bewertung_HW_Risiko_2018.pdf?command=downloadContent&filename=Summarytexte_Bewertung_HW_Risiko_2018.pdf, Zugriff am 25. November 2020.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS "HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2018b): Workshop Schadenspotenziale des ständigen Ausschusses "Hochwasserschutz und Hydrologie" LAWA-AH am 8. und 9. März 2018 in Mainz. Protokoll. Stand 22. September 2018. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Unveröffentlicht.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS "HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2018c): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. Beschlossen auf der 156. LAWA-Vollversammlung 27./28. September 2018 in Weimar. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Mainz. <https://www.wasserblick.net/servlet/is/177323/LAWA-Empfehlungen%20Aufstellung%20HW-Gefahrenkarten%20und%20HW-Risikokarten.pdf?command=downloadContent&filename=LAWA-Empfehlungen%20Aufstellung%20HW-Gefahrenkarten%20und%20HW-Risikokarten.pdf>, Zugriff am 25. November 2020.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER AUSSCHUSS „HOCHWASSERSCHUTZ UND HYDROLOGIE" (LAWA-AH) (2019a): 6. Sitzung der Kleingruppe des LAWA-AH "Bewertung des Hochwasserrisikos" am 21. und 22. Mai 2019 in Potsdam. Niederschrift. Unveröffentlicht.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) (2018): FD Template. Template short name: PFRA, Name: PreliminaryFloodRiskAssessment. <https://www.wasserblick.net/servlet/is/110185/pfra.zip?command=downloadContent&filename=pfra.zip>, Zugriff am 26. Februar 2021.
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN (2013): Bericht zur Flutkatastrophe 2013: Katastrophenhilfe, Entschädigung, Wiederaufbau. 4. September 2013. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/bevoelkerungsschutz/kabinettsbericht-fluthilfe.html>, Zugriff am 1. August 2022
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN UND FÜR HEIMAT, BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN (2022): Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse. 29.03.2022. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2022/abschlussbericht-hochwasserkatastrophe.html>, Zugriff am 31. Juli 2022.
- CHRIST, A., GOLL, A., GRÜNEBERG, J., MÖLKNER, N. & M. AST (2018): Arbeitsgrundlage bundesweit einheitliche Methodik zur Schadenspotenzialermittlung. Basierend auf dem LAWA-AH Workshop Schadenspotenziale. Stand: 19. November 2018. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Unveröffentlicht.
- COMMON IMPLEMENTATION STRATEGY (CIS) (2012): A Working Group Floods (CIS) Resource Document "Flood Risk Management, Economics and Decision Making Support". <https://circabc.europa.eu/sd/a/3620c976-504f-4d12-995e-20d4e89101c0/WGF%20Resource%20document%20Flood%20Risk%20Management%252c%20Economics%20and%20Decision%20Making%20Support>, Zugriff am 25. November 2020.
- COMMON IMPLEMENTATION STRATEGY (CIS) (2013): Guidance for Reporting under the Floods Directive (2007/60/EC). Guidance Document No. 29. A compilation of reporting sheets adopted by Water Directors. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report – 2013 – 071. European Union, Luxembourg. https://circabc.europa.eu/sd/a/acbcd98a-9540-480e-a876-420b7de64eba/Floods%20Reporting%20guidance%20-%20final_with%20revised%20paragraph%204.2.3.pdf, Zugriff am 25. November 2020.
- COMMON IMPLEMENTATION STRATEGY (CIS) (2018): WGF 22 Report of workshop on risk indicators and assessment – intangible and tangible effects. Workshop held on 19 and 20 October 2017. Republic of Estonia Ministry of Environment.
- COMMON IMPLEMENTATION STRATEGY (CIS) (2021): Floods Directive Reporting Guidance 2018. V.5.0. http://cdr.eionet.europa.eu/help/Floods/Floods_2018/GuidanceDocuments/FD_ReportingGuidance.pdf, Zugriff am 24. März 2021.
- FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (FGG WESER) (2018): Überprüfung der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos und der Risikogebiete 2018 (nach § 73 WHG bzw. Art. 4 und Art. 5 EG-HWRM-RL). Information der Öffentlichkeit. https://www.fgg-weser.de/component/rsfiles/download-file/files?path=EG-HWRM-RL%252Fueberpruefung_der_%2Bvorlaeufigen_bewertung_hochwasserrisiko_18120.pdf&Itemid=111, Zugriff am 23. Januar 2022.
- GRÜNEBERG, J. (2022): Göttinger Konzept zur Entwicklung einer Methode zur Anwendung des Signifikanzkriteriums Schadenspotenzial bei der Überprüfung der Bewertung des Hochwasserrisikos gemäß EG-HWRM-RL. FID GEO. <https://doi.org/10.23689/ridgeo-5655>.
- HEINRICHS, H. & H. GRUNENBERG (2009): Fallstudie: Klimawandel, Hochwasser, Adaption. In: HEINRICHS, H. & GRUNENBERG, H. (Hrsg.): Klimawandel und Gesellschaft. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 47-59. DOI: 10.1007/978-3-531-91516-6_3.
- HOCHWASSERRISIKOMANAGEMENT-RICHTLINIE (HWRM-RL 2007/60/EG): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (EG-HWRM-RL) vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Straßburg.
- HOCHWASSERSCHUTZGESETZ II (2017): Gesetz zur weiteren Verbesserung des Hochwasserschutzes und zur Vereinfachung von Verfahren des Hochwasserschutzes vom 30. Juni 2017. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 44, ausgegeben zu Bonn am 5. Juli 2017.
- HOFFMANN, T. G. & L. KREßNER (2013): Ergänzung des Berichtes zur vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos der Binnengewässernach EU-HWRM-RL in Mecklenburg-Vorpommern im Auftrag der Landesverwaltung Mecklenburg-Vorpommern im Auftrag der Landesverwaltung Mecklenburg-Vorpommern. Biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Bützow. https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/hwrrisiko_endbericht_risikoabschnitte_mv.pdf, Zugriff am 6. August 2021.
- HOFFMANN, T. G., MEHL, D. SCHNEIDER, M. & T. FOY (2011): Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos im Rahmen der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie für das Land Mecklenburg-Vorpommern im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Bützow. https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/hwrrisiko_endbericht_hwrm_rl_mv.pdf, Zugriff am 6. August 2021.

- HYDROTEC INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND UMWELT MBH & INFRASTRUKTUR UND UMWELT PROFESSOR BÖHM UND PARTNER (HYDROTEC & INFRASTRUKTUR UND UMWELT) (2018): Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW. Überprüfung und Aktualisierung der vorläufigen Risikobewertung im 2. Zyklus der EU-HWRM-RL sowie Aktualisierung der Risikogewässer. Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf. https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/hwrm_nrw_vorlaufuge_bewertung_final.pdf, Zugriff am 1. Dezember 2020.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE (IKSE) (2004): Dokumentation des hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg. https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/02_Hochwasserschutz/2004_IKSE-Dokumentation_Hochwasser_2002.pdf, Zugriff am 1. August 2022
- MARGGRAF, R., RAUPACH, K., SAUER, U., GRÜNEBERG, J. & A.K. BUCHS (2017): Göttinger Prüfschema zur Erfüllung der WRRL Anforderungen: Feststellung der Kosteneffizienz von Maßnahmen und Prüfung von Ausnahmen aufgrund unverhältnismäßig hoher Kosten. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2017 (10) Nr. 12, S. 737-743.
- MESSNER, F. & V. MEYER (2006): Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research. In: SCHANZE, J., ZEMAN, E., MARSALEK, J. (Ed.): *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer, Berlin, 149-167. DOI: 10.1007/978-1-4020-4598-1_13.
- MEYER, V. (2005): Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Dissertationsschrift an der Universität Hannover. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig. [https://www.ufz.de/index.php?de=20939&pub_data\[function\]=showFile&pub_data\[PUB_ID\]=3620](https://www.ufz.de/index.php?de=20939&pub_data[function]=showFile&pub_data[PUB_ID]=3620), Zugriff am 26. November 2020.
- MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MKULNV) (2011): Bericht zur vorläufigen Bewertung nach der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) in NRW. https://www.bezreg-muenster.de/zentralablage/dokumente/umwelt_und_natur/hochwasserschutz/bericht-zur-vorlaufigen-bewertung-nach-der-eg-hochwasserrisikomanagement-richtlinie-eg-hwrm-rl-in-nrw.pdf, Zugriff am 2. Dezember 2020.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (MUV), ARGE EEPi GMBH & OBERMEYER PLANEN+BERATEN GMBH (2015): Hochwasserrisikomanagementplan nach Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken für das Saarland. https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/muv/wasser/dl_hochwasserrisikomanagementplan_muv.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff am 2. Dezember 2020.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND VERKEHR SAARLAND (MUEV) (2010): Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos im Saarland. Saarbrücken. https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/muv/wasser/dl_vorlaufigebewertunghochwasserrisiko_muv.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff am 2. Dezember 2020.
- MÖLKNER, N. (2018): Synopse zum Fragebogen zur Ermittlung von Schadenspotenzialen der Hochwasserszenarien in Risikogebieten zur Vorbereitung eines LAWA-AH Workshops. Unveröffentlicht.
- RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK, INGENIEURGEMEINSCHAFT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT (RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK) (2018): Hochwasserrisiko-Managementplanung in Rheinland-Pfalz. Vorläufige Risikobewertung – 1. Fortschreibungszyklus. Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz. https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/8661/Bewertung_des_Hochwasserrisikos_2018.pdf?command=downloadContent&filename=Bewertung_des_Hochwasserrisikos_2018.pdf, Zugriff am 1. Dezember 2020.
- RUIZ RODRIGUEZ – ZEISLER – BLANK, INGENIEURGEMEINSCHAFT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR UND UMWELT PROFESSOR BÖHM UND PARTNER, DR. WALTER PFLÜGNER PLANEVAL & JESTAEDT + PARTNER (2015): Hochwassermanagementplan für das Einzugsgebiet Necker (Hessen). Regierungspräsidiums Darmstadt, Darmstadt. <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hochwasser/hwrm/Neckar/Erlaeuterungsbericht-HWRM-Neckar.pdf>, Zugriff am 1. Dezember 2020.
- SAUER, U., RAUPACH, K. & R. MARGGRAF (2015): Verbesserung der maritimen Notfallvorsorge als Maßnahme im Rahmen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. *Wasser und Abfall* 6/2015, 22-25.
- SCHUHMACHER, U. & G. MEINEL (2009): ATKIS, ALK(IS), Orthobild – Vergleich von Datengrundlagen eines Flächenmonitorings. In: MEINEL, G., SCHUMACHER, U. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring. Konzepte – Indikatoren – Statistik*. Shaker Verlag, Aachen, 47-67. http://www.ioer-monitor.de/fileadmin/user_upload/monitor/DFNS/2009_1_DFNS/Buchbeitraege/IOER_DFNS_I_2009_S_47-67_PDFa.pdf, Zugriff am 3. Dezember 2020.
- SENATSWERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ (2019): Hochwasserrisikomanagement in Berlin. Überprüfung der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos und der Risikogebiete in Berlin – Zweiter Zyklus -. 2. Auflage, Berlin. https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/hochwasser/bewertung_hochwasserrisikos_berlin.pdf, Zugriff am 4. März 2021.
- THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND NATURSCHUTZ (TMUEN) (2018): Veröffentlichung der vom Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz vorgenommenen überprüften und aktualisierten Bewertung der Hochwasserrisiken und der Ermittlung der Risikogebiete gemäß § 79 Absatz 1 in Verbindung mit § 73 Absatz 1 des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585). Erfurt. https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Boden_Wasser_Luft_Laerm/Hochwasserschutz/anlage_1_-_veroeffentlichungstext_der_risikogebiete_2018.pdf, Zugriff am 1. Dezember 2020.
- WASSERHAUSHALTSGESETZ (WHG) (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408) geändert worden ist.
- ZEUG, G., WEIRATHER, M., THIEKEN, A. & L. DILLENARDT (2019): Untersuchungen von Potentialen zur Nutzung von Copernicus-Daten und Diensten für die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie. Abschlussbericht. Texte 121/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-von-potentialen-zur-nutzung-von>, Zugriff am 26. November 2020.

Paul L. Ohlert, Martin Bach & Lutz Breuer

Verfahren zur Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser

Methods for regionalisation of nitrate concentration in groundwater

In der "Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung der mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebiete" (AVV GeA) sind für die immissionsbasierte Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete geostatistische und deterministische Regionalisierungsverfahren vorgesehen. Die Leistungsfähigkeit bzw. die Unsicherheit der Verfahren Inverse Distanzgewichtung (IDW), Ordinary Kriging (OK) und Voronoi-Polygone (VP) im Hinblick auf diese Aufgabe sind bislang nicht untersucht worden. Für diese Verfahren werden daher vier Aspekte der Interpolation der Nitratkonzentration im Grundwasser analysiert: (1) Einfluss der Verfahrensparameter auf die Regionalisierung, (2) räumliche Autokorrelation der Nitratkonzentrationen zwischen den Messstellen, (3) Prognosegüte der Verfahren sowie (4) Unterschiede der geschätzten Verteilung der Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei flächendeckender Regionalisierung. Bei der ersten Untersuchung wurde eine extern modellierte Karte der Nitratkonzentration im Grundwasser in Bayern als Referenzverteilung verwendet, die anderen Auswertungen basieren auf einem Datensatz von 5.790 Grundwassermessstellen in Bayern. Die Analyse der räumlichen Korrelation zeigt, dass ab einer Reichweite von etwa 0,7 km kein Zusammenhang der Nitratwerte zwischen Messstellen besteht. Bei Kreuzvalidierung der 5.790 Messstellen mit den drei Verfahren tritt ein mittlerer absoluter Fehler zwischen gemessenen und interpolierten Konzentrationen von rund 7 bis 8 mg NO₃/l auf, die relative Unsicherheit der Verfahren beträgt rund 43 % bis 49 %. Oberhalb des Grenzwerts der EG-Nitratrictlinie und der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) von 50 mg NO₃/l wird die Konzentration im Mittel um 28 bis 29 mg NO₃/l zu niedrig interpoliert; die Anzahl der Messstellen > 50 mg NO₃/l wird um rund 44 % (IDW), 56 % (OK) bzw. 20 % (VP) unterschätzt. Bei einer landesweiten Interpolation in Bayern mit den drei Verfahren werden zwischen rund 3 % und 10 % Flächenanteil mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l ausgewiesen. Aus Sicht der Autoren sind die untersuchten Verfahren für eine problemadäquate Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete nicht geeignet.

Schlagwörter: Grundwasser, Inverse Distanzgewichtung, Interpolation, Kriging, Nitrat, Regionalisierung, Voronoi-Verfahren

In the "Administrative regulation on the delineation of nitrate vulnerable and eutrophic zones" (AVV GeA), geostatistical and deterministic regionalisation methods are provided for the immission-based delineation of nitrate vulnerable zones in Germany. The performance and the uncertainty of the methods for this purpose have not been evaluated so far. For the methods Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (OK) and Voronoi Polygons (VP) for the interpolation of nitrate concentrations in groundwater, we analysed four aspects: (1) effect of the method parameterisation on the regionalisation, (2) spatial correlation of nitrate concentrations between the monitoring sites, (3) prediction quality of the methods and (4) differences in the distribution of nitrate concentrations in groundwater with state-wide interpolation. The study on (1) uses an externally modelled map of groundwater nitrate concentrations in Bavaria as reference distribution; the evaluations on (2) to (4) are based on a data set of 5,790 groundwater monitoring sites in Bavaria. The analysis of the spatial correlation shows that beyond a range of about 0.7 km there is no correlation of the nitrate values between monitoring sites. Cross-validation of the 5,790 monitoring sites with the three methods results in a mean absolute error between measured and interpolated concentrations of about 7 to 8 mg NO₃/l; the relative uncertainty of the methods is about 43% to 49%. Above the threshold of the Nitrates Directive and the Water Framework Directive of 50 mg NO₃/l, the concentration is interpolated on average 28 to 29 mg NO₃/l too low and the number of measuring sites > 50 mg NO₃/l is reduced by about 44% (IDW), 56% (OK) and 20% (VP). The state-wide interpolation with the three methods shows between about 3% and nearly 10% of land area with a concentration above 50 mg NO₃/l. From the authors' point of view, the suitability of the three methods is to be assessed critically for an adequate delineation of nitrate vulnerable zones.

Keywords: groundwater, inverse distance weighting, interpolation, Kriging, nitrate, regionalisation, Voronoi

1 Einleitung

Der Europäische Gerichtshofs (EuGH) hat mit Urteil vom 21. Juni 2018 festgestellt, dass die Bundesrepublik Deutschland die Nitratrictlinie nachhaltig verletzt. Zur Umsetzung des EuGH-Urteils wurde im Jahr 2020 die Düngeverordnung (DüV) novelliert. § 13a DüV (vom 28. April 2020) verpflichtet seitdem die Landesregierungen dazu, für diejenigen Gebiete von Grundwasserkörpern, die den Nitrat-Grenzwert von 50 mg NO₃/l überschreiten oder die eine Konzentration von über 37,5 mg NO₃/l und einen steigenden Trend aufweisen, besondere Anforderungen an den Grundwasserschutz festzulegen. In diesen Gebieten müssen die Landwirtschaftsbetriebe unter anderem ihre Stickstoffdüngung um 20 % gegenüber dem nach DüV berechneten Düngebedarf

reduzieren. Zur Vereinheitlichung der Vorgehensweise der Länder wurde am 3. November 2020 die erste Fassung der "Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung der mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebiete" (AVV GeA) erlassen. Diese erste Fassung der AVV GeA und die Gebietskulisse der damit ausgewiesenen "roten Gebiete" wurden von der EU-Kommission zurückgewiesen. Daraufhin wurde am 8. Juli 2022 eine Neufassung vom Bundesrat beschlossen (AVV GeA 2022), in der die Verkleinerung der "roten Gebiete" mittels einer nachgeschalteten Ermittlung von Flächen mit hohem Emissionsrisiko auf Grundlage des Modellansatzes AGRUM DE nicht mehr Bestandteil der Ausweisung ist. Für die immissionsbasierte Abgrenzung der mit Nitrat belasteten Gebiete sieht die AVV GeA 2022 (Anlage 2 und 3) geostatistische Regionalisierungsverfahren vor, übergangsweise (bis

2028) sind auch deterministische Verfahren zulässig (hilfsweise auch eine Abgrenzung nach hydrogeologischen Kriterien). Als deterministische Verfahren werden Inverse Distanzgewichtung (IDW) und Voronoi-Polygone (VP) angewendet, geostatistische Verfahren werden in der AVV GeA nicht explizit aufgeführt. In der Vergangenheit wurden von einzelnen Bundesländern verschiedene Kriging-Varianten angewendet. Keines der genannten Regionalisierungsverfahren wurde bislang im Hinblick auf die Fragestellung untersucht, ob damit eine problemadäquate Flächenausweisung für den Schutz der Grundwasservorkommen gewährleistet ist.

In der Literatur finden sich eine Reihe von Veröffentlichungen, in denen IDW und Ordinary Kriging (OK) sowie zum Teil weitere Verfahren für die Regionalisierung von hydrogeologischen Größen herangezogen werden:

VAROUCHAKIS & HRISTOPULOS (2013) vergleichen unter anderem die drei Verfahren IDW, OK und Delauny Kriging (die Delauny-Triangulation ist der duale Graph der VP) zur Interpolation der Grundwasserhöhe und erzielen mit den Methoden OK, Universal Kriging und Delauny Kriging die beste Übereinstimmung (Bewertung mittels Kreuzvalidierung).

ZIRAKBASH et al. (2020) beziehen zehn Methoden in ihren Vergleich mit ein und zeigen, dass die Verfahren Topo to Raster, Natural Neighbor, OK und Bayesian Kriging für die Interpolation der Grundwasserhöhe den anderen Verfahren überlegen sind.

ELUMALAI et al. (2017) interpolieren die räumliche Verteilung von Grundwassergüteparametern in einem 582 km² großen Einzugsgebiet mit sehr heterogenem Ergebnis: Mit IDW wird 70 % des Grundwasserkörpers als "belastet" ausgewiesen, mit OK dagegen nur 28 %, wobei die Autoren auf die möglichen Ursachen dieser Diskrepanz nicht weiter eingehen.

Die Arsen-Konzentration im Grundwasser in Texas (USA) wurde von GONG et al. (2014) ausgehend von rund 8.000 Messstellen mit IDW und drei Kriging-Verfahren interpoliert, wobei mit IDW der höchste Korrelationskoeffizient in der Kreuzvalidierung erreicht wird.

MUELLER et al. (2004) vergleichen die Eignung von IDW und OK für die Regionalisierung von Bodeneigenschaften im Parzellenmaßstab und schlussfolgern, dass für Datensätze ohne Struktur im Semivariogramm IDW das bessere Verfahren darstellt.

In einer 605 km² großen Region wurde der Flächenanteil mit hohen Konzentrationen von drei Schwermetallen im Boden mit IDW und OK (sowie zwei weiteren Regionalisierungsverfahren) ähnlich geschätzt, lag jedoch insgesamt niedriger als der prozentuale Anteil der belasteten Bodenproben (XIE et al., 2011).

In einem faktoriellen Design wurde von ZIMMERMAN et al. (1999) der Einfluss der Parametrisierung ausgewertet, OK ergab dabei generell um 20 bis 30 % bessere Werte des Root Mean Square Error als IDW.

Anhand von neun synthetischen Datensätzen untersuchten BABAK & DEUTSCH (2009) die Güte der Methoden IDW und OK mit unterschiedlicher globaler oder lokaler Parametrisierung und erzielten in jeweils vier Fällen mit IDW und mit OK das beste Ergebnis.

TABANDEH et al. (2021) verglichen die Interpolation des Gesamtgehalts an gelösten Stoffen für zwei Grundwasserkörper mit 24 verschiedenen Interpolationsverfahren bzw. -varianten und erreichten mit IDW und OK (mit mehreren Variogramm-Funktionen) ähnlich gute Ergebnisse. In einer Literaturübersicht listen diese Autoren weiterhin 37 Untersuchungen aus verschiedenen Fachgebieten auf, in denen jeweils mehrere Interpolationsver-

fahren zur Anwendung kamen. Dabei wurde die Methode OK in 16, Universal Kriging in sieben und IDW in drei Studien als beste Methode genannt, in den übrigen Fällen gab es keine eindeutige Präferenz oder es wurde ein anderes Verfahren als beste Methode aufgeführt.

Zur Leistungsfähigkeit und zur Unsicherheit von IDW, OK und VP speziell bei der Interpolation der Nitratkonzentration im Grundwasser liegen nur sehr wenige Veröffentlichungen vor. CHARIZOPOULOS et al. (2018) vergleichen ohne eindeutiges Ergebnis vier verschiedene Formen von Sektoren, innerhalb derer die Messstellen in einem 446 km² großen Areal für die IDW-Interpolation herangezogen werden.

MUKHERJEE & SINGH (2021) verwenden zehn Methoden zur räumlich-zeitlichen Interpolation der Nitratkonzentration im Grundwasser in einer 4.545 km² großen Region in Indien und sprechen sich für Kriging als bestem Verfahren aus.

Die unterschiedliche Repräsentativität von Grundwassermessnetzen wird von BACH et al. (2020) für Deutschland aufgezeigt.

Für das Land Mecklenburg-Vorpommern wurde die Eignung verschiedener Regionalisierungsverfahren für die Bewertung des chemischen Grundwasserzustands geprüft (LUNG, 2021). Im Ergebnis wurde ein hybrides deterministisch-geostatistisches Verfahren entwickelt, das VP mit Variogrammen zur Schätzung des Ausdehnungsfehlers kombiniert.

In einer IDW-Anwendung von OHLERT et al. (2022) zeigte sich für Bayern eine systematische Unterschätzung der ausgewiesenen Flächen. Infolgedessen würden dann auch zu wenig Landwirtschaftsflächen ausgewiesen, auf denen besondere Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers nach § 13a Düngeverordnung ergriffen werden müssen. Vor diesem Hintergrund werden in der hier vorgestellten Untersuchung die Güte bzw. die Unsicherheiten der Regionalisierungsverfahren IDW, OK und VP exemplarisch anhand der Anwendung für das Land Bayern vergleichend analysiert.

2 Methodik und Datengrundlage

2.1 Interpolationsverfahren

Inverse Distanzgewichtung schätzt den unbekanntem Wert Z^* am Punkt x_0 ausgehend von einer gegebenen Anzahl n benachbarter Messstellen (Stützstellen) x_j , wobei die Messwerte mit einer inversen Funktion der Distanzen zwischen dem zu interpolierenden Punkt und den Messwerten gewichtet werden:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Gl. 1}$$

mit dem Messwert $Z(x_j)$ an der Messstelle x_j und dessen Gewichtung λ_j . Die Gewichtung wird berechnet mit

$$\lambda_i = d_i^{-p} / \sum_{i=1}^n d_i^{-p} \quad \text{Gl. 2}$$

mit Euklid'scher Distanz d_i zwischen dem zu interpolierenden Punkt x_0 und Messstelle x_j , Anzahl der Messstellen n , die in die Interpolation von x_0 einbezogen werden, und Exponent p , der bestimmt, wie stark das Gewicht der Messstelle x_j abnimmt, wenn der Abstand d_j wächst (XIE et al., 2011).

Kriging ist die Sammelbezeichnung für geostatistische Interpolationsverfahren, bei denen die Gewichte der in die Interpolation einbezogenen Messwerte so bestimmt werden, dass die

Schätzfehlervarianz minimiert wird. Mit der Interpolation wird der unbekannte Wert $Z^*(x_0)$ aus den Werten $Z(x_i)$ der n benachbarten Messstellen x_i mit einem Gewichtungsfaktor w (Krigeschätzer) gewichtet

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \tag{Gl. 3}$$

Die Gewichte w_i für einen Punkt x_0 werden so bestimmt, dass (i) der Schätzfehler $F(x_0) = Z^*(x_0) - Z(x_0) = \sum w_i Z(x_i) - Z(x_0)$ im Mittel gleich 0 ist und (ii) die Varianz des Schätzfehlers $VAR[F(x_0)]$ minimiert wird. Dazu wird die Extremwertaufgabe $VAR[F(x_0)] = \min$ mit der Nebenbedingung gelöst, dass der Erwartungswert des Schätzfehlers $E[F(x_0)] = 0$ wird; woraus die Summe über die Gewichte $\sum w_i = 1$ folgt. Die Extremwertaufgabe führt zu einem linearen Gleichungssystem, dessen eindeutige Lösung die Gewichte des Krigeschätzers sind (BLÖSCHL, 2006; HINTERDING et al., 2003). Die räumliche Autokorrelation der Messwerte wird mit dem Semivariogramm $\gamma(h)$ als Funktion des Abstands h beschrieben

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N(h)^{-1} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{Gl. 4}$$

mit N als Anzahl der Messwertpaare mit Abstand h sowie $Z(x_i)$ und $Z(x_i + h)$ als den Werten der Messgröße an den Orten x_i und $x_i + h$. An die Semivarianz-Werte können verschiedene Semivariogramm-Funktionen (bspw. linear, sphärisch, exponentiell, Gauß) angepasst werden, um den Verlauf von $\gamma(h)$ über den ausgewerteten Abstandsbereich 0 bis h mathematisch zu beschreiben. Von den verschiedenen Kriging-Verfahren wird hier nur Ordinary Kriging untersucht.

Mit dem Voronoi-Verfahren (auch Thiessen-Polygone, Dirichlet-Zerlegung) wird eine Fläche ausgehend von einer vorgegebenen Menge an Punkten (Messwerten) $Z(x_p), Z(x_q)$ so in Polygone unterteilt, dass alle Punkte $Z^*(x_0)$ innerhalb eines Polygons näher zu dessen Zentrum x_p liegen als zum Zentrum x_q eines anderen Polygons

$$Z^*(x_0) = Z(x_p) \mid d_p \leq d_q \text{ für alle } p \neq q \tag{Gl. 5}$$

mit d_p und d_q Euklid'schen Distanzen zwischen dem Punkt x_0 und den vorgegebenen Punkten x_p und x_q (AURENHAMMER & KLEIN, 2000).

2.2 Untersuchungsansätze

Die Güte und die Unsicherheit der drei Verfahren in Bezug auf die Prognose der Höhe und der räumlichen Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser wird mit den folgenden Ansätzen vergleichend untersucht.

- 1) Variation der Verfahrensparameter: Einfluss der Stichprobendichte und -position sowie unterschiedlicher Parametrisierung der Verfahren auf das Ergebnis der Regionalisierungen.
- 2) Analyse der räumlichen Korrelation der Nitratkonzentrationen zwischen den Messstellen: Prüfung der Hypothese der Verfahren IDW und OK, dass die Werte umso ähnlicher sind, je näher die Messstellen zueinander liegen.
- 3) Kreuzvalidierung der Nitratkonzentration in den Messstellen: Bewertung der operationalen Prognosegüte für jedes Verfah-

ren anhand des Vergleichs der interpolierten Nitratkonzentrationen mit den gemessenen Werten.

- 4) Flächendeckende Regionalisierung (Karten) der Nitratkonzentration im Grundwasser in Bayern auf Basis von 5.790 Messstellen: Vergleich des Flächenumfangs und der Kongruenz der Areale mit einer Konzentration von über 50 mg NO_3/l im Grundwasser nach den drei Verfahren (IDW, OK, VP).

Die Bewertung erfolgt anhand statistischer Maßzahlen für die interpolierten Konzentrationen, insbesondere dem mittleren absoluten Fehler (Mean Absolute Error, MAE) als Maß für die Unsicherheit der geschätzten Werte. Weiterhin werden die Flächenanteile verglichen, für die eine Überschreitung des Schwellenwertes von 50 mg NO_3/l im Grundwasser berechnet wird. Die Berechnungen wurden mit der Software R vers. 4.0.2 mit folgenden Paketen durchgeführt: IDW Interpolation und Kriging: "gstat" (vers. 2.0.6), Anpassung der Semivariogramm-Funktionen: "fit.variogram", Voronoi: "spatstat" (vers. 1.64.1).

2.3 Datengrundlagen

Für die Untersuchungsansätze 2) bis 4) wurde ein Datensatz mit 7.735 Grundwassermessstellen (Ausweisungsmessnetz und zusätzliche Messstellen) des Bayerischen Landesamts für Umwelt verwendet. Für die Bewertung nach EG-WRRL maßgebliche Nitratkonzentration einer Messstelle ist gemäß Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten (AVV GeA) der Mittelwert aus den jährlichen Maxima der Einzelmessungen der Jahre 2016 bis 2019 (für einige Messstellen 2011 bis 2019, in Einzelfällen bis 2020). Im Datensatz sind lokale Cluster von Messstellen mit identischer Nitratkonzentration vertreten; in der Regel Brunnengalerien, bei denen alle Einzelbrunnen in der Datenbank separat aufgeführt sind. Wenn bei einer Interpolation ein Teil oder alle Stützstellen sehr eng benachbart sind und identische Messwerte aufweisen, dann tritt ein ausgeprägter Bullaugen-Effekt in Erscheinung, das heißt, in der Umgebung dieser Messstellen wird der interpolierte Wert weitgehend durch den Wert dieses Clusters determiniert. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde der Datensatz aggregiert: Jeweils alle Messstellen mit identischer Nitratkonzentration, die innerhalb desselben Rasters von 1 km x 1 km Größe liegen, wurden zu einer einzigen Messstelle zusammengefasst, insgesamt betraf das 1.930 Messstellen. Weiterhin wurde bei 15 Messstellenpaaren mit identischen Koordinaten jeweils nur die Messstelle mit dem höheren Konzentrationswert beibehalten. Der Datensatz wurde dadurch auf 5.790 Messstellen reduziert (Abb. S1 im Supplement), die Anzahl der Messstellen mit einer Konzentration von über 50 mg NO_3/l ($n = 277$) wurde dabei nicht verändert.

Für die flächenbezogenen Untersuchungen (Kap. 3.1 und 3.4) wurde die Hydrogeologische Karte Bayern 1 : 500.000 (LFU, 2009) im Raster von 1 km x 1 km des GeoGitter Deutschland (BKG, 2017) gerastert, Bayern wird darin durch 70.634 Raster repräsentiert. Für die Umsetzung der WRRL sind 260 Grundwasserkörper (GWK) ausgewiesen, von denen nach WRRL-Bewertung 77 nicht im "guten Zustand" in Bezug auf den Parameter Nitrat sind (bezogen auf den o. g. Auswertungszeitraum). Aus dem Landbedeckungsmodell Deutschland (LBM-DE2018; BKG, 2019) wurde die Landwirtschaftsfläche (LF) in den Rastern ausgewertet, die nach LBM-DE2018 34.829 km² umfasst (49,3 % der Landesfläche). Die Hydrogeologische Karte unterscheidet 18 hydrogeo-

logische Einheiten (HGE; Abb. 1; Tab. S1 im Supplement), für die teilweise die Ergebnisse separat ausgewertet werden.

Im Untersuchungsansatz 1) wird für die Zufallsziehung der Stützstellen der Interpolation aus einer Grundgesamtheit eine modellierte Karte der Nitratkonzentration im Grundwasser (Abb. 2) als Referenzkarte verwendet (Kap. 3.1), die von KNOLL et al. (2020) mittels Random-Forest (RF) generiert wurde. RF ist ein Regressionsverfahren aus der Gruppe der Maschinellen Lernverfahren, bei dem zunächst anhand von Messwerten und assoziierten Prädiktoren ein Entscheidungsalgorithmus trainiert und anschließend für alle Elemente (hier: Raster) ohne Messwert aus den Werten der Prädiktoren mittels des RF-Algorithmus die Zielgröße geschätzt wird.

3 Ergebnisse

3.1 Variation der Verfahrensparameter

Das Ergebnis eines Regionalisierungsverfahrens hängt von mehreren Faktoren ab: (i) Anzahl (Dichte) der Stichproben, die aus der Grundgesamtheit der Werte einer regionalisierten Variablen innerhalb eines Untersuchungsgebietes gezogen werden, (ii) Position (räumliche Verteilung) der Stichproben in diesem Gebiet und (iii) Parameter des verwendeten Interpolationsverfahrens. Die Effekte dieser Faktoren wurden für folgende Faktorstufen untersucht.

- (i) Anzahl der Stichproben, d. h. der Stützstellen eines Regionalisierungsverfahrens: $s = 1.412, 3.531, 7.063$. Diese Anzahlen entsprechen einer Messnetzdichte von einer Messstelle pro 50, 20 und 10 km², bezogen auf die 70.634 Raster für Bayern.
- (ii) Position der Stützstellen: jeweils 100 Zufallsziehungen der Stützstellen (Monte-Carlo-Verteilung) für IDW und OK, 30 Zufallsziehungen für VP (reduzierte Anzahl aufgrund längerer Rechenzeit).
- (iii) Variation der Verfahrensparameter:
 - Inverse Distanzgewichtung
 - Anzahl der Stützstellen, die in die Interpolation eines Punktes einbezogen werden (Gl. 1): $n = 4, 8, 12, 16$
 - Exponent der Gewichtung (Gl. 2): $p = 1, 1.5, 2, 4$
 - Ordinary Kriging
 - Anzahl der Stützstellen, die in die Interpolation eines Punktes einbezogen werden (Gl. 3): $n = 4, 8, 12, 16$
 - Maximale Distanz der berücksichtigten Nachbarn zum Interpolationspunkt: $maxDist = 10 \text{ km}, 20 \text{ km}, 40 \text{ km}$
 - Distanzintervalle (Abstandsklassen), für die im Semivariogramm die Semivarianzen zusammengefasst werden: $width = 200 \text{ m}, 500 \text{ m}, 1.000 \text{ m}$
 - Funktion, die an das Semivariogramm angepasst wird: $fkt = \text{exponentiell, sphärisch, Gauß}$
 - Voronoi
 - Keine variablen Verfahrensparameter

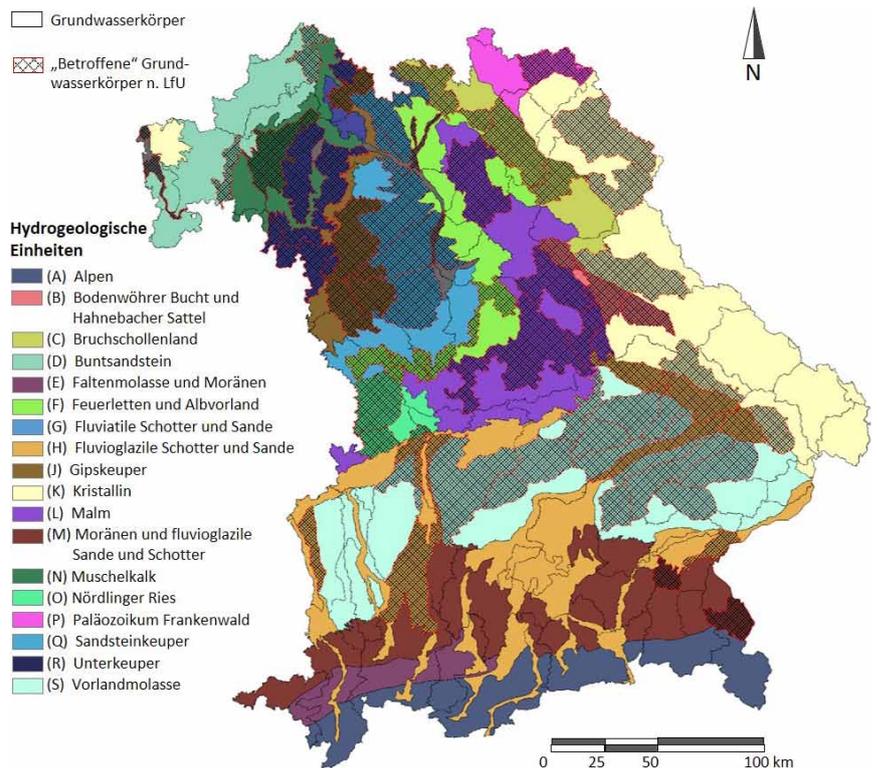


Abbildung 1 Hydrogeologische Einheiten der Hydrogeologischen Karte Bayern 1 : 500.000 (LFU, 2009) und Grundwasserkörper nach Einteilung entsprechend EG-WRRRL (LFU, 2021). *Hydrogeological units of the Hydrogeological Map of Bavaria 1:500,000 (LFU, 2009) and groundwater bodies according to the Water Framework Directive classification (LFU, 2021).* © Bayerisches Landesamt für Umwelt

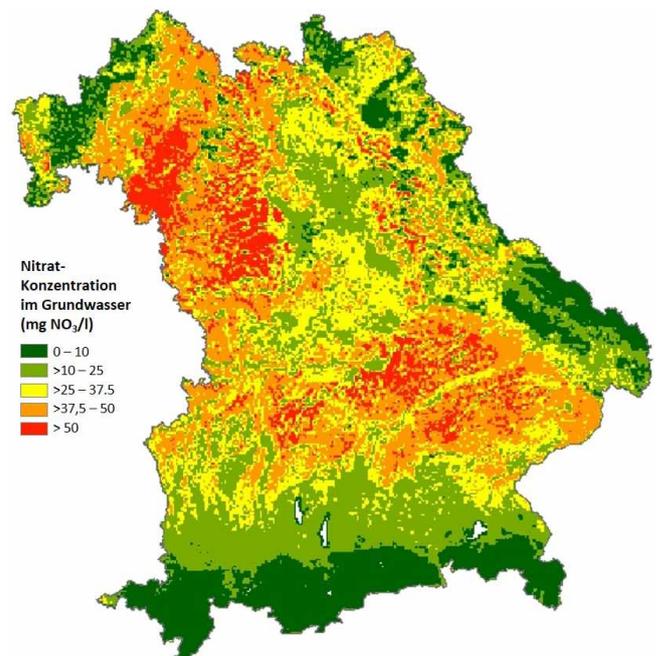


Abbildung 2 Random-Forest-Modellierung (1 km x 1 km) der Nitratkonzentration im Grundwasser in Bayern (Auszug aus KNOLL et al., 2020). *Random forest modelling (1 km x 1 km) of nitrate concentration in groundwater in Bavaria (extract from KNOLL et al., 2020).* Geometrie: © GeoBasis-DE/BKG (2018)

Als Grundgesamtheit, aus der die Konzentrationswerte der Stützstellen gezogen werden, wurde das RF-Modell von KNOLL et al. (2020) als Referenzkarte zugrunde gelegt (Abb. 2). Insgesamt wurden mit IDW für 48 Parameterkombinationen ($3 \times 4 \times 4 = 48$) und mit OK für 324 Parameterkombinationen ($3 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3 = 324$), jeweils mit 100 Zufallsverteilungen der $s = 1.412, 3.531$ und 7.063 Stützstellen, die Nitratkonzentration für $(70.634 - s)$ zu interpolierende Raster berechnet. VP wurde für jeweils 30 Zufallsverteilungen der $s = 1.412, 3.531$ und 7.063 Stützstellen berechnet.

In Tabelle 1 sind die statistischen Maßzahlen für die mit der Methode der Inversen Distanzgewichtung (IDW), des Ordinary Kriging (OK) und der Voronoi-Polygone (VP) regionalisierten Nitratkonzentrationen aufgeführt, gemittelt über die Faktorstufen der Parameter (Ergebnisse der einzelnen IDW- und OK-Kombinationen s. Tab. S2 und S3 im Supplement). Die Mittelwerte sind für alle drei Verfahren und Parameterstufen nahezu identisch und stimmen mit dem Mittel der Grundgesamtheit von $28,49 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ überein. Methodisch bedingt werden bei VP die Maxima getroffen, bei IDW und OK dagegen generell geglättet. Für die Minima treten mit OK mit der Anpassung einer Gauß-Funktion an das Semivariogramm auch negative Werte auf, im Höchstfall betrifft das rund 100 negative Werte (von 70.634), die niedrigsten Werte erreichen rund $-12 \text{ mg NO}_3/\text{l}$. Die negativen Minima für Gauß'sche Semivariogramm-Funktionen führen auch in Tabelle 1 zu negativen Minima bei der Auswertung aggregiert für Parameterstufen.

Von den in Tabelle 1 dargestellten Parametern verursacht die Anzahl der Stützstellen die größte Variation. In Bezug auf die Korrelationskoeffizienten (COR) zwischen Grundgesamtheit und interpolierter Verteilung und den mittleren absoluten Fehlern (MAE) verbessert sich bei allen drei Verfahren die Güte der Interpolation mit zunehmender Dichte der Stützstellen. Die übrigen Parameter der Verfahren IDW und OK beeinflussen die Ergebnisse zu COR und MAE nur marginal. Mit IDW wird der größte Anteil von Rastern mit einer Konzentration von über $50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ ($R_a > 50$) jeweils für die Kombinationen mit der kleinsten Anzahl einbezogener Stützstellen ($n = 4$) und dem größten IDW-Exponenten ($p = 4$) interpoliert. Für OK sind die zwölf Parameterkombinationen mit dem höchsten Anteil an Rastern $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ jeweils durch $s = 7063, \text{maxDist} = 40$ und $\text{fkt} = \text{Gauß}$ gekennzeichnet, für die Parameter n und width treten dabei verschiedene Werte auf. Die Anteile der Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ bleiben nach Regionalisierung mit IDW und OK aber generell erheblich unter dem tatsächlichen Anteil in der Grundgesamtheit von $8,29 \%$. Das VP-Verfahren erzeugt dagegen einen Anteil an Rastern $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$, der sich der Grundgesamtheit stärker annähert bzw. damit fast übereinstimmt.

Die Untersuchung der Verfahrensparameter zeigt, dass die Variabilität der interpolierten Nitratkonzentrationen am stärksten von der Position (Zufallsverteilung) der Stützstellen beeinflusst wird. Für jedes Verfahren wurden daher für eine ausgewählte Parameterkombination (IDW: $s = 7.063, n = 8, p = 2$; OK: $s = 7.063, n = 16, \text{maxDist} = 10 \text{ km}, \text{width} = 200 \text{ m}$, sphärisches Variogramm; VP: $s = 7.063$) auch die Häufigkeitsverteilung der Nitratkonzentration sowie die Kongruenz der Anzahl an Rastern $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ innerhalb der 100 bzw. 30 Zufallsverteilungen ausgewertet. Abbildung 3 verdeutlicht, dass die Häufigkeitsdichte der Nitratkonzentration mit IDW und OK gegenüber der Grundgesamtheit für

mittlere Nitratkonzentrationen (10 bis ca. 40 mg/l) überschätzt und in den Randbereichen der Konzentrationswerte unterschätzt wird, was insbesondere die Nitratkonzentrationen im höheren Bereich betrifft. Mit VP wird dagegen die Häufigkeitsverteilung der Grundgesamtheit nahezu identisch reproduziert.

Der Anteil der Raster mit einer Konzentration von über $50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ beträgt im Mittel der 100 Interpolationen mit IDW rund $4,5 \%$ und mit OK rund $4,8 \%$, was gegenüber dem Wert der Grundgesamtheit des Random-Forest-Modells von $8,3 \%$ eine Unterschätzung von rund 46% bzw. 42% bedeutet (Tab. 2). Die Spanne des Anteils der Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ umfasst $1,0$ bzw. $1,2$ Prozentpunkte. Aufgrund der unterschiedlichen Position von Stützstellen (Messstellen) im Zuge der 100 zufällig gezogenen Interpolationen kann somit für die hier zugrundeliegende Referenzkarte die aggregierte Fläche mit einer Konzentration von über $50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ mit IDW-Interpolation zwischen rund $4,0 \%$ und $5,0 \%$ variieren, mit OK zwischen rund $4,2$ und $5,4 \%$. Mit VP werden dagegen im Mittel $7,5 \%$ an Rastern mit $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ bestimmt, was nur etwas weniger ist als der Wert der Grundgesamtheit. Im Maximum von 30 Interpolationen mit zufällig gezogenen Stützstellen werden mit der VP-Interpolation nur 198 Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ weniger ausgewiesen. In Tabelle 2 ist zusätzlich die Anzahl der deckungsgleichen Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ angegeben, das heißt derjenigen Raster, die sowohl in der Grundgesamtheit (RF-Modell) als auch mit einem Regionalisierungsverfahren übereinstimmend in diese Kategorie eingestuft werden. Bezogen auf die Anzahl der Raster, die gemäß dem jeweiligen Interpolationsverfahren über $50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ liegen, sind das für IDW-Verfahren nur rund 67% und für die OK-Methode nur rund 65% , wobei sich die Angaben jeweils auf das Mittel beziehen. Die Prozentwerte für Minimum bzw. Maximum weichen davon etwas ab. Obwohl das VP-Verfahren eine ähnliche Anzahl Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ wie die Grundgesamtheit ausweist, beträgt hier der Anteil der deckungsgleichen Raster nur 52% .

3.2 Analyse der räumlichen Korrelation

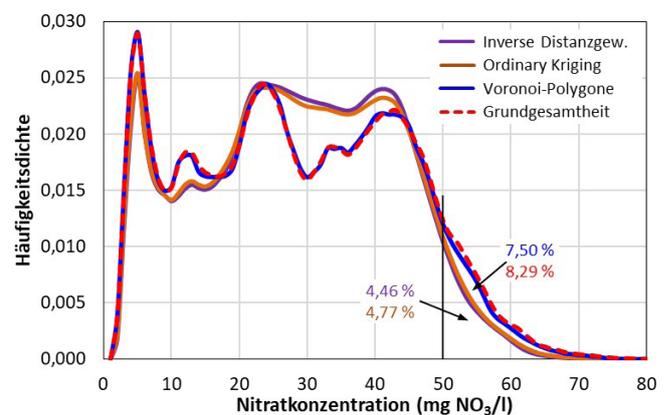


Abbildung 3 Häufigkeitsdichte der Nitratkonzentration (70.634 Raster) sowie Flächenanteile von über $50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ nach Regionalisierung mit drei Verfahren (Mittel aus 100 bzw. 30 Interpolationen) und in der Grundgesamtheit (Random-Forest-Modell).
Frequency density of nitrate concentration (70,634 grids) and area fractions $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ with regionalisation by three methods (mean of 100 or 30 interpolations) and in the population (Random Forest model).

Tabelle 1
 Statistische Maßzahlen^a der Interpolation der Nitratkonzentration im Grundwasser in Bayern (70.634 Raster) mit zufällig verteilten Stützstellen, aggregiert über die Parameterstufen^b.
Statistical measures of interpolated nitrate concentration in groundwater in Bavaria (70,634 grids) with randomly distributed sampling grids, aggregated over parameter levels.

Parameter	Wert	Anzahl	Mittel	MIN	MAX	SD	MAE	COR	Ra>50	
		Komb. (k)	mg NO ₃ /l	-	%					
Inverse Distanzgewichtung (100 Zufallsverteilungen)										
Stützstellen insgesamt (s)	1.412	16	28,51	3,2	68,5	13,52	6,60	0,814	4,28	
	3.531	16	28,50	3,1	69,3	13,80	5,93	0,847	4,54	
	7.063	16	28,50	3,1	69,8	13,96	5,40	0,872	4,50	
Einbezogene Stützstellen (n) pro Interpolation	4	12	28,50	3,0	71,6	14,19	6,01	0,839	5,23	
	8	12	28,51	3,1	69,3	13,79	5,94	0,845	4,48	
	12	12	28,51	3,2	68,3	13,60	5,96	0,847	4,14	
IDW-Exponent (p)	16	12	28,51	3,2	67,5	13,47	5,99	0,847	3,92	
	1	12	28,52	3,3	64,3	13,32	6,05	0,845	3,65	
	1,5	12	28,50	3,2	67,2	13,51	5,93	0,849	3,98	
IDW-Exponent (p)	2	12	28,51	3,1	70,1	13,74	5,88	0,849	4,39	
	4	12	28,51	3,0	75,1	14,47	6,05	0,835	5,75	
	Ordinary Kriging (100 Zufallsverteilungen)									
Stützstellen insgesamt (s)	1.412	108	28,53	2,4	70,0	13,39	6,58	0,816	4,06	
	3.531	108	28,51	1,0	73,2	13,84	5,86	0,850	4,69	
	7.063	108	28,50	-0,5	76,1	14,23	5,30	0,875	5,09	
Einbezogene Stützstellen (n) pro Interpolation	4	81	28,51	1,2	73,6	14,09	5,95	0,843	5,09	
	8	81	28,51	0,9	73,1	13,83	5,89	0,848	4,62	
	12	81	28,51	0,9	72,9	13,72	5,90	0,849	4,43	
Maximale Distanz (maxDist)	16	81	28,51	0,8	72,8	13,65	5,92	0,848	4,31	
	10 km	108	28,52	1,9	71,8	13,77	5,90	0,847	4,49	
	20 km	108	28,51	1,2	72,8	13,74	5,90	0,848	4,48	
Distanz-Intervall (width)	40 km	108	28,51	-0,2	74,7	13,94	5,94	0,845	4,88	
	200 m	108	28,51	1,0	73,0	13,81	5,92	0,847	4,60	
	500 m	108	28,51	1,0	73,1	13,82	5,91	0,847	4,61	
Funktionstyp Semivariogramm (fkt)	1.000 m	108	28,51	0,8	73,2	13,83	5,92	0,847	4,64	
	Expon.	108	28,51	3,0	70,3	13,78	5,85	0,850	4,50	
	Gauß	108	28,52	-2,3	77,0	13,78	5,98	0,845	4,56	
Voronoi (30 Zufallsverteilungen)	Sphär.	108	28,51	2,2	72,0	13,90	5,92	0,846	4,78	
	Stützstellen insgesamt (s)	1.412	1	28,55	3,0	73,8	15,60	7,69	0,748	8,22
		3.531	1	28,49	2,9	77,0	15,54	6,79	0,795	7,86
7.063		1	28,52	2,9	77,9	15,55	6,10	0,830	7,50	
Grundgesamtheit (Random-Forest-Modell)										
		---	28,49	2,7	81,1	15,53			8,29	

^a Maßzahlen: Mittel: Mittelwert; MIN: Minimum; MAX: Maximum; SD: Standardabweichung; MAE: mean absolute error; COR: Korrelationskoeffizient; Ra > 50: Anteil der Raster mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l.

^b Auswertung: Mittel, MIN, MAX, SD, MAE: gemittelt über k Parameterkombinationen x 100 [30] Interpolationen x (70.634 - s) Raster; COR, Ra > 50: gemittelt über k Parameterkombinationen x 100 [30] Interpolationen.

Deterministische und geostatistische Interpolationsverfahren basieren auf der Hypothese, dass die zu interpolierende Größe räumlich autokorreliert ist. Zur Überprüfung wurden die Differenzen der Nitratkonzentrationen und die Distanzen zwischen allen Messstellen berechnet und für die 103.531 Differenzen bis zu einer Distanz von 10 km ausgewertet. Für das Semivariogramm (Abb. 4) wurde die Werteverteilung der quadrierten Differenzen (in Abb. 4 dargestellt: 10-Perzentil, Mittelwert, 90-Perzentil) im

Distanzbereich von 0 bis 10 km mit einer Intervallbreite von 100 m ermittelt, die Anzahl der Semivarianzen in den 100 Intervallen reicht von 518 bis 1.726. Für die Semivarianzen ist eine räumliche Abhängigkeit nur bis zur Distanzklasse 0,6 bis 0,7 km zu erkennen. Für den Distanzbereich ab 1 km besteht bei der Auswertung für Bayern insgesamt keine statistisch signifikante Korrelation (für Signifikanzniveau $p \leq 0,01$) zwischen den Intervallmittelwerten der Semivarianz und der Distanz. Eine Auswertung

Tabelle 2

Anzahl an Rastern mit einer Nitratkonzentration von über 50 mg NO₃/l im Grundwasser in Bayern (70.634 Raster) insgesamt und deckungsgleich mit der Grundgesamtheit (GG) nach Interpolation mit Inverser Distanzgewichtung, Ordinary Kriging und Voronoi-Polygone (Parameter s. Text), jeweils Mittelwert und Spannweite aus 100 bzw. 30 Interpolationen mit 7.063 zufällig verteilten Stützstellen.
Number of grids with nitrate concentration above 50 mg NO₃/l in groundwater in Bavaria (70,634 grids) in total and congruent with the population (GG) interpolated by Inverse Distance Weighting, Ordinary Kriging and Voronoi polygons (parameters see text), mean and range from 100 or 30 interpolations with 7,063 randomly distributed sampling points.

Verfahren		Raster über 50 mg NO ₃ /l insgesamt		Raster über 50 mg NO ₃ /l deckungsgleich mit GG	
		Anzahl (= km ²)	Anteil Landesfläche	Anzahl	Anteil an "insgesamt"
Inverse Distanzgewichtung (100 Interpolationen)	Minimum	2.801	3,97 %	1.897	67,7 %
	Mittel	3.149	4,45 %	2.115	67,2 %
	Maximum	3.521	4,98 %	2.326	66,1 %
Ordinary Kriging (100 Interpolationen)	Minimum	2.980	4,22 %	1.932	64,8 %
	Mittel	3.369	4,77 %	2.197	65,2 %
	Maximum	3.819	5,41 %	2.409	63,1 %
Voronoi-Polygone (30 Interpolationen)	Minimum	4.892	6,93 %	2.647	54,1 %
	Mittel	5.297	7,50 %	2.766	52,2 %
	Maximum	5.661	8,01 %	2.891	51,1 %
Grundgesamtheit		5.859	8,29 %	---	---

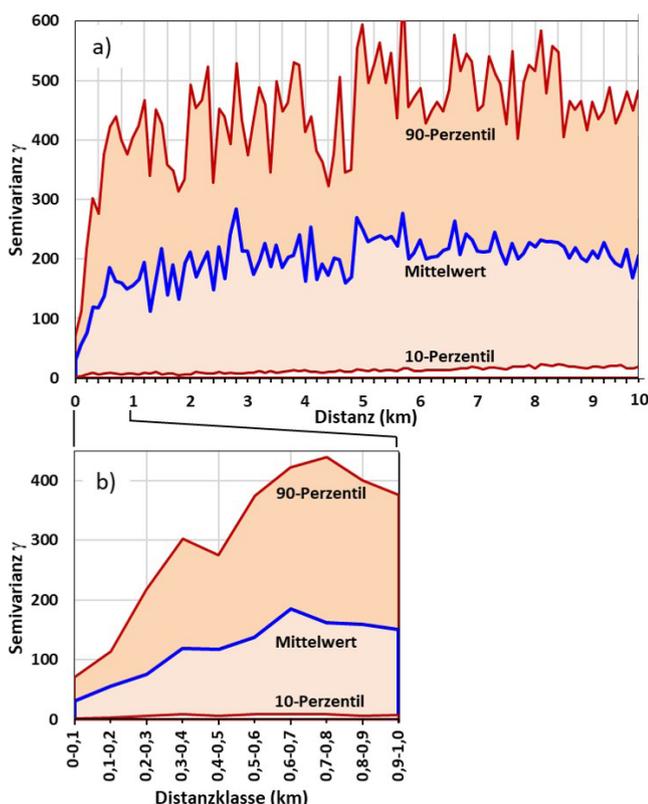


Abbildung 4

Semivariogramm $\gamma(h)$ der Nitratkonzentration der 5.790 Grundwassermessstellen in Bayern: Mittelwert, 10-Perzentil und 90-Perzentil der Semivarianzen als Funktion der Distanz der Messstellen, gemittelt für 100-m-Distanzklassen; a) von 0-0,1 bis 9,9-10,0 km; b) Ausschnitt von 0-0,1 bis 0,9-1,0 km.

Semivariogram $\gamma(h)$ of the nitrate concentration of 5,790 groundwater monitoring sites in Bavaria: mean, 10th percentile and 90th percentile of the semi-variances as function of the distance of the monitoring sites, averaged for 100 m distance classes; a) from 0-0.1 to 9.9-10.0 km; b) section from 0-0.1 to 0.9-1.0 km.

separat für die 18 HGE (hydrogeologische Einheiten) ergibt für zehn HGE keine statistisch signifikante Korrelation, für acht HGE wird ein statistisch signifikanter Korrelationskoeffizient ermittelt, wobei der Wert in den meisten Fällen $R < 0,05$ liegt, der höchste Korrelationskoeffizient erreicht $R = 0,11$. Ergänzend wurden in gleicher Weise die Absolutbeträge der Konzentrationsdifferenzen ausgewertet (Abb. S2 im Supplement). Das Gesamtmittel der Absolutbeträge (bis 10 km Distanz) beträgt 12,4 mg NO₃/l, analog zur Semivarianz ist eine räumliche Abhängigkeit der absoluten Differenzen nur bis zur Distanzklasse 0,6 bis 0,7 km zu erkennen.

3.3 Kreuzvalidierung der Messstellen

Mit einer Kreuzvalidierung (leave-one-out cross validation) wird die Vorhersagegüte der Verfahren beurteilt. Nacheinander wird jede der 5.790 Messstellen aus dem Datensatz entfernt und für diesen Punkt anschließend die Nitratkonzentration aus den Werten der benachbarten Messstellen mit den drei Verfahren mit den folgenden Parametern (Kap. 3.1) interpoliert: IDW: $n = 8$ Stützstellen, IDW-Exponent $p = 2$; OK: $n = 16$ Stützstellen, $maxDist = 10$ km, OK-Distanzintervall $width = 200$ m, exponentielles Semivariogramm. Die Mittelwerte der gemessenen und der interpolierten Konzentrationen sind annähernd identisch (Tab. 3). Die niedrigeren Maxima und die geringeren Standardabweichungen der Kreuzvalidierten Werte verdeutlichen, dass die IDW- bzw. OK-Interpolation die Konzentrationsverteilung gegenüber den Messwerten nivellieren. Der mittlere absolute Fehler beträgt jeweils rund 7 mg NO₃/l, was einem relativen Absolutfehler von rund 43 % entspricht. Die Distanzen zu den 8 (IDW) bzw. 16 (OK) Messstellen, die als Stützstellen der Interpolation dienen, betragen im Mittel 918 m für die nächstgelegene und 4.433 m (IDW) bzw. 6.892 m (OK) für die am weitesten entfernte einbezogene Stützstelle. Die Korrelationskoeffizienten zwischen Messwerten und interpolierten Nitratwerten liegen geringfügig über 0,7 entsprechend einem Bestimmtheitsmaß von rund 50 %, das heißt, IDW- und OK-Interpolation geben nur rund die Hälfte der tatsächlichen Streuung der Messwerte wieder. IDW und OK

Tabelle 3

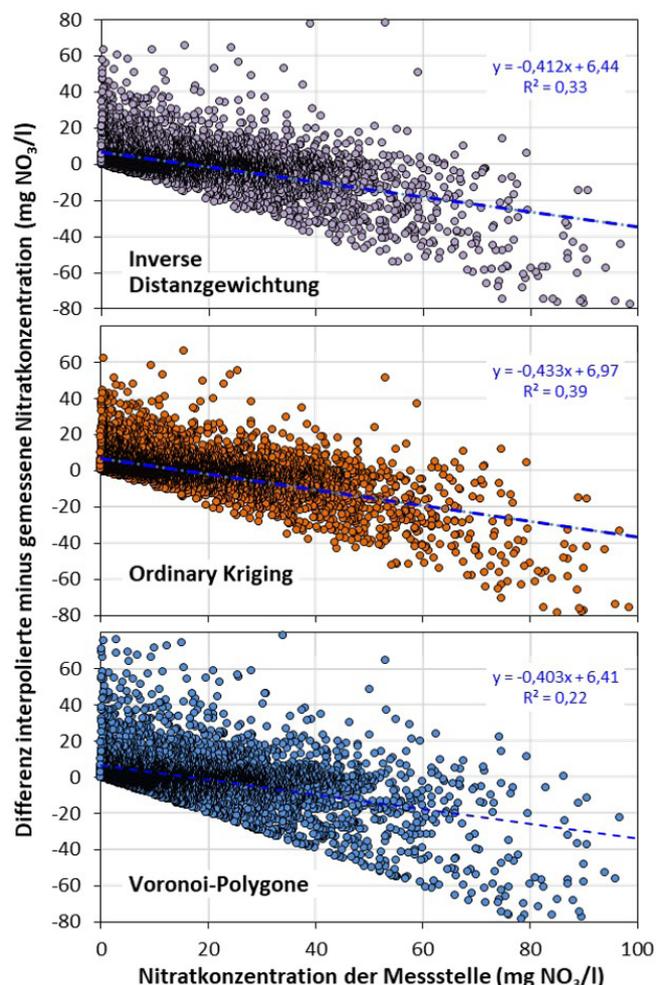
Statistische Maßzahlen der gemessenen und mit Kreuzvalidierung interpolierten Nitratkonzentrationen für die drei Verfahren Inverse Distanzgewichtung (IDW), Ordinary Kriging (OK) und Voronoi-Polygone (VP) (5.790 Grundwassermessstellen in Bayern).
Statistical measures of nitrate concentrations measured and interpolated with cross-validation for three methods Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (OK) and Voronoi polygons (VP) (5,790 groundwater monitoring sites in Bavaria).

Maßzahl	Messwerte (Ist)	Interpolationsverfahren		
		IDW	OK	VP
Mittelwert (mg NO ₃ /l)	16,62	16,22	16,36	16,24
Minimum (mg NO ₃ /l)	0,0	0,0	-0,1	0,0
Maximum (mg NO ₃ /l)	395,0	269,7	285,5	300,0
Standardabweichung (mg NO ₃ /l)	19,30	15,98	15,15	17,99
Mittlerer absoluter Fehler (mg NO ₃ /l)		7,03	6,96	7,89
Korrelation zw. Messwerten und interpolierten Werten		0,710	0,721	0,640
Messstellen über 50 mg NO ₃ /l (Anzahl)	277	154	122	222
- in % der tatsächlichen Anzahl		55,6 %	44,0 %	80,1 %
Interpolation und Messtelle übereinstimmend über 50 mg NO ₃ /l (Anzahl)		84	71	94

reduzieren die interpolierte Werteverteilung in Bezug auf die Anzahl der Messstellen mit Konzentrationen über 50 mg NO₃/l erheblich: Tatsächlich sind 277 Messstellen mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l vorhanden, mit IDW-Kreuzvalidierung vermindert sich diese Zahl auf 154 Messstellen (rund 56 % des Ausgangswertes) und mit OK auf 122 (rund 44 %). Mit VP wird mit rund 7,9 mg NO₃/l ein etwas höherer MAE und mit 0,64 eine geringere Korrelation zwischen gemessenen und interpolierten Werten ermittelt. Die Anzahl der interpolierten Konzentrationen von über 50 mg NO₃/l steigt mit VP auf 222, was 80 % des Ist-Wertes entspricht. Für alle drei Verfahren ist jedoch festzustellen, dass nur ein Teil der Messstellen, für die mittels Kreuzvalidierung eine Konzentration von über 50 mg NO₃/l ermittelt wird, auch mit ihrem tatsächlichen Wert in diese Klasse fallen, das heißt, nach Messung und Interpolation übereinstimmend als > 50 mg NO₃/l eingestuft werden. Mit VP entsprechen von den 222 interpolierten Werten > 50 mg NO₃/l nur 94 Messstellen (rund 42 %) einem Messwert > 50 mg NO₃/l. Die übrigen 58 % werden als "belastet" ausgewiesen, obwohl die Messstellen tatsächlich eine niedrigere Konzentration aufweisen. Für IDW und OK sind die Anteile nicht übereinstimmender Messstellen mit 45 % und 42 % etwas geringer.

Die Differenzen zwischen Messwert und interpolierter Nitratkonzentration zeigen für alle drei Verfahren eine lineare Abhängigkeit von der gemessenen Konzentration (Abb. 5), die interpolierte Konzentration wird im Bereich oberhalb von rund 16 mg NO₃/l systematisch unterschätzt. Für die 277 Messstellen über 50 mg NO₃/l wird die Konzentration bei einer Kreuzvalidierung im Durchschnitt um 28,6 (IDW), 29,3 (OK) bzw. 27,9 mg NO₃/l (VP) zu niedrig interpoliert, was mittleren relativen Fehlern von rund 39 % (IDW), 40 % (OK) bzw. 38 % (VP) entspricht. Für IDW besteht kein Zusammenhang zwischen den Konzentrationsdifferenzen und der Summe der IDW-Gewichte λ_i (Gl. 2), das heißt, der absolute Fehler der IDW-Interpolation ist unabhängig von der Distanz der acht Stützstellen zur interpolierten Messstelle.

Die Kreuzvalidierung wurde außerdem separat für die 18 HGE durchgeführt, das heißt, für die Interpolation wurden jeweils nur Stützstellen innerhalb der gleichen HGE herangezogen, um die Heterogenität der Verfahren bei Anwendung in den einzel-

**Abbildung 5**

Differenz zwischen mittels Kreuzvalidierung interpolierten und gemessenen Nitratkonzentrationen an 5.790 Messstellen in Bayern als Funktion des Messwerts (Werte für $x > 100$, $y < -80$ oder $y > 80$ nicht dargestellt).

Difference between nitrate concentrations interpolated by cross-validation and measured in 5,790 monitoring sites in Bavaria as a function of measured concentration (values for $x > 100$, $y < -80$ or $y > 80$ not shown).

Tabelle 4

Maßzahlen der interpolierten Nitratkonzentration, der Anzahl Raster (1 km x 1 km) mit Konzentration über 50 mg NO₃/l im Grundwasser in Bayern (70.634 Raster) und der Landwirtschaftsfläche (LF) in diesen Rastern nach drei Regionalisierungsverfahren (Basis: 5.790 Messstellen), ohne (Bayern insgesamt) und mit Berücksichtigung der Grenzen der hydrogeologischen Einheiten (HGE separat).

Measures of the interpolated nitrate concentration, number of grids (1 km x 1 km) with concentrations above 50 mg NO₃/l in groundwater in Bavaria (70,634 grids) and agriculturally used area (LF) in these grids according to three regionalisation methods (database: 5,790 monitoring sites), without (Bavaria as a whole) and with consideration of the boundaries of the hydrogeological units (HGE separately).

Maßzahl	Inverse Distanzgewichtung		Ordinary Kriging		Voronoi-Polygone	
	Bayern insgesamt	HGE separat	Bayern insgesamt	HGE separat	Bayern insgesamt	HGE separat
Mittelwert (mg NO ₃ /l)	19,93	20,58	20,12	20,70	20,65	21,16
Minimum (mg NO ₃ /l)	0,0	0,0	0,1	-3,4	0,0	0,0
Maximum (mg NO ₃ /l)	270,1	270,1	274,2	317,2	395,0	395,0
Standardabweichung (mg NO ₃ /l)	14,57	15,71	13,48	15,65	21,22	21,71
Anzahl Raster > 50 mg NO ₃ /l in Bayern (= Flächen in km ²)	2.165	3.071	1.569	2.897	6.234	6.897
- Anteil der Landesfläche in Bayern	3,07 %	4,35 %	2,22 %	4,10 %	8,83 %	9,76 %
Landwirtschaftsfläche (km ²) in den Rastern > 50 mg NO ₃ /l	1.444	2.068	1.070	1.940	3.927	4.367
- Anteil an der Landesfläche in Bayern	4,15 %	5,94 %	3,07 %	5,57 %	11,28 %	12,54 %

nen hydrogeologischen Regionen zu erfassen. Die Ergebnisse zeigen eine sehr große Spannweite der Güte von HGE-spezifischen Interpolationen (Tab. S1 im Supplement), der mittlere absolute Fehler reicht von rund 1 mg NO₃/l in der HGE Alpen (alle Verfahren) bis zu 21,7 (IDW), 23,3 (OK) bzw. 23,9 mg NO₃/l (VP) in der HGE Nördlinger Ries. Zwischen der Messstellendichte und dem mittleren absoluten Fehler besteht dabei kein statistischer Zusammenhang. Die Anzahl der Messstellen, für die eine Konzentration von über 50 mg NO₃/l interpoliert wird, erhöht sich bei HGE-separater Kreuzvalidierung geringfügig auf 171 (IDW), 137 (OK) und 230 (VP).

3.4 Flächendeckende Interpolation

Im Rahmen der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten (AVV GeA) werden die Regionalisierungsverfahren dazu herangezogen, die Gebiete mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l im Grundwasser für ein Bundesland auszuweisen. Ausgehend von den 5.790 Messstellen wurden dafür mit IDW, OK und VP die Nitratkonzentrationen für das 1 km x 1 km große Raster interpoliert, zum einen für Bayern als Ganzes und zum anderen separat für die HGE, das heißt, es wurden nur die Messstellen innerhalb der gleichen HGE als Stützstellen der Interpolation verwendet. Die Interpolationen mit IDW und OK zeigen in Bezug auf die statistischen Maßzahlen ähnliche Ergebnisse (Tab. 4). Mit IDW wird für Bayern insgesamt mit 2.165 km² fast 600 km² mehr Fläche über 50 mg NO₃/l ermittelt als mit OK. Die Interpolation separat für HGE führt tendenziell zu einer stärkeren Streuung der Nitratkonzentrationen, zu einer größeren Anzahl an Rastern > 50 mg NO₃/l und zu einem höheren Anteil an "betroffener" Landwirtschaftsfläche gegenüber einer Interpolation ohne Berücksichtigung der HGE-Grenzen (Bayern insgesamt). Im Vergleich zu IDW und OK weisen VP mit 6.234 km² eine wesentlich größere Fläche über 50 mg NO₃/l aus und infolgedessen auch eine deutlich größere "betroffene" Landwirtschaftsfläche. Mit VP (für HGE separat) wird gegenüber der Variante IDW (Bayern insgesamt) mehr als die dreifache Landwirtschaftsfläche in Rastern > 50 mg NO₃/l interpoliert.

Die Regionalisierung für Bayern wurde für ein 1 km x 1 km großes Raster durchgeführt. Um den Einfluss der Rastergröße zu untersuchen, wurde exemplarisch die Nitratkonzentration mit IDW auch für ein 100 m x 100 m großes Raster interpoliert. Die Ergebnisse sind nahezu identisch, der Mittelwert beträgt 19,94 mg NO₃/l, die Standardabweichung 14,57 mg NO₃/l und der Anteil der Landesfläche mit einer Nitratkonzentration von über 50 mg NO₃/l bleibt mit 3,1 % nahezu unverändert (Tab. 4).

Abbildung 6 zeigt die Karten der Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser in Bayern (in fünf Klassen) nach den drei Verfahren. Das großräumige Verteilungsmuster ist mit IDW und OK für die beiden Varianten – Bayern insgesamt und HGE separat – relativ ähnlich, mit Berücksichtigung der HGE ist die Interpolation durch ausgeprägte Konzentrations sprünge an vielen HGE-Grenzen gekennzeichnet. Mit VP wird gegenüber IDW und OK um mehr als das Doppelte an Fläche in der Klasse > 50 mg NO₃/l ermittelt. Jede der 277 Messstellen mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l bildet hierbei das Zentrum eines Voronoi-Polygons dieser Konzentrationsklasse, die mittlere Größe dieser Polygone beträgt rund 25 km² (Variante HGE separat).

Mit Blick auf die AVV GeA ist weiterhin von Interesse, inwieweit die drei Verfahren zu übereinstimmenden Ergebnissen führen. Die Korrelationen der Nitratkonzentration zwischen IDW und OK betragen für beide Varianten (Bayern gesamt und HGE separat) rund 0,9. Die Koeffizienten zwischen VP und den beiden anderen Verfahren sind mit 0,711 bis 0,848 durchweg geringer (Tab. 5). Die Anzahl deckungsgleicher Raster > 50 mg NO₃/l verdeutlicht die Lagediskrepanzen, die bei der Anwendung unterschiedlicher Verfahren auftreten. Von den Rastern > 50 mg NO₃/l, die mit den drei Verfahren jeweils für Bayern insgesamt interpoliert werden, sind mit IDW und OK nur rund 94 % und mit VP nur 91 % auch deckungsgleich mit den entsprechenden Rastern der Interpolation für HGE separat, für die übrigen Raster wird eine Konzentration von ≤ 50 mg NO₃/l ausgewiesen. Noch geringer fallen die Kongruenzen zwischen den Verfahren aus: nach IDW- und OK-Interpolation sind für Bayern gesamt 1.060 Raster > 50 mg NO₃/l

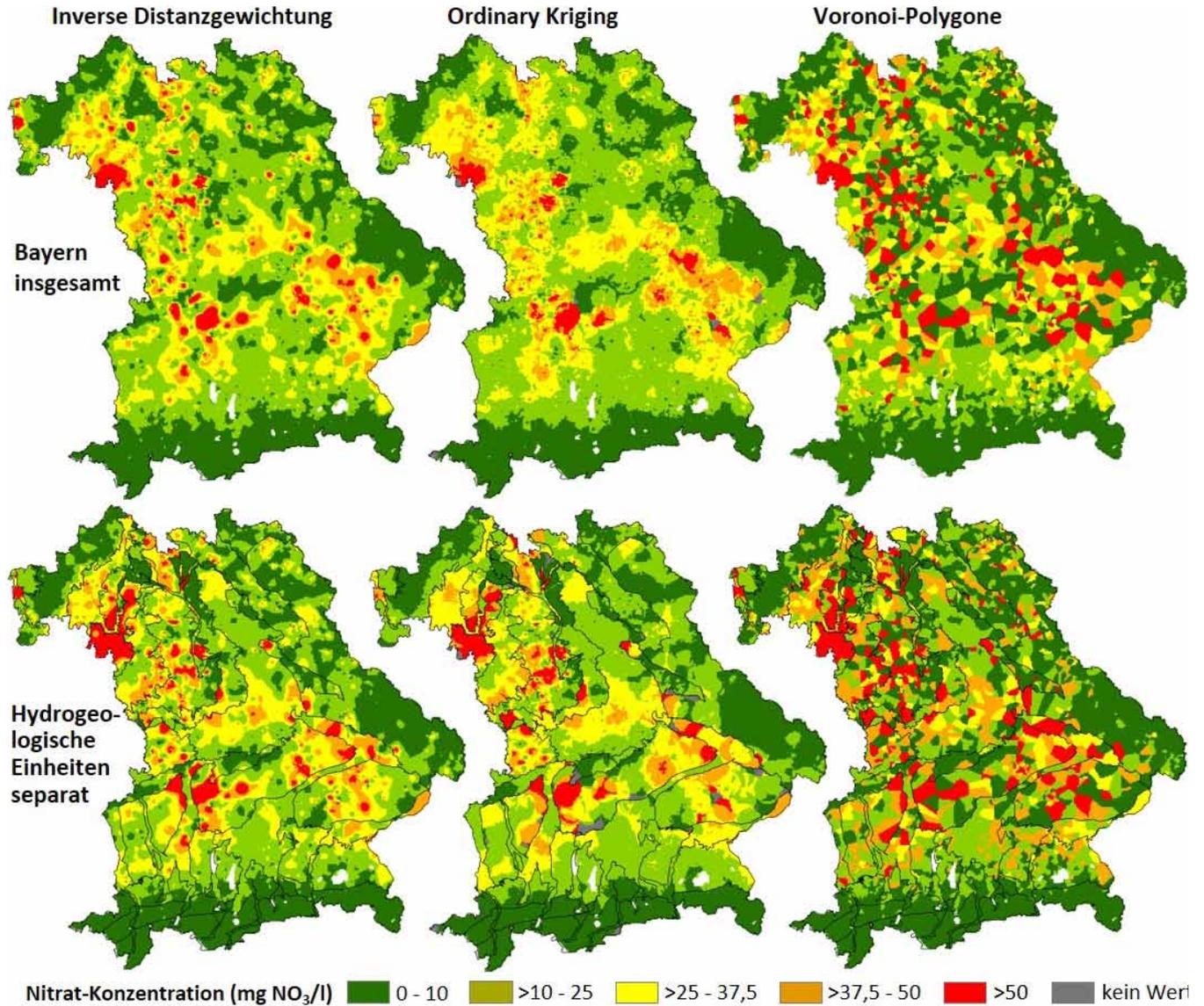


Abbildung 6
 Räumliche Verteilung der Nitratkonzentration (5 Klassen) im Grundwasser in Bayern (70.634 Raster, 1 km x 1 km) nach drei Regionalisierungsverfahren (Basis: 5.790 Messstellen), ohne (Bayern insgesamt) und mit Berücksichtigung der HGE-Grenzen (Hydrogeologische Einheiten separat).
 Spatial distribution of nitrate concentrations (5 classes) in groundwater in Bavaria (70,634 grids 1 km x 1 km) according to three regionalisation methods (database: 5,790 monitoring sites), without (Bavaria as a whole) and with consideration of the HGE boundaries (hydrogeological units separately).

Tabelle 5
 Anzahl übereinstimmender Raster > 50 mg NO₃/l (oberer Teil der Matrix) und Korrelationskoeffizienten der Konzentrationen (unterer Teil) nach Interpolation für Bayern (70.634 Raster, 1 km x 1 km) mit Inverser Distanzgewichtung (IDW), Ordinary Kriging (OK) und Voronoi-Polygonen (VP), ohne (Bayern insgesamt) und mit Berücksichtigung der Grenzen der hydrogeologischen Einheiten (HGE separat).
 Number of matching grids > 50 mg NO₃/l (upper part of the matrix) and correlation coefficients of the concentrations (lower part) after interpolation for Bavaria (70,634 grids, 1 km x 1 km) with Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (OK) and Voronoi polygons (VP), without (Bavaria total) and with consideration of the boundaries of the hydrogeological units (HGE separately).

Verfahren		IDW		OK		VP	
		Bayern insgesamt	HGE separat	Bayern insgesamt	HGE separat	Bayern insgesamt	HGE separat
IDW	Bayern insgesamt		2.048	1.060	1.236	1.993	1.938
	HGE separat	0,923		1.094	1.920	2.389	2.784
OK	Bayern insgesamt	0,903	0,857		1.278	1.249	1.240
	HGE separat	0,812	0,895	0,879		1.836	2.360
VP	Bayern insgesamt	0,831	0,775	0,723	0,668		5.649
	HGE separat	0,786	0,848	0,711	0,760	0,879	

deckungsgleich, bezogen auf die 1.569 Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ nach OK entspricht das nur 68 %. Die Schnittmenge aus allen drei Verfahren und jeweils zwei Varianten umfasst sogar nur 831 Raster $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$.

4 Diskussion und Fazit

Der vorliegende Beitrag untersucht die Güte bzw. die Unsicherheiten einer Regionalisierung der Nitratkonzentration im Grundwasser. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, ob bzw. inwieweit die Verfahren IDW, OK und VP geeignet sind, den Flächenumfang und die Lage von "belasteten" Grundwasserarealen zutreffend zu ermitteln. Die Variation der Verfahrensparameter verdeutlicht, dass die Variabilität der interpolierten Nitratkonzentrationen am stärksten von der Position der Stützstellen beeinflusst wird. Eine unterschiedliche Parametrisierung von IDW und OK wirkt sich dagegen (in den hier untersuchten Spannbreiten der Parameter) auf das Ergebnis nur vergleichsweise gering aus. Die Prämisse einer Interpolation mit IDW und OK, dass die Nitratkonzentration an dem zu interpolierenden Punkt den Werten der einbezogenen Messstellen umso ähnlicher ist, je näher die Punkte zueinander liegen, ist für die hier ausgewerteten Messstellen bestenfalls bis zu einer Reichweite von etwa 0,7 km erfüllt. Über diesen Abstand hinaus besteht keine räumliche Korrelation der Messwerte und somit auch nicht für die interpolierten Werte. An das Semivariogramm kann keine Funktion angepasst werden, deren Steigung im Range-Bereich signifikant von Null abweicht, was beispielsweise auch WRIEDT et al. (2019) bei der Regionalisierung der Nitratkonzentration in den norddeutschen Lockergesteinsgebieten mittels OK festgestellt haben. Die Autoren vermuten, dass diese Feststellung für die Grundwassermessnetze in allen Bundesländern gilt. Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten AVV GeA (2022) setzt für die Anwendung eines geostatistischen Verfahrens voraus, dass ein flächendeckender Mess-Datensatz vorliegt. Mit einer räumlichen Korrelation von Konzentrationswerten im Grundwasser bis zu etwa 0,7 km liegt die Flächenrepräsentativität einer Messstelle in der Größenordnung von rund 2 km². Interpretiert man die Voraussetzung der AVV GeA dahingehend, dass der Mess-Datensatz flächendeckend repräsentativ sein muss, dann würde das allein für die rund 168.000 km² Landwirtschaftsfläche in Deutschland eine Messstellenanzahl in der Größenordnung von mehreren Zehntausend erfordern, für Bayern ergäbe sich ein Bedarf von mindestens 15.000 zusätzlichen Messstellen. Die AVV GeA (2022) lässt die Frage offen, wie zu verfahren ist, wenn die Plausibilität für die Anwendung eines geostatistischen Verfahrens nicht gegeben ist.

Die Kreuzvalidierung der Messstellen zeigt einen MAE zwischen gemessener und interpolierter Konzentration von rund 7,0 mg NO₃/l für IDW und OK sowie von 7,9 mg NO₃/l für VP, die Unsicherheit der Interpolationsverfahren über den gesamten Schätzbereich ist damit auf rund 43 % bzw. 49 % zu beziffern. Im Bereich oberhalb des Mittelwerts werden die interpolierten Konzentrationen von allen drei Verfahren bei der Kreuzvalidierung systematisch unterschätzt. Die Unterschätzung wächst mit zunehmender Konzentration und erreicht im "kritischen" Konzentrationsbereich über 50 mg NO₃/l, im Mittel 28 bis 29 mg NO₃/l. Infolgedessen wird auch die Zahl der Messstellen mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l zu gering geschätzt, die Interpolation mit IDW vermindert den wahren Wert von 277 auf 154 und mit OK sogar auf nur 122 Messstellen (Variante Bayern

insgesamt). Diese interpolierten Messstellen $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ sind zudem nur zum Teil identisch mit den Messstellen, die auch tatsächlich über dem Grenzwert liegen. Bei der Kreuzvalidierung werden mit IDW rund 45 % und mit OK rund 42 % Messstellen als nitratbelastet interpoliert, die dies eigentlich nicht sind, das heißt, sie werden als "falsch positiv" eingestuft. Noch stärker ausgeprägt zeigt sich dieser Effekt für VP: Die Anzahl der interpolierten Werte $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$ liegt zwar mit 222 in der Größenordnung der 277 Messwerte, von diesen 222 sind aber 128 (rund 58 %) Messstellen, deren tatsächliche Konzentration weniger als 50 mg NO₃/l beträgt. Umgekehrt wird für fast zwei Drittel der Messstellen, die tatsächlich mehr als 50 mg NO₃/l aufweisen, mit VP eine "unkritische" Konzentration interpoliert.

Auch bei der flächendeckenden Interpolation mit den drei Verfahren (mit jeweils zwei Varianten: Bayern gesamt und HGE separat; Abb. 6) zeigt sich ein sehr heterogenes Bild bezüglich der Flächenanteile und der räumlichen Verteilungsmuster der Grundwasserareale $> 50 \text{ mg NO}_3/\text{l}$. Je nach Verfahren bzw. Variante werden dafür in Bayern zwischen rund 3 % und fast 10 % der Landesfläche als belastet identifiziert. Für die Landwirtschaftsflächen, die als "rote Gebiete" ausgewiesen werden, reicht die Spanne sogar von rund 3 % bis über 12 % (Tab. 4). An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse in Bezug auf die Unterschätzung des tatsächlichen Flächenanteils mit einer Konzentration von über 50 mg NO₃/l nicht eins-zu-eins übertragbar sind auf die Abgrenzung von "roten Gebieten" in Bayern, da die durchgeführte flächendeckende Interpolation im Abschnitt 3.4 mit dem Vorgehen der bayerischen Landesverwaltung nur bedingt vergleichbar ist.

Aus der Perspektive eines Landwirtschaftsbetriebs, dessen Fläche bei Anwendung des einen Verfahrens möglicherweise in die Gebietskulisse mit Düngungsbeschränkungen fällt, mit einem anderen Verfahren davon aber nicht betroffen wäre, erscheint das Ergebnis der Ausweisung der "roten Gebiete" daher mit einer gewissen Willkür behaftet. Diejenigen Bundesländer, die in der Vergangenheit bei der Umsetzung der AVV GeA ein deterministisches oder geostatistisches Verfahren verwendet haben, haben (bis auf eine Ausnahme) keine Begründung für die Wahl ihres Verfahrens und dessen jeweilige Parametrisierung gegeben (zumindest nicht öffentlich einsehbar). Nur Mecklenburg-Vorpommern hat seine Entscheidung für das VP-Verfahren auf Basis eines Fachgutachtens (LNUG, 2021) getroffen. Von einem bundeseinheitlichen Vorgehen sind die Bundesländer derzeit (Stand September 2022) offensichtlich weit entfernt. Als weitere Kritikpunkte sind anzuführen, dass in der AVV GeA keine Ausführungen dazu gemacht werden, wie die Messstellen mit einer Konzentration von über 37,5 mg NO₃/l und mit steigendem Trend in die Interpolation eingeführt werden. Ein kategoriales Merkmal wie "steigender Trend" kann mit IDW und OK nicht interpoliert werden. Außerdem fehlen Vorgaben zur Größe bzw. zum Zuschnitt der räumlichen Einheiten, für welche die Interpolation und anschließend die Abgrenzung vorgenommen wird (Feldschläge, Rasterzellen, andere Abgrenzungen?). Auch diese Faktoren beeinflussen das Ergebnis der Gebietsausweisung und wirken sich unmittelbar auf die Betroffenheit der Landwirtschaft aus.

Als Fazit ist aus Sicht der Autoren festzuhalten, dass – in Anbetracht der systematischen Unterschätzung von Arealen mit höheren Nitratkonzentrationen sowie der unzureichenden Lageübereinstimmung zwischen gemessenen und interpolierten

Werten über 50 mg NO₃/l – die drei untersuchten Verfahren für eine statistisch belastbare und problemadäquate Abgrenzung von mit Nitrat belasteten Gebieten nicht geeignet sind. Die Autoren können gegenwärtig allerdings auch keine leistungsfähigere Alternative anbieten. Dies erfordert weitere Untersuchungen, mit welcher Methodik Nitratmesswerte im Grundwasser bestmöglich regionalisiert werden können. Im Rahmen der momentan (Stand September 2022) laufenden Ausweisung von "roten Gebieten" sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass die aktuell abzugrenzenden "roten Gebiete" nur ein Zwischenergebnis darstellen. Zum einen werden bei der in fünf Jahren anstehenden Evaluierung der AVV GeA die derzeit angewendeten Regionalisierungsverfahren gegebenenfalls durch eine andere Methodik abgelöst. Zum anderen müssen spätestens ab dem Jahr 2026 bei der immissionsbasierten Abgrenzung erstmals "denitrifizierende Verhältnisse" im Grundwasser berücksichtigt werden. Beide Faktoren zusammen werden wahrscheinlich eine deutliche Ausweitung und einen erheblich veränderten Zuschnitt der "roten Gebiete" zur Folge haben. Dies sollte nach Meinung der Autoren frühzeitig und offen angesprochen werden, nicht zuletzt, um die Akzeptanz der Landwirtschaft gegenüber der Ausweisung von "roten Gebieten" nicht noch weiter zu beeinträchtigen.

Discussion and Conclusions

Our study examines the accuracy of regionalisation methods for nitrate concentrations in groundwater of Bavaria, Germany. We focus on the suitability of Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (OK) and Voronoi (VP) polygons for accurately determining the area and the location of "polluted" groundwater areas (i.e., nitrate concentrations > 50 mg NO₃/l). The IDW and OK interpolation methods are based on the premise that the closer two points are to each other, the more similar the nitrate concentration at the point to be interpolated is to the values of the measured points included. However, this premise is fulfilled for the measuring sites evaluated here in the best case only up to a range of about 0.7 km (Fig. 4). Beyond this distance, there is no spatial correlation of nitrate values between measuring sites and thus also not for interpolated points. No function can be fitted to the semivariogram, whose slope differs significantly from zero within the range. We assume that this finding holds for the groundwater monitoring networks in all federal states in Germany.

With a spatial correlation of concentration values up to about 0.7 km, the spatial representativeness of a monitoring site is about 2 km². The AVV GeA (2022) presupposes for the application of a geostatistical method that an area-wide measurement data set is available. If one interprets this prerequisite that the measurement data set must be representative of the entire area, then a number of measurement points in the order of several tens of thousands for the 168,000 km² of agricultural land in Germany alone is required; the federal state Bavaria would need at least 15,000 additional measuring stations. The AVV GeA (2022) does not tackle the question of how to proceed if the plausibility for the application of a geostatistical method is not given.

The cross-validation of the 5,790 monitoring sites shows a mean absolute error between measured and interpolated concentration of about 7.0 mg NO₃/l for IDW and OK and of 7.9 mg NO₃/l for VP. The uncertainty of the interpolation methods over the entire prediction range can thus be estimated to be around 43% and

49%, respectively (Tab. 3). In the range above 16 mg NO₃/l, the interpolated concentrations are systematically underestimated by all three methods in the cross-validation. The underestimation increases with increasing concentration and reaches an average of approx. 28 to 29 mg NO₃/l in the "critical" concentration range above 50 mg NO₃/l (Fig. 5). As a result, the number of 277 monitoring sites with a concentration > 50 mg NO₃/l is reduced to 154 after interpolation with IDW and to 122 with OK. Moreover, the interpolated monitoring sites > 50 mg NO₃/l are only partly identical with the sites that are actually above 50 mg NO₃/l; with cross-validation, IDW interpolates 70 (approx. 45%) and OK 51 (approx. 42%) monitoring sites as nitrate polluted which are actually not. This effect is even more pronounced for the VP method: the number of interpolated values > 50 mg NO₃/l is 222, which is more in the order of magnitude of the 277 measured values, but 128 (about 58%) of these are measuring points whose actual concentration is less than 50 mg NO₃/l. Conversely, a "non-critical" concentration is interpolated with VP for 183 of 277 monitoring sites (66%) that actually exceed 50 mg NO₃/l.

The state-wide interpolation with the three methods also shows a very heterogeneous picture with regard to the area shares and the spatial patterns of the groundwater areas > 50 mg NO₃/l (Fig. 6). Depending on the method, between about 3% and almost 10% of the land area of Bavaria is interpolated above 50 mg NO₃/l. For the used agricultural area designated as "red zones", this ranges from around 3% to more than 12% (Tab. 4). (Note: our results are not one-to-one comparable to the delineation of "red zones" in Bavaria with regard to the underestimation of the actual share of land > 50 mg NO₃/L, as the methodology used here is only partly comparable with the approach of the Bavarian state administration). From the perspective of a farmer, whose farmland might fall into the zone with fertiliser restrictions if one of the methods is applied, but would not be affected by it with another method, the choice of the regionalisation procedure is of outstanding importance. However, those federal states that applied a deterministic or geostatistical approach when implementing the AVV GeA have (with one exception) not provided any justification for the choice of their method and its parameterisation (at least not documented to the public). Only Mecklenburg-Western Pomerania based its decision for the VP method on an expert report (LNUG, 2021). At present, the federal states are obviously far away from a nationally consistent method, as demanded by the European Commission. Further points of criticism are that the AVV GeA does not specify how monitoring sites with a concentration above 37.5 mg NO₃/l and increasing trend are to be introduced into the method (a categorical item such as "increasing trend" cannot be interpolated with IDW and OK). In addition, specifications are lacking on the size or the shape of the spatial units for which the interpolation and subsequently the delineation is carried out (field plots, grid cells, other units?). All of these factors affect the results of the delineation of nitrate vulnerable zones and have a direct impact on the extent to which agriculture is affected.

We conclude that – in view of the systematic underestimation of higher nitrate concentrations and the poor congruence of measured and interpolated values above 50 mg NO₃/l – the methods are not suitable for an adequate and polluter-addressed delineation of nitrate vulnerable zones. However, the authors cannot currently offer a more efficient alternative. This requires further research on which is the best methodology for regionalising of ni-

trate concentration in groundwater. In the context of the currently ongoing delineation of "red zones", however, we are convinced that it should be pointed out that the "red zones" currently to be delineated represent only an interim situation. On the one hand, when the AVV GeA is evaluated in five years' time, the currently applied regionalisation procedures may be replaced by a different methodology. Secondly, from 2026 at the latest, "denitrifying conditions" in groundwater must be taken into account for the first time in immission-based delineation. Both factors together are likely to result in a significant expansion and a substantially changed location of the "red zones". In the authors' opinion, this should be addressed early and openly, not least in order not to further impair the acceptance of farmers towards the delineation of "red zones".

Datenverfügbarkeit

Die Nitratkonzentrationswerte der 7.735 Messstellen stehen im Datenrepositorium des Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zur Verfügung unter <https://doi.org/10.5880/figeo.2022.033>. Die im Rahmen der Studie erzeugten Datensätze können auf ordnungsgemäße Anfrage von den Verfassern erhalten werden, soweit die Daten öffentlich verfügbar gemacht werden dürfen.

Danksagung

Dem Bayerischen Landesamt für Umwelt ist für die Bereitstellung der Datensätze und die kooperative Unterstützung zu danken. Die Untersuchung wurde teilweise vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (Az. 91-0270-93178/2021) und dem Umweltbundesamt (FKZ 3718 72 2180) gefördert.

Supplementband

Ergänzende Information können online abgerufen werden unter <http://dx.doi.org/10.22029/jlpub-7722>.

Anschriften der Verfasser

Paul L. Ohlert
Dr. Martin Bach
Prof. Dr. Lutz Breuer
Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement
Heinrich-Buff-Ring 26
35392 Gießen
paul.l.ohlert@en.uni-giessen.de
martin.bach@umwelt.uni-giessen.de
lutz.breuer@umwelt.uni-giessen.de

Literaturverzeichnis

- AVV GeA (2022): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten. Neufassung, Bundesratsbeschluss vom 8. Juli 2022, Bundesrat Drucksache 275/22.
- AURENHAMMER, F. & R. KLEIN (2000): Voronoi Diagrams. In: J.R. SACH & J. URRUTIA (ed.), Handbook of computational geometry, Chapter 5. Elsevier, 201-283.
- BABAK, O. & C.V. DEUTSCH (2009). Statistical approach to inverse distance interpolation. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 23, 543–553. DOI: 10.1007/s00477-008-0226-6.
- BACH, M., L. KNOLL, U. HÄUBERMANN & L. BREUER (2020): Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland – Ist das Messnetz schuld? *WasserWirtschaft* 06/2020, 12-17.
- BKG (2018): Geographische Gitter für Deutschland – GeoGitter. Bundesamt f. Kartographie und Geodäsie (BKG).

- BKG (2019): Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland – LBM-DE2018. Dokumentation. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).
- BLÖSCHL, G. (2006): Geostatistische Methoden bei der hydrogeologischen Regionalisierung. *Wiener Mitteilungen* Band 197, 21-39.
- CHARIZOPOULOS, N., E. ZAGANA & A. PSILOVIKOS (2018): Assessment of natural and anthropogenic impacts in groundwater, utilizing multivariate statistical analysis and inverse distance weighted interpolation modeling: the case of a Scopia basin (Central Greece). *Environmental Earth Sciences* 77:380, 18 pp. DOI: 10.1007/s12665-018-7564-6.
- ELUMALAI, V., K. BRINDHA, B. SITHOEL & E. LAKSHMANAN (2017): Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 11601–11617. DOI: 10.1007/s11356-017-8681-6.
- HINTERDING, A., A. MÜLLER, N. GERLACH & F. GABEL (2003): Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug. Abschlussbericht. Bundesländer-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).
- KNOLL, L., L. BREUER & M. BACH (2020): Nation-wide estimation of groundwater redox conditions and nitrate concentrations through machine learning. *Environ. Res. Lett.* 15, 064004. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7d5c.
- LI, J. & A.D. HEAP (2008): A Review of Spatial Interpolation Methods for Environment Scientists. *Geoscience Australia Record* 2008/23, Canberra, 137 pp.
- LFU (2009): Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500 000 (HK500). Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU).
- LFU (2021): Abgrenzung der Grundwasserkörper in Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU) (unpublished).
- LNUG (2021): Identifizierung eines Regionalisierungsverfahrens zur Bewertung des chemischen Zustands von Grundwasserkörpern nach Grundwasserverordnung (GrwV) und Anwendung des Verfahrens in M-V. Abschlussbericht. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LNUG) Mecklenburg-Vorpommern.
- MUELLER, T.G., N.B. PUSULURI, K.K. MATHIAS, et al. (2004): Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 2042-2047. DOI: 10.2136/sssaj2004.2042.
- MUKHERJEE, I. & U.K. SINGH (2021): Characterization of groundwater nitrate exposure using Monte Carlo and Sobol sensitivity approaches in the diverse aquifer systems of an agricultural semiarid region of Lower Ganga Basin, India. *Sci. Total Environ.* 787, 147657. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147657.
- OHLERT, P.L., M. BACH & L. BREUER (2022): Accuracy assessment of Inverse Distance Weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany). *Environ. Sci. Poll. Res.* DOI: 10.1007/s11356-022-22670-0.
- OHMER, M., T. LIESCH, N. GOEPPERT & N. GOLDSCHIEDER (2017): On the optimal selection of interpolation methods for groundwater contouring: An example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer exchange. *Adv. Water Res.* 109, 121–132. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.08.016.
- TABANDEH, S.M., M. KHOLGHI & S.A. HOSSEINI (2021): Groundwater quality assessment in two shallow aquifers with different hydrogeological characteristics (case study: Lenjanat and Babol-Amol aquifers in Iran). *Environ. Earth Sci.* 80, 427. DOI: 10.1007/s12665-021-09690-8.
- WRIEDT, G., D. DE VRIES, T. EDEN & C. FEDEROLF (2019): Regionalisierte Darstellung der Nitratbelastung im Grundwasser Niedersachsens. *Grundwasser – Z. Fachsektion Hydrogeologie*. DOI: 10.1007/s00767-019-00415-0.

- VAROUCHAKIS, E.A. & D.T. HRISTOPULOS (2013): Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. *Environ. Monit. Assess.* 185(1), 1-19. DOI: 10.1007/s10661-012-2527-y.
- XIE, Y., T.B. CHEN, M. LEI, J. YANG, Q.J. GUO, B. SONG & X.Y. ZHOU (2011): Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere* 82(3), 468-476. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.053.
- ZIMMERMAN, D., C. PAVLIK, A. RUGGLES & M.P. ARMSTRONG (1999): An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Math. Geol.* 31(4), 375-390. DOI: 10.1023/A:1007586507433.
- ZIRAKBASH, T., R. ADMIRAAL, A. BORONINA, M. ANDA & P.A. BAHRI (2020): Assessing Interpolation Methods for Accuracy of Design Groundwater Levels for Civil Projects. *J. Hydrol. Eng.* 25(9), 04020042. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001982.

Aktuelles

Globale Netzwerkinitiative zur Erforschung von Trockengebieten

Forschende der Universität Potsdam haben zu einer weltweiten Studie beigetragen, die Ökosystemleistungen in Trockengebieten bewertet. Das internationale Team unter der Leitung der Universität Alicante in Spanien fand heraus, dass Beweidung die Ökosystemleistungen in wärmeren Trockengebieten meist negativ beeinflusst, während sie sich in kälteren und artenreichen Gebieten positiv auswirkt.

Trockengebiete beherbergen Arten und menschliche Gesellschaften, die einzigartige Strategien entwickelt haben, um mit der hohen klimatischen Variabilität zurechtzukommen, die diese Ökosysteme charakterisieren. Gleichzeitig sind Trockengebiete die Lebensgrundlage von ca. 1 Mrd. Menschen, die für ihren Lebensunterhalt auf die Beweidung durch Nutztiere angewiesen sind. In diesen gefährdeten Ökosystemen sind die Auswirkungen von Weidewirtschaft auf Ökosystemleistungen noch unzureichend erforscht, da die Wechselwirkungen zwischen Beweidung, Klima, Bodeneigenschaften und Biodiversität komplex sind.

Ein globales Netzwerk von Forschenden, darunter Ökologen aus zwei Arbeitsgruppen der Universität Potsdam, nutzte nun einen einzigartigen globalen Datensatz, der an 98 Trockenlandstandorten auf sechs Kontinenten gesammelt wurde, um diese drängende Frage zu beantworten. Die Forschergruppe konnte zeigen, dass zunehmender Beweidungsdruck die Bereitstellung von Ökosystemleistungen in wärmeren und artenarmen Trockengebieten verringert, während in kälteren und artenreichen Gebieten positive Effekte der Beweidung beobachtet wurden.

Um das Schicksal von Trockengebiets-Ökosystemen angesichts von Klimawandel und zunehmender menschlicher Nutzung zu verstehen, müssen die Wechselwirkungen zwischen Beweidung und lokalen Umweltfaktoren offenbar explizit berücksichtigt werden.

Die Studie lieferte empirische Belege für die positiven Zusammenhänge zwischen dem Reichtum an Pflanzenfressern und der Bereitstellung von Ökosystemleistungen bei unterschiedlichen Umweltbedingungen, Pflanzen- und Bodenvielfalt sowie Beweidung. Die Untersuchung kann zu einer besseren Bewirtschaftung von Trockengebieten beitragen, die das größte Weidelandgebiet der Erde darstellen.

Fachartikel:

Maestre, F.T. et al. (2022): Grazing and ecosystem service delivery in global drylands. *Science* Vol. 37, No. 6622.
DOI: 10.1126/science.abq4062

Weitere Informationen:

Institut für Biochemie und Biologie, Universität Potsdam
www.uni-potsdam.de/de/ibb

(aus: *Medieninformation Universität Potsdam*
vom 25. November 2022)

Weltweiter Schutz und Bedeutung von Feuchtgebieten

Zum Abschluss der 14. Vertragsstaatenkonferenz des Übereinkommens über Feuchtgebiete (Ramsar-Konvention) haben die Vertragsstaaten die "Erklärung von Wuhan" verabschiedet. Der Schutz, die Wiederherstellung und eine nachhaltige Nutzung von Feuchtgebieten stellen demnach wichtige naturbasierte Lösungen dar, um dem Verlust von Biodiversität sowie der Klimakrise entgegenzuwirken. Projekte zur Wiederherstellung sollen deshalb verstärkt initiiert und umgesetzt werden.

Parallel zum Beschluss der Nationalen Moorschutzstrategie und dem Beginn der entscheidenden zweiten Woche der 27. UNFCCC Klimakonferenz in Ägypten stellen die Beschlüsse eine wichtige Grundlage dar, um Feuchtgebiete wie Moore und Sümpfe, aber auch Flüsse und Seen, weltweit besser zu schützen. Die Konferenz, die vom 5. bis zum 13. November 2022 in Wuhan und in Genf stattfand, stand unter der Überschrift "Feuchtgebiete – unverzichtbar für Natur, Mensch und Klimaschutz".

In der "Erklärung von Wuhan" bekennen sich die Vertragsparteien zu den Zielen der Ramsar-Konvention. Der Schutz von Feuchtgebieten soll sowohl in relevante nationale Strategien wie Biodiversitäts-, Klimaschutz und Klimaanpassungsstrategien integriert als auch sektorübergreifend berücksichtigt werden, so zum Beispiel in der Landwirtschaft, der Waldwirtschaft und der Stadtplanung. Dadurch können Feuchtgebiete ihre Rolle als naturbasierte Lösungen gegen die Klimakrise und das Artenaussterben besser wahrnehmen. Sie gehören zu den vielseitigsten und zugleich gefährdetsten Ökosystemen der Erde. Seen und Flüsse, Moore und Sümpfe, Korallenriffe und Mangrovenwälder sind nicht nur als Lebensräume für seltene und bedrohte Tier- und Pflanzenarten schützenswert, sie stellen auch für den Menschen lebenswichtige Ökosystemleistungen bereit. Feuchtgebiete versorgen Menschen mit Trinkwasser und Nahrung, verbessern die Wasserqualität, schützen vor Naturkatastrophen wie Überschwemmungen und leisten als langfristige Kohlenstoffsinken einen höheren Beitrag zum Klimaschutz als irgendeine andere Art von Ökosystemen.

Zudem wurde auf der Konferenz beschlossen, in den nächsten drei Jahren eine globale Bewertung der Lücken im Netz der Feuchtgebiete von internationaler Bedeutung vorzunehmen. So ergab zum Beispiel eine Analyse der Ramsar-Gebiete im Mittelmeerraum zum 50-jährigen Bestehen der Konvention, dass über 150 Gebiete trotz ihrer Bedeutung für überwinternde Wasservögel momentan nicht Teil des Netzwerkes sind. 95 dieser Gebiete haben demnach sogar keine Art von Schutzstatus.

Weiterhin wurden in Genf 25 neue sogenannte "Wetland Cities", also Städte mit besonderem Bezug zu Feuchtgebieten, geehrt. Die Auszeichnung als "Wetland City" wurde unter der Ramsar-Konvention konzipiert, um gerade Städte, die sich in unmittelbarer Nähe von Feuchtgebieten und insbesondere Ramsar-Gebieten befinden und die von ihnen abhängig sind, zu nutzen. So kann in der Öffentlichkeit ein stärkeres Bewusstsein für diese wertvollen Ökosysteme und deren Schutz geschaffen werden. Zu den neu akkreditierten Städten zählen z. B. Valencia in Spanien und Kapstadt in Südafrika.

Zeitgleich zu den Verhandlungen fanden eine Reihe von Side Events statt, u. a. ein Side Event des von der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) finanzierten Projekts in Indien zu Feuchtgebieten als wichtige Pfeiler für Biodiversitäts- und Klimaschutz. Das Projekt leistet einen Beitrag zur Erhaltung und zum nachhaltigen Management von Feuchtgebieten in drei Bundesstaaten Indiens, etwa durch die Erstellung eines Leitfadens für Anwender zum Management von Klimarisiken in Feuchtgebieten.

Künftig soll die Kooperation zwischen der Ramsar-Konvention und den verschiedenen internationalen Konventionen wie der UN-Biodiversitätskonvention (CBD) und der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) intensiviert werden. Aktivitäten zu Kommunikation, Bildung, Partizipation und Öffentlichkeitsarbeit in der Umsetzung der Konvention sollen gestärkt und strategischer ausgerichtet werden. Dies soll unter anderem durch eine stärkere Integration von Feuchtgebietsschutz im Bildungswesen als auch durch eine stärkere Einbeziehung von Jugendvertretern, z. B. als Mitglied von offiziellen Delegationen zur Vertragsstaatenkonferenz, erreicht werden.

Die deutsche Delegation wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) geleitet und durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) unterstützt.

Schon seit über 51 Jahren setzt sich die Ramsar-Konvention für Feuchtgebietsschutz ein. Es handelt sich damit um die älteste internationale Konvention, die sich mit dem Erhalt und der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen beschäftigt. Die 172 Vertragsstaaten treffen sich alle drei Jahre, um sich über den Fortschritt beim Schutz, der Wiederherstellung und der nachhaltigen Nutzung von Feuchtgebieten auszutauschen und das gemeinsame Abkommen weiterzuentwickeln. Die Ziele werden unter anderem durch ein globales Netzwerk von derzeit 2.468 Feuchtgebieten internationaler Bedeutung umgesetzt.

Die Ausweisung von "Feuchtgebieten von internationaler Bedeutung", auch Ramsar-Gebiete genannt, ist ein Instrument der Konvention, um besonders bedeutende Feuchtgebiete eines Mitgliedsstaates der Konvention anzuerkennen. Deutschland ist seit dem Jahr 1976 Mitgliedsstaat und hat mit der im Jahr 2021 erfolgten Ausweisung der "Rosenheimer Stammbekkenmoore" 35 Ramsar-Gebiete (869.000 ha).

Auch international setzt sich Deutschland für die Erhaltung, die Wiederherstellung, die Vernetzung sowie das nachhaltige Management von Feuchtgebieten ein. So werden im Rahmen der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) des Bundesumwelt- und Verbraucherschutzministeriums (BMUV) aktuell zwölf Projekte in Höhe von insgesamt 53 Mio. € gefördert.

Darüber hinaus organisiert das Bundesamt für Naturschutz (BfN) regelmäßig mit Mitteln des BMUV Veranstaltungen auf internationaler bzw. europäischer Ebene, zuletzt verstärkt zum Thema Moorschutz, so zum Beispiel auch im Rahmen eines Side Events auf der 26. UNFCCC Klimakonferenz in Glasgow. Im Jahr 2023 wird im Rahmen eines Vorhabens zum Schwerpunktthema "Wetlands" u. a. eine Europäische Fachkonferenz "Biodiversität und Klimawandel" organisiert.

Weitere Informationen:

14. Vertragsstaatenkonferenz zur Ramsar-Konvention und zur Erklärung von Wuhan
www.ramsar.org/event/14th-meeting-of-the-conference-of-the-contracting-parties

Ramsar-Gebiete in Deutschland
www.bmuv.de/WS4461

(aus: Gemeinsame Pressemitteilung Bundesministerium für Umwelt und Bundesamt für Naturschutz vom 15. November 2022)

Förderung der Ems-Auen durch BMUV und BfN

Das im Oktober 2022 gestartete Projekt "EmsLand" soll an der Ems für mehr Flusssdynamik sorgen und an Wasser gebundene Lebensräume naturnah entwickeln. Dafür hat sich der niedersächsische Landkreis Emsland mit starken Partnern in der Region zusammengetan. Für die Umsetzung des Projekts stellen das Bundesumweltministerium und das Bundesamt für Naturschutz (BfN) im Förderprogramm Auen Fördermittel zur Verfügung.

Die Hitzesommer und Dürreperioden der letzten Jahre zeigen, wie wichtig es ist, mehr Wasser in der Landschaft zu halten. Intakte Auen sind für die Vorsorge und Anpassung an die Klimakrise unersetzlich. Zusätzlich sind sie ein Ort einzigartiger Biodiversität. Der Lebensraum naturnaher Flusssufer und Auen befindet sich in stetigem Wandel, doch diese Dynamik finden wir heute nur noch an den wenigsten Flüssen in Deutschland. Umso wichtiger sind Projekte wie das "EmsLand", damit wir einen unserer artenreichsten Lebensräume für Tier- und Pflanzenarten nicht verlieren.

Flüsse und Auen sind für den Erhalt von Arten wichtig, die auf die speziellen, nur dort vorherrschenden Bedingungen angewiesen sind. Darüber hinaus sind naturnahe Flüsse und Auen auch von hohem gesellschaftlichen Nutzen. Mit Blick in die Zukunft sind sie im Vergleich zu weiteren technischen Eingriffen im Gewässer eine nachhaltige Lösung.

Das Projekt "EmsLand" bietet dem Landkreis die Chance, Naturschutzmaßnahmen an der Ems in größerem Umfang anzustoßen. Dazu wurde beschlossen, sich mit der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), den Unterhaltungsverbänden, der Landesverwaltung, der Landwirtschaft und dem Fischereiverband zusammenzutun, um so gemeinsame Maßnahmen zu erarbeiten, die von allen mitgetragen werden.

Um die verschiedenen Interessen berücksichtigen zu können, setzt der Landkreis Emsland auf den Dialog mit den bereits gefundenen Partnern. Zusammen mit Akteuren aus Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Naturschutz werden Renaturierungsmaßnahmen erarbeitet und umgesetzt. Zusätzlich sind ab dem Jahr 2023 erste Maßnahmen auf öffentlichen Flächen geplant: Unter anderem sollen Stillgewässer in den Auenbereichen geschaffen sowie Strukturen wie Totholzbäume oder kleinere Steinbänke in einzelnen Zuflüssen angelegt werden. Dies ermöglicht wieder eine eigendynamische Entwicklung ohne Uferverbau in den

Zuflüssen. Um die stark eingetieftete Ems und ihre Zuflüsse wieder besser mit ihren Auen zu verbinden, sollen zudem sogenannte Sekundärauen angelegt werden. Dafür wird das umgebende Gelände ebenfalls tiefer gelegt, damit es häufiger überschwemmt wird und dort wechselfeuchte Bereiche entstehen können. Diese sind als charakteristische Lebensräume bedeutsam für solche Arten, die nur in Auen unter ebendiesen Bedingungen vorkommen, wie bspw. die Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*) oder der Kammolch (*Triturus cristatus*). Das BfN begleitet und fördert das Projekt mit Mitteln des Bundesumweltministeriums im Förderprogramm Auen.

Das Projekt "EmsLand" zur Auenentwicklung an der Ems zwischen Salzbergen und Dörpen ist das vierte Vorhaben, das im Förderprogramm Auen bewilligt wurde. Mit einem Gesamtbudget von 5,4 Mio. €, die bis zum Jahr 2028 zur Verfügung stehen, gehört es bisher zu den größeren Projekten dieses Programms. Neben den 4,1 Mio. € des Bundesumweltministeriums aus dem Förderprogramm Auen unterstützt auch das Land Niedersachsen das Projekt mit etwa 800.000 €. Die verbleibenden 500.000 € kommen vom Landkreis Emsland selbst. Das Projektgebiet umfasst 16.500 ha der Emsauen auf einer Strecke von 160 km zwischen den Gemeinden Salzbergen und Dörpen.

Über das Förderprogramm Auen können Landkreise und Kommunen, Naturschutz- und Umweltverbände sowie andere Akteure beim Bundesamt für Naturschutz Fördermittel beantragen, um die Auen entlang der Bundeswasserstraßen als Zentren der biologischen Vielfalt und Achsen des Biotopverbundes naturnah zu entwickeln. Zur Wiederherstellung intakter Flusslandschaften können beispielsweise Auengewässer angelegt, nicht mehr benötigte Entwässerungseinrichtungen entfernt sowie der für die Maßnahmenumsetzung notwendige Grunderwerb und Personal gefördert werden. Das Förderprogramm ist Teil des Bundesprogramms "Blaues Band Deutschland", einer gemeinsamen Initiative von Bundesumwelt- und Bundesverkehrsministerium.

Weitere Informationen

Projektsteckbrief "EmsLand"

www.bfn.de/projektsteckbriefe/emsland

Förderprogramm Auen

www.bfn.de/foerderprogramm-bbd

(aus: Pressemitteilung Bundesamt für Naturschutz vom 24. November 2022)

Kostengünstiger Sensor erfasst den Pegel von Flüssen

Es gibt eine ganze Reihe von Methoden, den Pegel eines Wasserlaufs zu bestimmen – von sehr einfachen (per Messlatte) bis hin zu High-Tech-Lösungen per Radar. Doch alle haben einen Haken: Die meisten Messgeräte können durch Hochwasser beschädigt werden, viele erlauben keine kontinuierliche Überwachung, ihre Fernablesung gestaltet sich schwierig oder sie sind einfach zu teuer.

In Wesel am Niederrhein verrichtet dagegen bereits seit zwei Jahren ein Messgerät seinen Dienst, das diese Nachteile nicht hat: Es ist kostengünstig, zuverlässig und dazu in der Lage, den Pegel-

stand per Mobilfunk kontinuierlich an ein Auswertungs-Zentrum zu übermitteln. Damit eignet es sich im Prinzip zur engmaschigen Warnung vor Hochwasser- und Dürre-Ereignissen.

Kern des Geräts ist ein kostengünstiger GNSS-Empfänger. Das sind Sensoren, die die Position ihres Standorts auf wenige Meter genau bestimmen können. Dazu nutzen sie unter anderem die GPS-Satelliten der USA sowie ihre russischen Pendanten, GLONASS. Mithilfe der Satellitensignale lässt sich aber auch der Abstand der GNSS-Antenne zur Oberfläche eines Flusses messen.

Die von den Satelliten ausgesandten Wellen werden nur zum Teil direkt von der Antenne aufgefangen. Der Rest wird von der Umgebung (in diesem Fall der Wasseroberfläche) reflektiert und gelangt über diesen Umweg zum Empfänger. Dieser reflektierte Anteil ist daher länger unterwegs. Er bildet bei der Überlagerung mit dem direkt empfangenen Signal bestimmte Muster, Interferenzen genannt. Aus ihnen lässt sich der Abstand der Antenne zum Wasserspiegel errechnen.

Die Forscher können das GNSS-Gerät an jeder Struktur anbringen, sei es an einer Brücke, einem Gebäude, Baum oder Zaun neben dem Fluss. Von dort kann es berührungslos rund um die Uhr den Flusspegel messen – im Schnitt auf 1,5 Zentimeter exakt. Dabei ist es selbst im Falle eines Hochwassers nicht gefährdet. Die Genauigkeit des Verfahrens kommt zwar nicht an die eines radargestützten Pegelmessers heran. Für die angedachten Einsatzzwecke reicht sie aber voll und ganz aus. Zudem ist das Gerät mit knapp 150 € auch erheblich günstiger als sein High-Tech-Pendant.

Die GNSS-Antenne ist mit einem Minicomputer verbunden, einem sogenannten Raspberry Pi. Das Gerät ist etwa so groß wie ein kleines Smartphone; dennoch hat es genug Leistung, um aus den Rohdaten den Wasserstand berechnen zu können. Der Minicomputer ist aufgrund seiner Flexibilität und seines geringen Stromverbrauchs unter Bastlern sehr beliebt, die damit verschiedenste Projekte realisieren. Er lässt sich problemlos über Solarzellen mit Strom versorgen und arbeitet dann völlig autark. Seine Messdaten übermittelt er per Mobilfunk.

Die geschriebene Software ist Open Source. Sie kann also ohne Gebühren genutzt werden. Im Internet stellen die Forschenden zudem sämtliche Informationen zu ihrem Projekt bereit. Interessentinnen und Interessenten können das Messgerät also problemlos nachbauen.

Einen Nachteil hat das Verfahren allerdings: Es ist nur für Flussläufe mit einer Breite von mindestens 40 m geeignet. Das ist der kleinste Radius, aus dem die Antenne das reflektierte Satellitensignal empfängt. Wenn der Wasserlauf zu schmal ist, stammt ein zu großer Anteil der Reflektionen von Uferbereichen. Die Beteiligten planen aber, ihren Auswertungscode weiter zu optimieren. Sie hoffen so, auch bei kleineren Flüssen wie der Ahr noch zu sicheren Messergebnissen kommen zu können.

An der Studie war neben der Universität Bonn die Federal University of Rio Grande do Sul in Brasilien beteiligt. Das Projekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das National Council for Scientific and Technological Development Brasilien (CNPq) sowie die Rio Grande do Sul State Research Funding Agency (Fapergs) gefördert.

Fachartikel:

Karegar, M.A., Kusche, J., Geremia-Nieviniski, J., Larson, K.M. (2022): Raspberry Pi Reflector (RPR): A Low-cost Water-level Monitoring System based on GNSS Interferometric Reflectometry. Water Resources Research.
DOI: 10.1029/2021WR031713

Weitere Informationen:

Institut für Geodäsie, Universität Bonn
www.igg.uni-bonn.de

(aus: Pressemitteilung Universität Bonn vom 23. November 2022)

Neue Studie zur Permafrost-Forschung

Die globale Erwärmung lässt die dauerhaft gefrorenen Böden der Arktis tauen. Dabei wird das hochwirksame Treibhausgas Methan frei, das den Klimawandel beschleunigt. Ein Wissenschaftlerteam von der Universität Hamburg koordiniert ein neues Verbundprojekt, das den Methankreislauf auf der Nordhalbkugel erforscht.

In dem Vorhaben wird erstmals eine Region in Westgrönland erkunden, die viele verschiedene Ökosysteme vereint: Hier gibt es Gletschervorfelder, Frostmusterböden und Feuchtgebiete mit kleinen Seen und Tümpeln, wo mehr oder weniger organischer Kohlenstoff umgesetzt wird. Diese Ökosysteme können Methan aus der Atmosphäre binden. Doch wenn die Permafrost-Böden auftauen, entweichen große Mengen klimawirksamer Gase in die Luft. Methan wirkt mindestens 28-mal so stark wie Kohlendioxid. Daher müssen die zugrundeliegenden Prozesse besser verstanden werden, um Unsicherheiten in Prognosen zur künftigen Freisetzung von Methan aus der Arktis zu reduzieren.

Die beteiligten Wissenschaftler werden in Grönland Bodenproben nehmen, um die Wechselwirkungen des Bodens mit der Atmosphäre zu untersuchen. Innovative Laborstudien erlauben ihnen die Beobachtungen der Methanflüsse auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen. Die Ergebnisse werden zusammen mit bereits vorliegenden Daten aus Sibirien eine wichtige Grundlage sein, um vorhandene Erdsystemmodelle weiterzuentwickeln.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt "Permafrostforschung, integrierte Beobachtung und Modellierung des Methanhaushalts von Ökosystemen" (MOMENT) mit 3,5 Mio. € bis Ende Oktober 2025.

In dem Verbund forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), des Helmholtz-Zentrums Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ), des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie (MPI-BGC) sowie des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M), der Leibniz Universität Hannover (LUH), der Universität zu Köln (UzK) und der Universität Hamburg (UHH). Als externe Kooperationspartner steuern die Universitäten Kopenhagen und Aarhus in Dänemark sowie die Disko Arctic Research Station auf Grönland ihre Expertise bei.

Weitere Informationen:

Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN),
Universität Hamburg
www.cen.uni-hamburg.de

(aus: Pressemitteilung Universität Hamburg vom 16. November 2022)

Studie zur Verteilung von Metallen und Plastik in Flussauen

Kunststoffe und Metalle verteilen sich unterschiedlich in den Böden von Flussauen. Während Plastikpartikel sich in den obersten Bodenschichten konzentrieren, finden sich Metalle bis in eine Tiefe von 2 m. Das hat eine Forschungsgruppe aus der Marburger Geographie und Physik entlang der Nidda festgestellt, eines Flusses in Hessen.

Die Nidda entspringt im Vogelsberg und mündet im Stadtgebiet von Frankfurt in den Main. Sie fließt vom ländlichen Oberlauf über Ackerland bis zur urbanisierten Mündung und ist somit typisch für Zentraleuropa. In Flussauen lagern sich aufgrund ihrer Übergangslage zwischen Fluss und Land bei Überschwemmungen unterschiedliche Schadstoffe ab, etwa schadstoffhaltige Metalle aus der Industrie. Auch Plastikpartikel unterschiedlicher Größe finden sich in Auenböden. Hierdurch kann es in Auenböden zu verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Kunststoffteilchen und Metallen kommen, zum Beispiel, wenn Metallzusätze aus Kunststoffen herausgelöst werden oder wenn sich umgekehrt Metalle aus dem Boden an Kunststoffoberflächen anreichern, was so oder so das Verhalten potenziell giftiger Metalle verändert.

Will man einschätzen, welche dieser Prozesse im Boden stattfinden, sind Kenntnisse zur Verteilung von Metallen und Plastikbestandteilen von Bedeutung. Doch insbesondere zur vertikalen Verteilung dieser Verunreinigungen – also zur Frage, in welchen Bodenschichten der Flussauen sie auftreten – gab es bislang keine ausreichenden wissenschaftlichen Untersuchungen. Um das zu ändern, taten sich die Geographen mit einer Arbeitsgruppe der Marburger Physiker zusammen. Das Team nahm Bodenproben an 20 Stellen entlang der Nidda und analysierte sie im Labor auf Verunreinigungen mit Plastikpartikeln und verschiedenen Metallen, zum Beispiel Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Blei und weiteren.

Dabei stellte das Forschungsteam zwar kein auffälliges Verteilungsmuster in der Fläche fest, Metalle und Kunststoffpartikel waren horizontal gleichmäßig verteilt. Aber im vertikalen Auftreten gab es deutliche Unterschiede zwischen Metall und Plastik.

Die unteren Bodenschichten enthalten deutlich weniger Plastik als die höheren Schichten und die Oberfläche. Es gibt ein Maximum in den obersten 10 cm. Darunter nimmt die Menge des gefundenen Kunststoffs kontinuierlich ab. Auf der Oberfläche fand die Forschungsgruppe immer wieder Überreste von Konsumartikeln – das achtlose Wegwerfen von Verbrauchsgegenständen und Verpackungsmüll scheint also eine Quelle der Verschmutzung mit Kunststoffen zu sein.

Doch während sich bei Plastik ein klarer Unterschied zwischen höheren und tieferen Bodenschichten zeigt, reichern sich Metalle erst unterhalb von 40 cm in zwei oder drei Lagen an. Die Metallverunreinigung tritt gehäuft in einer Tiefe von 30 bis 40 cm auf sowie nochmals bei 75 bis 100 cm. Vermutlich ist das auf Metalle zurückzuführen, die an Sedimente gebunden sind. Das vertikale Muster der Verunreinigungen deutet auf eine Abfolge von älteren Metall- und jüngeren Kunststoffablagerungen in den untersuchten Auenböden hin. Dies lässt vielleicht auf unterschiedliche Ablagerungszeiträume und Mobilitäten in den Auenböden rückschließen.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie sowie die Nachwuchsakademie MARA der Philipps-Universität Marburg förderten die Forschungsarbeit finanziell.

Fachartikel:

Weber, C.J., Opp, C., Prume, J.A., Koch, M., Chiffard, P. (2022): Meso- and microplastic distribution and spatial connections to metal contaminations in highly cultivated and urbanised floodplain soils – a case study from the Nidda River. *Microplastics and Nanoplastics* 2, article No. 25, 2022.

DOI: 10.1186/s43591-022-00044-0

Weitere Informationen:

Arbeitsgruppe Boden- und Hydrogeographie,
Philipps-Universität Marburg
www.uni-marburg.de/de/fb19/disciplines/physisch/boden-und-hydrogeographie

(aus: Pressemitteilung Universität Marburg vom 25. November 2022)

Citizen Science – Valide Daten zu Fließgewässern

Citizen-Science-Projekte etablieren sich mehr und mehr als wichtige Stütze für die Umweltforschung. Sie liefern Daten, öffnen die Wissenschaft für die Gesellschaft und geben Interessierten die Möglichkeit, sich für die Umwelt zu engagieren, um nur einige Vorzüge zu nennen. Allerdings gibt es auch Vorbehalte, etwa in punkto Datenqualität. Ein Forscherteam unter Leitung des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig hat anhand der Zustandsbewertung von Kleingewässern festgestellt, dass Citizen-Science-Daten für die weitere Verwendung in Wissenschaft und Verwaltung durchaus geeignet sind.

Die Forscher untersuchten Daten, die rund 300 Freiwillige an 28 Bächen in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Niedersachsen im Citizen-Science-Projekt FLOW in 2021 erhoben hatten. Ziel von FLOW ist, Aussagen zum ökologischen Zustand von kleineren Fließgewässern in der Agrarlandschaft treffen zu können. Die Freiwilligen bewerteten dafür die Gewässermorphologie, erhoben physikalisch-chemische Parameter und analysierten die Gemeinschaft der wirbellosen Tiere (Makrozoobenthos), anhand derer Aussagen zum ökologischen Zustand eines Bachs möglich sind. Mitarbeiter des UFZ und des Projektpartners Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) hatten die Bürger zuvor über ein halbtägiges Training mit den Methoden der Gewässerbewertung und der Bestimmung des Makrozoobenthos vertraut gemacht.

Die Ergebnisse der Freiwilligen verglich das Forscherteam mit denen des vom geleiteten UFZ-Forschungsprojekts "Kleingewässermonitoring", in dessen Rahmen im Jahr 2021 unter anderem diese 28 Bäche von Wissenschaftlern beprobt worden waren.

Die Forschergruppe verglich nun die Ergebnisse der beiden Gruppen. Dabei zeigte sich, dass sich die Bestimmungsqualität des Makrozoobenthos durch Freiwillige von der der Experten kaum unterscheidet, wenn man die Wirbellosen auf Ebene der Ordnung oder der Familie identifiziert, die Übereinstimmung bei den bestimmten Individuen liegt bei rd. 90 %. Sollen für die Tierchen dagegen noch genauer die Gattung oder die Art bestimmt werden, nimmt die Fehlerrate bei den Freiwilligen zu.

Einige Wirbellose sind nur wenige Millimeter groß, innerhalb einer Familie oder Gattung sind sich die Larven der Wasserinsekten optisch oft sehr ähnlich, und die Merkmale zur genaueren Bestimmung sind mit einfacher Ausstattung im Feld nur schwer erkennbar. Um korrekte Gattungs- und Artnamen nennen zu können, braucht es monatelange Erfahrung, viel Zeit zur Bestimmung sowie gute Mikroskope, was in einem Citizen-Science-Projekt in der Regel nicht umsetzbar ist. So hatten die Freiwilligen mit einer geländetauglichen Ausstattung gearbeitet, die neben einer Anleitung zur Bewertung der Gewässermerkmale und einer Bestimmungshilfe für das Makrozoobenthos ein Stereomikroskop mit lediglich 20-facher Vergrößerung umfasste.

Dass sich die Wirbellosen aber nicht präziser bestimmen lassen, muss kein Nachteil sein, denn: Für das entwickelte Bioindikatorsystem SPEARpesticides, mit dem sich analog zu den fünf Qualitätsklassen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) die Belastung des Fließgewässers durch Pestizide einschätzen lässt, reicht die Bestimmung eines Individuums auf Ebene der Familie aus. Folglich fallen auch die Ergebnisse zum Bioindikator SPEARpesticides der Bürger und der Wissenschaftler recht ähnlich aus: 61 % der Bäche stuften beide Gruppen in die gleiche Qualitätsklasse ein. Bei 32 % unterschied sich die Einschätzung um eine Klasse, lediglich bei 6 % um zwei Klassen.

Gute Ergebnisse erzielten die Freiwilligen auch bei der Hydro-morphologie, also etwa bei der Einschätzung des Gewässerverlaufs, der Uferstruktur oder der Diversität des Gewässersubstrats. So lag die Übereinstimmung beider Gruppen, ob diese Strukturen gemäß den Vorgaben der EG-WRRL in einem guten ökologischen Zustand sind, bei 82 %. Insgesamt bewerteten beide Gruppen 50 % der Gewässer mit den gleichen Qualitätsklassen, bei den anderen 50 % lag nur eine Klasse dazwischen. Das wurde als ein gutes Ergebnis gewertet, denn die Komponenten der Gewässermorphologie realistisch zu bewerten, ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Diese Variabilität von einer Qualitätsklasse gibt es auch bei professionellen Kartierern.

Einzig bei der Messung der physikalisch-chemischen Parameter, also etwa des Sauerstoff-, Nitrit- und pH-Gehalts oder der Ionenleitfähigkeit, liegen größere Unterschiede zwischen den Ergebnissen vor. Ein Grund dafür: Während die UFZ-Wissenschaftler die Gewässerabschnitte fünf Mal pro Saison beproben, konnten die Freiwilligen aus zeitlichen und organisatorischen Gründen nur eine Messung vornehmen. Eine Messung pro Saison und Bachabschnitt ist jedoch zu wenig, da die chemische Zusammensetzung

des Gewässers saisonal und tageszeitlich stark schwanken kann. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu bekommen, seien häufigere Messungen notwendig. Citizen-Science-Projekte, die den Gewässerzustand erforschen möchten, könnten dazu beispielsweise zwei bis drei Personen aus jeder Gruppe benennen, die sich ausschließlich mit den chemisch-physikalischen Messungen beschäftigen und dadurch mehr Daten pro Probestelle erheben könnten.

Die Gruppe der Wissenschaftler konnte nachweisen, dass die Freiwilligen durchaus gute Daten zur Fließgewässerbewertung erheben konnten, sofern sie zuvor geschult wurden und ihre Einsätze gut koordiniert sind. Die Ergebnisse könnten Datenlücken füllen, da die EG-WRRRL größere Fließgewässer fokussiert und Kleingewässer mit einem Einzugsgebiet von weniger als zehn Quadratkilometern kaum berücksichtigt. Dabei machen diese laut Bundesamt für Naturschutz (BfN) rd. 65 % der Gesamtlänge aller Fließgewässer in Deutschland aus.

Die Vision ist, ein bundesweites Monitoringnetz mit Citizen-Science-Gruppen aufzubauen und diese Daten den Umweltbehörden, Wissenschaftlern und anderen Interessierten zur Verfügung zu stellen. So könnte jeder und jede Einzelne dazu beitragen, den ökologischen Gewässerzustand zu verbessern. Dieses Projekt zeigt damit sehr anschaulich, dass mithilfe von Citizen Science wichtige gesellschaftliche Herausforderungen und Umweltprobleme zusammen mit Bürgern erforscht werden können.

Das Projekt FLOW hat eine Laufzeit von Februar 2021 bis Januar 2024 und wird gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Es gehört zu 15 Projekten, die bis Ende 2024 die Zusammenarbeit von Bürgern und Wissenschaftlern inhaltlich und methodisch voranbringen und Antworten auf gesellschaftliche Herausforderungen geben sollen.

Fachartikel:

von Gönner, J., Bowler, D.E., Gröning, J., Klauer, A.-K., Liess, M., Neuer, L., Bonn, A. (2023): Citizen science for assessing pesticide impacts in agricultural streams. *Science of The Total Environment*, Vol. 857, 159607. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159607

Weitere Informationen:

Department Ökosystemleistungen, UFZ
www.ufz.de/index.php?de=34228

Citizen Science Projekt FLOW
www.flow-projekt.de

Projektseite Projekt FLOW, BUND
aktion.bund.net/bleiben-sie-im-flow

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 8. Dezember 2022)

Hochwasserkatastrophe 2021 – Siegener Forscher attestieren multiples Systemversagen

Ein Team aus dem Institut für Medienforschung der Universität Siegen hat die Krisenkommunikation während des Hochwassers 2021 analysiert, bei dem mehr als 180 Menschen gestorben sind.

Beim Hochwasser im Juli 2021 gab es gemäß der Analyse ein multiples Systemversagen des Warn- und Katastrophenschutzsystems in Bund, Ländern und Kommunen. Das Team vom Institut für Medienforschung der Universität Siegen hat die Kommunikation rund um das Hochwasser im Juli 2021 von Behörden, Medien und Bevölkerung analysiert. Ziel ist es, Missstände aufzudecken, Warnung und Evakuierung in den Gebieten zu verbessern sowie Konzepte zu entwickeln, um deutlich robustere Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen zu schaffen. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Eine Ursache für das Kommunikationsversagen sehen die Forscher darin, dass die Fachexpertise und die Medienverfügbarkeit zu lose gekoppelt sind: Die Fachbehörden hätten keinen Zugang zu eigenen Informations- und Warnkanälen mit ausreichend hoher Reichweite. Um Warnmeldungen zu übermitteln, benötigten Fachexperten deshalb die öffentlich-rechtlichen und privaten Medienveranstalter. Dort würden Warnungen oft nur verlesen, nicht aber fachlich mit Blick auf die konkreten Gefährdungen interpretiert und veranschaulicht. Deshalb fordern die Medienwissenschaftler anschauliche Beschreibungen und Illustrationen der Gefahren, die mit extremen Wetterlagen möglicherweise drohen. Die Warnungen müssen besser veranschaulicht werden. Hinzu käme das Problem, dass die Warnstufen überkomplex und die Mobilisierungswirkungen zu mangelhaft seien. Wenn Bürger nur gewarnt werden, reiche das nicht aus. Es muss unmissverständlich gefordert werden, dass die Menschen umgehend handeln müssen oder dass sonst Gefahr für Leib und Leben bestehe.

Auch die Warn-Apps NINA, Katwarn oder Biwapp könnten solche Lücken nicht wirksam schließen. Sie seien in der Bevölkerung noch immer in viel zu geringem Umfang und teils nur regional verbreitet, die nutzerspezifischen Konfigurationen seien außerdem oft fehlerhaft oder unvollständig.

Im November 2022 wurde das System Cell Broadcast ausgerollt. Darüber sollen künftig Bürgerinnen und Bürger per SMS über Notfälle informiert werden. Beim bundesweiten Warntag am 8. Dezember 2022 wurde das System zum ersten Mal in der Praxis getestet. In dem System Cell Broadcast sieht die Wissenschaftlergruppe eine deutliche Verbesserung zur bisherigen Situation. Aber auch das neue Cell Broadcast System könne nicht die finale Lösung sein. Zwar könne die Einführung von Cell Broadcast die Mängel der Warn-Apps kompensieren, das System bleibe aber auf die Mobilfunk-Infrastruktur und intensive Stromversorgung mit den bekannten Ausfallrisiken angewiesen. Der weit verbreitete Mangel an Notstrom-Technik in Mobilfunksystemen, vor allem aber in Unternehmen und Privathaushalten, schränke die Resilienz der Kommunikationssysteme und Versorgungsinfrastrukturen in Krisenlagen ganz erheblich ein.

Von diesem Problem sei auch das Mobile Warnsystem des Bundes (MOWAS) betroffen. Das Hochwasser 2021 hat gezeigt, dass Zugänge zum MOWAS-Portal wegen der Stromausfälle vor Ort in den Leitstellen nicht mehr möglich waren. Auch die Bedienung des MOWAS-Systems sei für das Leitstellenpersonal kompliziert. Widersprüchliche Inhalte in einer Warnung oder in den Warnungen der Leitstellen in einer Region müssten dann von den Multiplikatoren (z. B. den Reaktionen der Medienanstalten) aufwendig nachrecherchiert werden und führten zu einer gewissen Warnskepsis, die kontraproduktive Folgen haben könne.

Nicht zuletzt müsse aber auch die Frage nach der Qualifizierung der Verantwortungs- und Entscheidungsträger im Bevölkerungsschutz gestellt werden. Scheinbar haben diese Personen teils Sorge, durch Warnungen oder Alarmierungen Panik auszulösen. Außerdem befürchten manche, für Schäden durch im Nachhinein als unnötig erachtete Warnungen haftbar gemacht zu werden. Dadurch zögern viele Verantwortliche zu lange oder weichen einer Entscheidung aus. Nicht nur die Qualifizierung der Entscheidungsträger, sondern auch eine Qualifizierung der Bevölkerung sei wichtig. Es ist sinnvoll, wenn die Bevölkerung ein Verständnis für Naturgefahren, für die Verletzlichkeit und Risiken kritischer Infrastruktur hat. Außerdem ist es definitiv sinnvoll, die Selbsthilfefähigkeit und Resilienz der Bevölkerung zu stärken.

Für das Verbundprojekt "Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021 – HoWas2021" stellt das BMBF rd. 1,5 Mio. € zur Verfügung. Das Projekt hat eine Laufzeit von 18 Monaten. Ziel ist es, Risikovorhersagen, Krisenkommunikation und Katastrophenmanagement bei der Bewältigung von Extremwetterlagen zu verbessern. In dem Verbund unter Leitung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der RWTH Aachen und unter Beteiligung der Uni Siegen arbeiten Forscher sowie Anwender aus unterschiedlichsten Fachdisziplinen und Organisationen zusammen.

Weitere Informationen:

iSchool – Institut für Medienforschung, Universität Siegen
www.uni-siegen.de/infme/start_ifm

(aus: Pressemitteilung Universität Siegen vom 2. Dezember 2022)

Brandenburg

Gewässerunterhaltung und Hochwasserschutz im Oderbruch

Vor dem Hintergrund einer Richtlinie für die Unterhaltung von Fließgewässern in Brandenburg und eines Erlasses des Umweltministeriums werden im Oderbruch Auswirkungen auf den Hochwasserschutz befürchtet. Das Umweltressort stellt klar, dass der Erlass zu keiner Verschlechterung der Hochwasserschutzanlagen im Oderbruch und die Richtlinie zu keiner Reduzierung der Gewässerunterhaltung führt. Das Landesamt für Umwelt stimmt sich bei der Erarbeitung des Unterhaltungsrahmens mit dem Gewässer- und Deichverband Oderbruch (GEDO) ab.

Gewässerunterhaltung und Hochwasserschutz sind zwei verschiedene Aspekte der Wasserwirtschaft. Diese Aspekte überschneiden sich, sie werden aber an unterschiedlichen Stellen geregelt. Zur Gewässerunterhaltung zählen beispielsweise Vorgaben zur Erhaltung des Gewässerbettes, auch zur Sicherung eines ordnungsgemäßen Wasserabflusses. Maßnahmen des Hochwasserschutzes sind beispielsweise die Errichtung und Unterhaltung von Hochwasserschutzanlagen, aber im Einzelfall auch der Ausbau der Gewässer zur Umsetzung des Risikomanagementplanes.

Die oben genannte Richtlinie regelt die Gewässerunterhaltung. Aus diesem Grund macht die Richtlinie auch keine Vorgaben für den Hochwasserschutz. Die Richtlinie führt nicht zu einer Redu-

zierung der Gewässerunterhaltung und auch nicht zu einer Reduzierung des Hochwasserschutzes. Jährlich investiert das Land mehr als 2 Mio. € in die Unterhaltung der Gewässer- und Hochwasserschutzanlagen im Oderbruch.

Ein Unterhaltungsrahmenplan ist in Vorbereitung. Der GEDO wird in diese Planung einbezogen. Das Landesamt für Umwelt wird darüber hinaus das Gespräch mit dem GEDO suchen, um eventuelle Missverständnisse aufzuklären.

Das Oderbruch ist durch die in den vergangenen Jahren modernisierten Deichanlagen entlang der Oder einer der am besten vor Hochwasser geschützten Bereiche in Brandenburg. Die Deiche sind für ein Hochwasser bemessen, das statistisch alle 200 Jahre vorkommt. In keiner anderen Region des Landes wurde in den vergangenen Jahren so viel und so vorrangig Geld für Maßnahmen zur Verbesserung des Wassermanagements eingesetzt.

Das Land Brandenburg hatte in den letzten Jahren das Investitionsprogramm "Sonderprogramm zur Verbesserung der Vorflutverhältnisse im Oderbruch" für die Gewässer in Zuständigkeit des Landes aufgelegt. Das Programm umfasst an fast 50 Gewässer-Kilometern unter anderem Profilanpassungen, Böschungsbefestigungen und die Beseitigung von Abflusshindernissen. Die Maßnahmen an etwa 42 Gewässer-Kilometern sind abgeschlossen. Derzeit befinden sich Vorhaben am Letschiner Hauptgraben mit Kosten in Höhe von rund 3,5 Mio. € und am Quappendorfer Kanal mit Kosten in Höhe von 3,9 Mio. € in der Umsetzung. Mit diesen Maßnahmen wird die Kapazität der Hauptvorfluter für das Abführen hoher Abflüsse verbessert und damit bei hohen Wasserständen eine Minimierung der Ausuferungsgefahr auf angrenzende Landwirtschaftsflächen sowie Infrastruktur und Siedlungsbereiche mit Wirkung für nahezu das gesamte Oderbruch erreicht. Seit Anbeginn sind etwa 25,8 Mio. € investiert worden.

Der Erlass von differenzierten Hochwasserschutzzielen hat für die Hochwasserschutzanlagen an der Oder keine Folgen. Grenzgewässer, für die Hochwasserschutzziele mit anderen Ländern abgestimmt wurden, sind explizit von den Festlegungen ausgenommen. Grundsätzlich hat die Festlegung der Schutzziele im Erlass keinen Einfluss auf solche bestehenden Hochwasserschutzanlagen, deren Schutzniveau höher ist als das angegebene Schutzziel. Ein Rückbau vorhandener Hochwasserschutzanlagen ist grundsätzlich nicht vorgesehen und nur nach entsprechender Genehmigung in wasserrechtlichen Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahren möglich. Auch auf die Anforderungen an die Unterhaltung der bestehenden Hochwasserschutzanlagen hat die Festlegung differenzierter Hochwasserschutzziele keine Auswirkungen. Im Erlass geht es darum, die Bereiche mit hohem Schadenspotenzial zu schützen. Es geht nicht darum, den Schutz eines Bereichs mit geringem Schadenspotenzial zu reduzieren.

Weitere Informationen:

Gewässerunterhaltungsrichtlinie Brandenburg
<https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Gewaesse-runterhaltungsrichtlinie.pdf>

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg vom 25. November 2022)

Brandenburg

Novellierte Düngerechtsverordnung – Neuausweisung der "roten Gebiete"

Ab Dezember 2022 trat die novellierte Düngerechtsverordnung von Brandenburg in Kraft. Damit wurden die mit Nitrat belasteten Gebiete, so genannte "rote Gebiete", neu ausgewiesen. In den Gebieten gelten besondere düngerechtliche Einschränkungen für die Landwirtschaft. Durch die Neuausweisung hat sich die Fläche der roten Gebiete gegenüber dem Jahr 2020 etwa verdreifacht.

Die Neuausweisung stellt die Umsetzung der im August 2022 novellierte Allgemeinen Verwaltungsvorschrift Gebietsausweisung (AVV GeA) des Bundes dar. Die EU-Kommission hatte die bisherige Methodik der Ausweisung der mit Nitrat belasteten Gebiete als nicht mit EU-Recht vereinbar angesehen. Um Strafzahlungen abzuwenden, musste das Ausweisungsverfahren in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift Gebietsausweisung vereinheitlicht werden. Die Ausweisung basiert auf den vorhandenen Belastungen in Boden und Grundwasser. Sie trifft keine Aussage über gegenwärtige Einträge, beispielsweise durch die Landwirtschaft.

In Brandenburg sind daher Flächen betroffen, deren Belastung auf zum Teil langjährige Einträge in der Vergangenheit zurückzuführen sind, deren Verursacher außerhalb der Landwirtschaft stammen oder die möglicherweise gar natürlichen Ursprungs sein könnten.

Die nun neu ausgewiesene Gebietskulisse in Brandenburg umfasst 72.861 ha und damit 5,6 % der landwirtschaftlichen Fläche. Durch die Ausweisung im Jahr 2020 lag die Flächengröße bei 23.026 ha und damit bei 1,8 % der landwirtschaftlichen Fläche. Nach der neuen Kulisse sind 639 landwirtschaftliche Betriebe betroffen, davon 523 Betriebe mit ausschließlich Ackerland. Zuvor, nach der letzten Ausweisung, waren es 268 landwirtschaftliche Betriebe, davon 236 Betriebe mit ausschließlich Ackerland.

Für die Ausweisung beziehungsweise die Regionalisierung der mit Nitrat belasteten Gebiete in Brandenburg im Jahr 2020 wurden insgesamt 1.452 Grundwassermessstellen (GWM) herangezogen. Davon lagen 1.181 Messstellen in Brandenburg, 271 Messstellen befanden sich in angrenzenden Bundesländern. Die Messstellen in angrenzenden Bundesländern wurden bei der Regionalisierung berücksichtigt. Für die Neuausweisung im Jahr 2022 wurden insgesamt 1.142 Grundwassermessstellen herangezogen, von denen 1.046 Messstellen in Brandenburg und 96 in angrenzenden Bundesländern liegen.

Die Anzahl der Grundwassermessstellen hat sich gegenüber der Gebietsausweisung des Jahres 2020 verringert, da durch die Neufassung der "Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten" die technischen Anforderungen an die Grundwassermessstellen erhöht wurden. Darüber hinaus wurden auch Messstellen, die zum Beispiel wegen Trockenfallen zwischenzeitlich nicht mehr funktionstüchtig sind, aus dem Messnetz entfernt. Bis Ende 2024 plant das Landesamt für Umwelt den Neubau von mindestens 50 Grundwassermessstellen.

Weitere Informationen:

Ausgewiesene Gebiete der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, LGB
geobroker.geobasis-bb.de/gbss.php?MODE=GetProductInformation&PRODUCTID=b1d65972-6945-4e63-8c4f-f6b216849896

Die Brandenburger Düngeverordnung
www.landesrecht.brandenburg.de/dislservice/public/gvbldetail.jsp?id=9846

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg vom 30. November 2022)

Hessen

Sommer 2022 war der trockenste seit Beobachtungsbeginn

Der Sommer 2022 war nach dem Jahr 2003 der zweitwärmste in Hessen und der trockenste seit Beobachtungsbeginn. Mit 56 Sommertagen über 25 °C und nur 87 mm Niederschlag setzte er neue, denkwürdige Rekorde. Im September war es dann sehr nass, der Oktober war relativ ausgeglichen. Die Bilanz des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) zeigt: Das Jahr 2022 war insgesamt ein extremer Sommer, vor allem von Mai bis August. Das hat es auch früher vereinzelt gegeben, aber es waren nun in vier Jahren drei Dürre-Sommer in Hessen. Man muss sich darauf einstellen, dass solche heißen und trockenen Phasen im Zuge des Klimawandels häufiger werden. Mitte des Jahrhunderts wird das ein normaler Sommer sein, wenn wir nicht endlich konsequent Klimaschutz betreiben. Statt durchschnittlich knapp sechs Hitzetagen mit über 30 °C im Jahr (im Mittel über ganz Hessen) könnten es dann mehr als 20 Hitzetage sein. In Großstädten wie Frankfurt kommt zusätzlich noch der Hitzeinsel-Effekt hinzu: Dort werden es noch deutlich mehr Hitzetage – mit entsprechend negativen Folgen für die menschliche Gesundheit.

Zwischen Mai und Oktober waren fünf von sechs Monaten zu warm. Nur im September lagen die Temperaturen im durchschnittlichen Bereich. Mit 16,5 °C betrug der Mittelwert in diesem Zeitraum 1,8 °C mehr als der Mittelwert der Referenzperiode 1991 bis 2020 für diesen Zeitraum. Die Sommermonate in Hessen waren gekennzeichnet durch geringe Niederschläge. Die vier Monate Mai bis August lagen weit unter den Durchschnittswerten der Referenzwerte von 1991 bis 2020. Erst im September regnete es wieder mehr, hier fiel sogar mehr als das Doppelte der mittleren Niederschlagsmenge. Auch im Oktober fielen leicht überdurchschnittliche Regenmengen. Dadurch konnte das Niederschlagsdefizit der Monate Mai bis August aber nicht ausgeglichen werden. Mit 313 mm fielen 91 mm weniger Regen als im langjährigen Mittel von 1991 bis 2020.

Detaillierte Informationen zur aktuellen Witterung in Hessen im Vergleich zum beobachteten Klima der Vergangenheit (Daten ab 1881) lassen sich als Zeitreihen und Karten über den "Witterungsbericht Hessen" abrufen, der über das neue "Klimaportal Hessen" zugänglich ist.

Die hessischen Gewässer wiesen im Sommer 2022 niedrige bis sehr niedrige Wasserstände und Durchflussmengen auf. Ursache waren die geringen Niederschlagsmengen vor allem im August in Verbindung mit hohen Lufttemperaturen. Aber auch die Wasserarmut der Vorjahre, insbesondere der Jahre 2018 und 2020, wirkte noch nach.

Im Mai führten die Gewässer zwei Drittel der sonst üblichen Wassermengen, bis August nahm die Wasserführung immer mehr ab, sodass in diesem Monat im Mittel nur noch ein Drittel der sonst üblichen Wassermengen die Gewässer durchfloss. Infolge der starken Regenfälle im September, die mehr als das Doppelte des Monatswerts betrug, ging die Niedrigwassersituation zurück. Jedoch lag die Wassermenge immer noch bei nur 90 % des sonst üblichen Werts. Auch im Oktober waren die Durchflüsse in den Fließgewässern trotz leicht überdurchschnittlicher Regenmengen noch 10 % zu niedrig.

Der Inhalt der großen Talsperren wird nicht nur durch das Niederschlagsgeschehen, sondern auch von der Talsperrensteuerung beeinflusst. Die großen Talsperren, Eder- und Diemeltalsperre, wurden im Sommer zur Stützung der Oberweser abgelassen. Ab September wurde die Edertalsperre wieder leicht eingestaut. Ende Oktober war die Edertalsperre zu 19 % gefüllt.

Die hohen Lufttemperaturen, anhaltende Trockenheit und hohe Sonneneinstrahlung führten im Sommerhalbjahr 2022 vor allem in den Monaten Juni, Juli und August zu hohen Wassertemperaturen, die den Orientierungswert von 25 °C im Maximum anhaltend erreichten. Im Main lagen selbst die Nachtwerte nur wenig unterhalb der 25 °C-Marke und wurden im Maximum auch überschritten. Ein kurzfristiger Einbruch der Wassertemperatur war Mitte Juli über den Zeitraum von ungefähr einer Woche zu beobachten. Er führte zu einer Abkühlung auf 23 bis 24 °C im Main und teilweise sogar auf Werte kleiner 20 °C in den Gewässern Fulda, Kinzig und Werra. Durch die hohe Sonneneinstrahlung kam es zu verstärktem Algenwachstum und damit verbunden zu hoher Photosyntheseaktivität. Dies äußerte sich in tagsüber hohen und nachts niedrigen Sauerstoffgehalten. Die pH-Werte erreichten ebenfalls Maximalwerte von 9 und darüber. Seit September zeigen sich nur geringe Schwankungen und Tagesdynamiken in den kontinuierlich aufgezeichneten Messwerten. Die Photosynthese-Aktivität der Wasserpflanzen kommt zum Erliegen. Der milde Verlauf der Lufttemperatur bis in den Oktober spiegelt sich in den Wassertemperaturen wider. So lag etwa der Maximalwert an der Lahn in Oberbiel am 31. Oktober im vergangenen Jahr bei 9,8 °C, in diesem Jahr am 31. Oktober jedoch bei 13,3 °C.

Die modellierten Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Bodenfeuchte zeigen für Hessen zusammenfassend, dass die Wasserversorgung der Böden in allen Tiefenbereichen zu Beginn des Sommerhalbjahres 2022 im Mittel ausreichend bis sehr gut war. Die unterdurchschnittlichen Niederschläge und die zu warme Witterung sorgten mit dem Beginn der Vegetationsperiode allerdings landesweit für eine rasche Abnahme der Bodenfeuchte. Dadurch kam es vielfach zu starkem Trockenstress, der sich im Laufe des Sommers auch bis in die Unterböden ausbreitete. Ab etwa Mitte September sorgten die teils länger anhaltenden und ergiebigen Niederschläge für Entspannung und führten zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte zum Ende des Sommerhalbjahres.

Die von Mai bis August andauernde Trockenheit hat zu deutlich sinkenden Grundwasserständen geführt. Erst die ergiebigen Niederschläge im September sorgten vielerorts für erste Entspannungssignale und einer Trendwende im Grundwasser. Durch die Niederschläge im Oktober setzte sich die Entspannung fort. Trotz dieser leichten Entspannung kann für das Grundwasser noch nicht von einer nachhaltigen Erholung gesprochen werden. Das für diese Jahreszeit übliche Grundwasserstands-niveau wird weiterhin an vielen Messstellen deutlich unterschritten. Ende Oktober 2022 bewegten sich die Grundwasserstände in Hessen an knapp der Hälfte der Messstellen noch immer auf einem sehr niedrigen oder unterdurchschnittlichen Niveau. Dabei ist das aktuelle Defizit im Grundwasser nicht nur auf den trockenen Witterungsverlauf des Jahres 2022, sondern im Wesentlichen auf das hohe Niederschlagsdefizit des extrem trockenen Jahres 2018 und die trockenen Folgejahre 2019 und 2020 zurückzuführen.

Durch die in den letzten beiden Monaten angestiegene Bodenfeuchte herrschen zu Beginn des für das Grundwasser besonders wichtigen hydrologischen Winterhalbjahres (November bis April) günstige Randbedingungen für ein frühes Einsetzen des Grundwasserneubildungsprozesses. Ein nasses hydrologisches Winterhalbjahr könnte das bestehende Defizit im Grundwasser zwar nicht vollständig ausgleichen, aber zumindest deutlich verringern.

In Hessen wird die Problematik von Setzungsschäden aufgrund der Austrocknung von setzungsempfindlichen Bodenschichten immer deutlicher. Bei weiteren Trockenjahren ist gerade in Regionen, in denen diese setzungsempfindlichen Bodenschichten auftreten, vermehrt mit Schäden an der Bebauung infolge von Setzungen zu rechnen.

Informationen über setzungsempfindliche Bodenschichten in Hessen und deren Verbreitung sind auf der Internetseite des HLNUG abrufbar.

Weitere Informationen:

Klima – Klimaportal Hessen
<https://klimaportal.hlnug.de>

Wasserwirtschaftliche Monatsberichte
www.hlnug.de/themen/wasser/berichte/monatsberichte

Aktuelle Wasserstände
www.hlnug.de/messwerte/datenportal/grundwasser

Grundwasserinformationen zu Hessen
www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserstaende-und-quellschuettungen

Dürreinformationen zu Hessen
www.hlnug.de/themen/duerre

Bodenschichten in Hessen
www.hlnug.de/themen/geologie/georisiko-und-ingenieurgeologie/setzungsempfindliche-schichten

(aus: Pressemitteilung Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz vom 24. November 2022)

Mecklenburg-Vorpommern

Bedeutung von Küsten- und Hochwasserschutz

Im Rahmen einer internationalen wissenschaftlichen Vortrags- und Diskussionsveranstaltung in Prerow wurden Folgen der Sturmflut und den zukünftigen Herausforderungen im Küstenschutz behandelt. Dies auch mit Rückblick auf die historischen Ereignisse.

In der Nacht vom 12. zum 13. November 1872 stieg der Wasserstand an der südwestlichen Ostseeküste auf den höchsten je dokumentierten Wert an. Dabei verloren insgesamt 271 Menschen ihr Leben, mehr als 15.000 Menschen wurden obdachlos. Katastrophale Überflutungen und Landverluste waren die Folge.

Die Sturmflut von 1872 markiert einen Wendepunkt im systematischen, staatlich geförderten technischen Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Ziel ist es, mit technischem Küstenschutz und einem aktiven Hochwasserrisikomanagement im Ereignisfall den Verlust von Menschenleben und Sachwerten zu verhindern.

Der Küsten- und Hochwasserschutz ist dabei eine Daueraufgabe, die nie abgeschlossen sein wird. Insbesondere der steigende Meeresspiegel infolge des Klimawandels zwingt, ständig Anpassungen vorzunehmen und technisch immer auf dem neuesten Stand zu sein. Diese Aufgabe lässt sich nur in Abstimmung mit den betroffenen Städten und Gemeinden und unter Einbindung der örtlich zuständigen StÄLU bewältigen.

Diese Aufgabe lässt sich besser greifbar machen, wenn man sich in Erinnerung ruft, dass von den ca. 2.000 km Küste in Mecklenburg-Vorpommern 1.240 km als potenziell überflutungsgefährdet gelten. Ohne das Vorhandensein von Küstenschutzanlagen wäre im Falle einer Sturmflut eine Fläche von ca. 1.080 km² überflutet. Diese Fläche ist in etwa so groß wie die Hälfte des Saarlandes. Betroffenheiten ergeben sich auch durch den Rückgang der Steilküsten auf einer Länge von ca. 245 km. Fachleute haben im Zuge der Risikobewertung nach der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) ermittelt, dass sich das Gesamtschadenspotential an der Küste auf mehrere Mrd. € beläuft. Die größten Gefährdungspotenziale liegen dabei in den Städten wie Rostock, Greifswald oder Wismar.

Das Land investierte deshalb rund 20 Mio. € pro Jahr in den Küstenschutz. Im Jahr 2020 waren es sogar 22,2 Mio. €. Seit dem Jahr 1990 wurden insgesamt bereits mehr als 550 Mio. € in den Schutz der Außen-, Bodden- und Haffküsten investiert, um die Menschen und ihre Sachwerte bestmöglich vor den Naturgewalten zu schützen. Damit wurde grundsätzlich ein noch nie dagewesenes Schutzniveau erreicht.

Durch den klimabedingt steigenden Meeresspiegel steht man allerdings vor großen Herausforderungen. Mit der Anpassung der Küstenschutzstrategie versucht das Land Mecklenburg-Vorpommern schon heute, auf mögliche Veränderungen zu reagieren und eine Grundlage für einen langfristigen Schutz der im Zusammenhang bebauten Ortslagen zu schaffen. Dabei muss klar sein, dass nicht jeder Meter der Ostseeküste festgehalten werden kann. Die Strategie des Landes ist es, einen möglichst naturverträglichen Küstenschutz, d. h., Schutz vor Überflutung und Schutz vor Küstenrückgang zu betreiben. Der Küstenbereich

ist auch ein wertvoller Naturraum, den es zu erhalten gilt. Unzählige Arten leben hier, die zum Teil vom Aussterben bedroht sind und daher auf der Roten Liste stehen. Eine natürliche Küstendynamik ist dabei Grundlage für den Erhalt der Lebensräume.

Daher werden vom Land Mecklenburg-Vorpommern nur die im Zusammenhang bebauten Ortslagen und Küstenabschnitte, in denen Durchbrüche in die Bodden und Haffe drohen, mit technischen Bauwerken geschützt. In den anderen Küstenabschnitten soll die natürliche Küstendynamik – auch im Sinne der menschlichen Nutzungen an der Küste – erhalten bleiben. Die Küstenschutzstrategie des Landes wird derzeit an die neuen Informationen zum beschleunigten Meeresspiegelanstieg angepasst. Dazu werden im Rahmen des Kooperationsvorhabens "Ostseeküste 2100" u. a. verschiedene Szenarien des Meeresspiegelanstiegs betrachtet und die Auswirkungen auf die Sedimenttransportprozesse abgeschätzt.

In Prerow wurde nach der Sturmflut von 1872 der zur Ostsee offene Prerowstrom geschlossen. Er war einer der Gründe für die Überflutungen und die hohen Wasserstände. Doch das bedeutete das Ende für Fischerei und Bootsbau vor Ort. Seitdem gab es immer wieder Bestrebungen, einen Hafen an der Außenküste zu errichten. Mit dem vom Land beauftragten Inselhafen, dessen Bau im August 2022 begann, erhält Prerow nun nach ca. 150 Jahren wieder einen Hafen, in dem auch Fischereifahrzeuge liegen und wirtschaften können. Auch das Land führte im Jahr 2022 eine Veranstaltungsreihe zu den Folgen der Sturmflut sowie zu den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen im Küstenschutz durch.

Weitere Informationen:

Portal "Küstenschutz",
Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern
www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Umwelt/Wasser/Kuestenschutz

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern vom 11. November 2022)

Mecklenburg-Vorpommern

Schutz der Gewässer kann nur mit der Landwirtschaft funktionieren

Im Rahmen des 11. Dialogs zur Wasserrahmenrichtlinie wurden seitens Vertreter des Ministeriums für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt die Maßnahmen des Landes Mecklenburg-Vorpommern zur Reinhaltung der Landesgewässer vorgestellt. So wurde die bisher unveröffentlichte Fortschreibung des "Konzepts zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer und in das Grundwasser" vorgebracht und um Beteiligung bei der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie geworben.

Das in den Bewirtschaftungsplänen enthaltene Ziel – der gute ökologische und chemische Zustand für die oberirdischen Gewässer und der gute und mengenmäßige Zustand des Grundwassers – wird überwiegend in Mecklenburg-Vorpommern noch

nicht erreicht. Im Land verfehlen ca. 96 % der als Fließgewässer bewerteten und ca. 79 % der als Seen bewerteten Oberflächenwasserkörper den guten ökologischen Zustand. Zudem sind etwa 90 % der Grundwasserkörper in einem schlechten Zustand. Unter den als Küstengewässer bewerteten Wasserkörpern wurden alle schlechter als gut eingestuft.

Im ersten und zweiten Bewirtschaftungszeitraum wurden zur Verbesserung der Gewässerstruktur rund 690 Maßnahmen an über 1.000 km Fließgewässern umgesetzt. Und auch im dritten Bewirtschaftungszeitraum wird das Land seine Anstrengungen weiter verstärken.

Insgesamt enthält das Maßnahmenprogramm allein für den dritten Bewirtschaftungszeitraum ca. 7.000 Einzelmaßnahmen an rund 1.000 Wasserkörpern, für deren Umsetzung basierend auf einer nach bundesweit einheitlichen Kriterien durchgeführten Kostenschätzung ca. 800 Mio. € eingeplant werden.

Eine grundlegende Maßnahme zur Zielerreichung beim Grundwasser ist die Düngelandesverordnung. Es ist weiterhin geboten, die Nährstoffeinträge ins Grundwasser deutlich zu senken. Ohne das aktive Mitwirken der Landwirte können eine Nährstoffminderung und damit die Ziele der EG-Wasserrahmenrichtlinie nicht erreicht werden. Die erwähnte Fortschreibung des Konzeptes richtet sich deshalb an alle Akteure, die sich über mögliche Maßnahmen zur Minderung der diffusen Nährstoffbelastungen im Land Mecklenburg-Vorpommern informieren wollen. Es wurde im Rahmen des Dialogforums um eine aktive Teilnahme an den Forschungs- und Beratungsmaßnahmen durch das Stellen von Förderanträgen, das Bereitstellen von Daten und Flächen und durch die praktische Anwendung von Beratungsempfehlungen und Minderungsmaßnahmen in den betrieblichen Abläufen gebeten.

Weitere Informationen:

Portal "Wasser", Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt
www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Umwelt/Wasser

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern vom 3. November 2022)

Schleswig-Holstein

60 Jahre Schutzstation Wattenmeer e. V.

Seit 60 Jahren setzt sich die Schutzstation Wattenmeer für den Erhalt des Wattenmeeres ein. Anlässlich ihres 60-jährigen Jubiläums widmete sich im November 2022 der Naturschutzverein mit einem wissenschaftlichen Symposium im Christian-Jensen Kolleg, Breklum den aktuellen Herausforderungen im Wattenmeerschutzes.

In den 1960er Jahren drohten der beginnende Massentourismus und die Industrialisierung, den Naturraum Wattenmeer zu zerstören. Einige Aktive erkannten, dass mit den damaligen kleinen Vogelschutzgebieten dieser Entwicklung nicht zu begegnen war und gründeten im Jahr 1962 die Naturschutzgesellschaft Schutzstation Wattenmeer e. V., um ihre damals neuen Ideen

eines flächenhaften Naturschutzes von Land- und Meeresgebieten umsetzen zu können.

Die Schutzstation Wattenmeer ist seit Jahrzehnten ein wichtiger Impulsgeber und Partner für den langfristigen Erhalt des Lebensraums Wattenmeer. Es ist europaweit einmalig, dass eine Nichtregierungsorganisation ein solches Großschutzgebiet betreue. Besonders sei dabei das Engagement der über 100 Freiwilligen pro Jahr hervorzuheben, die hier ihr Freiwilliges Ökologisches Jahr bzw. einen Bundesfreiwilligendienst absolvieren.

Die Herausforderungen, vor denen man aktuell stehe, sind nicht weniger dramatisch als zur Gründungszeit: Durch den Klimawandel drohe das Wattenmeer buchstäblich zu versinken und die globale Erwärmung habe einen direkten Einfluss auf die Artenzusammensetzung.

Wissenschaftler vom Alfred-Wegener-Institut, List sowie vom Thünen-Institut gaben bei der Veranstaltung den 150 Gästen einen Einblick in aktuelle Forschungsprojekte im Lebensraum Nordsee und dem UNESCO-Weltnaturerbe Wattenmeer.

Weitere Informationen:

Naturschutzgesellschaft Schutzstation Wattenmeer e. V.
www.schutzstation-wattenmeer.de

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur Schleswig-Holstein vom 25. November 2022)

IKSR

Veröffentlichung eines Monitoring- und Bewertungssystems für Mikroverunreinigungen

Die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) befasst sich schon seit über zehn Jahren intensiv mit Mikroverunreinigungen und hat im Jahr 2019 den IKSR-Fachbericht Nr. 253 mit Maßnahmen-Empfehlungen zu deren Verringerung herausgegeben. Auf der 16. Rheinministerkonferenz am 13. Februar 2020 in Amsterdam wurde das Programm "Rhein 2040" verabschiedet, das als Zielvorgabe für das Rheineinzugsgebiet eine Reduktion der Einträge von Mikroverunreinigung um mindestens 30 % bis zum Jahr 2040 vorsieht.

Mikroverunreinigungen, auch bekannt als Spurenstoffe, sind in Wasser gelöste Schadstoffe, die nur mit großem Aufwand aus dem Wasser zu entfernen sind und auch in geringen Konzentrationen negative Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung und aquatische Ökosysteme haben können. Sie stammen aus verschiedenen Anwendungen wie Arzneimitteln, Industriechemikalien oder Pestiziden.

Auf europäischer Ebene zielt nun das "Zero Pollution Package" darauf ab, die Verschmutzung durch diese Mikroschadstoffe zu reduzieren. Dieses Bestreben wird konkretisiert durch die Vorschläge zur Aktualisierung der Stofflisten für die EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRRL), der Kommunalabwasserrichtlinie und der Industrieemissionsrichtlinie. Im Dezember 2022 hat die Europäische Kommission ihren "Zero Pollution Monitoring und Outlook Ansatz" veröffentlicht. Auch die Staaten im Rheineinzugsgebiet unternehmen auf verschiedenen Ebenen umfang-

reiche Anstrengungen um Mikroverunreinigungen zu reduzieren.

Um das Reduktionsziel regelmäßig überprüfen zu können, wurde nunmehr ein Monitoring- und Bewertungssystem entwickelt. Dieses europaweit wegweisende System wird als IKSR-Fachbericht Nr. 287 auf Deutsch, Französisch und Niederländisch veröffentlicht. Eine englische Fassung steht ebenfalls bald zur Verfügung.

Für die drei Emissionsbereiche für Mikroverunreinigungen ("Kläranlagen", "Industrie und Gewerbe" sowie "Landwirtschaft") werden 58 Stoffe überwacht. Diese Stoffe sind repräsentativ und können negative Auswirkungen auf die Schutzgüter "Trinkwasser" und "aquatische Ökosysteme" haben. Beispiele sind das Schmerzmittel Diclofenac, das u. a. in der Holzindustrie eingesetzte Melamin oder das Herbizid Nicosulfuron. Zu den überwachten Stoffen gehören auch die aus verschiedenen Quellen stammenden per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS). Die Stofflisten werden alle drei Jahre überprüft, so dass neue Indikatorstoffe aufgenommen oder nicht mehr relevante Stoffe gestrichen werden können.

Die Überwachung für die Emissionsbereiche Kläranlagen und Industrie erfolgt durch monatliche Messungen an den 12 Messstellen von Weil am Rhein bei Basel bis Maassluis bei Rotterdam, davon vier an den großen Nebenflüssen Aare, Neckar, Main und Mosel. Für Mikroverunreinigungen aus der Landwirtschaft wurden 36 Messstellen an kleineren Gewässern in landwirtschaftlich geprägten Gebieten im Einzugsgebiet des Rheins festgelegt.

Ergänzt werden die Messungen im Rheinwasser durch ein Schwebstoffmessprogramm der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die an drei Messstellen monatlich die Schwebstoffe

auf 50 Substanzen hin untersuchen wird. Schwebstoffe sind vom Fluss in Form feiner Partikel transportierte organische oder mineralische Feststoffe. Sie sind ein guter Indikator für den Langzeit-trend bei Verschmutzungen.

Die Bewertung des Reduktionsziels wird pro Stoff und Messstelle vorgenommen. Als Referenz dient der Zeitraum 2016 bis 2018. Um das Reduktionsziel von 30 % bis zum Jahr 2040 zu erreichen, muss für jeden Stoff die Fracht um durchschnittlich 1,5 % pro Jahr verringert werden. Für die Landwirtschaft wurde aufgrund der stark schwankenden Konzentrationen ein separater Bewertungsansatz gewählt, der sich an der Anzahl der Überschreitungen eines festgelegten Wertes orientiert.

In der Berichterstattung wird zukünftig tabellarisch für jeden Stoff und jede Messstation angegeben, ob die bisher gemessene Reduktion ausreichend (Ziel wird erreicht), gerade noch ausreichend (Ziel wird bei gleichbleibender Anstrengung erreicht) oder nicht ausreichend (Ziel wird nur erreicht, wenn die Anstrengungen intensiviert werden) ist. Die dreistufige Gesamtbewertung wird anhand der Ampelfarben visualisiert.

Eine Gesamtauswertung mit Berichterstattung in Form eines IKSR-Fachberichts wird alle drei Jahre vorgenommen, erstmals im Jahr 2024. Im Zuge dieser regelmäßigen Auswertung soll auch überprüft werden, ob es erforderlich ist, das Reduktionsziel zu verschärfen.

Weitere Informationen:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR
www.iksr.org

(aus: Pressemitteilung Internationale Kommission zum Schutz des Rheins vom 12. Dezember 2022)

Ausbildung

Wasser-Monitoring-Preis der Dr. Erich Ritter-Stiftung

Mit dem Ziel, engagierte Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler im Bereich der Wasserforschung zu fördern, startet die Dr. Erich Ritter-Stiftung im Stifterverband die Ausschreibung des Wasser-Monitoring-Preises 2023. Für die Auszeichnung, die sie gemeinsam mit der Water Science Alliance ins Leben gerufen hat nimmt die Ritter-Stiftung Bewerbungen und Vorschläge entgegen.

Wasser gilt als wichtigster Rohstoff des 21. Jahrhunderts. Bis zum Jahr 2050 wird die Weltbevölkerung auf 9 Mrd. Menschen anwachsen. Daraus resultieren sowohl weltweit als auch regional unterschiedliche Wasserprobleme, die vielfältige Anstrengungen in Forschung, Gesellschaft und Politik erfordern. Eine grundlegende Voraussetzung für die Bewältigung dieser Herausforderungen sind Analyse, Bewertung, Management und Prognose hydrologisch relevanter Umweltprozesse, insbesondere an terrestrischen und aquatischen Schnittstellen.

Der mit 50.000 € dotierte Preis wird an Einzelpersonen oder Tandems von Nachwuchsforscherinnen und -forschern vergeben, die aus Perspektive der physikalisch basierten Erdsystembeobachtung neue bzw. ergänzende Monitoringkonzepte oder innovative Feldmessmethoden und -kampagnen als Grundlage für eine prozessorientierte Modellierung von Hydrosystemen entwickeln. Die Auszeichnung soll dazu dienen, die Forschungsmöglichkeiten der Preisträger und Preisträgerinnen zu erweitern und Freiräume für neue Forschungsinitiativen zu schaffen.

Es sind sowohl Selbstbewerbungen als auch Vorschläge Dritter möglich. Antragsberechtigt sind Kandidatinnen und Kandidaten, die sich in der End-Phase ihrer Promotion oder in der PostDoc-Phase befinden. Aussagefähige Unterlagen mit Motivations schreiben, Lebenslauf, Kurzdarstellung des wissenschaftlichen Werdegangs der Antragstellenden, Publikationsliste, bis zu fünf einschlägigen Publikationen sowie einem Konzept über die geplante Verwendung des Preisgelds sind per E-Mail einzureichen; dabei sollten Motivationsschreiben und Konzept fünf Seiten nicht überschreiten.

Bei Selbstbewerbungen ist die Empfehlung eines zweiten Wissenschaftlers bzw. einer zweiten Wissenschaftlerin beizufügen. Bewerbungsfrist ist Dienstag, 28. Februar 2023.

Über die Vergabe des Preises entscheidet das Kuratorium der Stiftung auf der Grundlage einer wissenschaftlichen Jury. Die Verleihung des Preises erfolgt auf der Water Research Horizon Conference 2023.

Die Ritter-Stiftung wurde 1971 durch testamentarische Verfügung des Kaufmanns und Feinoptikers Dr. Erich Helmut Gottfried Ritter als nichtrechtsfähige Stiftung im Stifterverband errichtet. Mit dem Wasser-Monitoring-Preis, der im Dreijahresturnus vergeben wird, hat die Stiftung einen Förderpreis initiiert, der innovative Arbeiten junger Forschertalente im Bereich der Wasserforschung auszeichnet.

(aus: Pressemitteilung Stifterverband vom 27. Oktober 2022)

Interview

In dieser zweiten Folge der Kolumne "Interview" befassen wir uns mit der Thematik "Abfluss". Genauer gesagt mit der weltweiten Erfassung der Abflussdaten und wie diese nützlich sein können für vielerlei Anwendungen wie z. B. der hydrologischen Modellierung. Im Mittelpunkt der Folge steht dabei das Global Runoff Data Centre, kurz GRDC.

Das komplette Gespräch inklusive einiger Nachfragen und Erweiterungen kann erneut im HyWa-Podcast "WasserGespräche" verfolgt werden.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Lieber Uli – wir kennen uns persönlich sowie beruflich seit mehr als 30 Jahren und ich freue mich, nun in diesem Podcast über Dein jetziges Arbeitsfeld zu sprechen. Für alle, die das Weltzentrum Abfluss nicht kennen: Was macht ihr und was sind die wichtigsten Aufgaben?

Antwort Uli Looser:

Als Weltzentrum Abfluss ist es unsere Aufgabe, Datenproduzenten und Datennutzer der hydrologischen Größe "Abfluss" aus der ganzen Welt zu vernetzen. Das Datenzentrum übernimmt dabei die Aufgabe der Datenbeschaffung von unterschiedlichen hydrologischen Diensten und stellt dem Nutzer qualitätsgeprüfte Abflussdaten, also nicht Echtzeitdaten, sondern validierte, sogenannte Jahrbuch- oder historische Daten, zur Verfügung. Somit kann der Nutzer sich direkt seiner wissenschaftlichen Aufgabe widmen, ohne viel Zeit für die Datenbeschaffung investieren zu müssen.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Oft geht mit dem Messen des Abflusses auch die Temperaturmessung oder die Messung physio-chemischer Parameter einher. Wieso sammelt das GRDC nur Abflussdaten und nicht auch andere hydrologische Daten?

Antwort Uli Looser:

Das GRDC ist eines unter weiteren globalen Datenzentren, die für die Erfassung unterschiedlicher Parameter des hydrologischen Kreislaufs zuständig sind. So gibt es unter den Partnerdatenzentren zum Beispiel GEMStat, zuständig für Wassergüteparameter, IGRAC für Grundwasserinformationen und GPCC für den Niederschlag. Von Anfang an war das GRDC für den Abfluss zuständig. Ob das GRDC in Zukunft zum Beispiel Daten zu Wasserständen in den Flüssen erfasst, ist letztendlich eine Ressourcenfrage.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Die Daten, die in die GRDC-Datenbank einfließen, werden von den verschiedenen nationalen hydrologischen Diensten auf Eigeninitiative zur Verfügung gestellt. Wie zuverlässig läuft die Datenzulieferung an das GRDC ab?



Uli Looser
Foto: BfG

Antwort Uli Looser:

Es gibt nur sehr wenige hydrologische Dienste, die von sich aus in regelmäßigen Abständen Daten an das GRDC liefern. Datenanfragen werden deshalb gezielt an Länder gerichtet, bei denen der Datentransfer zu erwarten ist oder die sich dazu bereit erklärt haben. Viele Datenanfragen bleiben auch trotz Versprechungen unbeantwortet. Oft bedarf es auch aufwändiger Korrespondenz, bis Daten geliefert werden, wobei es keine Garantien für Datenlieferungen gibt. Einige Länder verweisen auch auf ihre Datenportale, wo sich das GRDC bedienen darf, um dann die Daten mit Genehmigung weiterzuverteilen. Leider gibt es in vielen Ländern mehr als einen Ansprechpartner, denken wir doch allein einmal als Beispiel an die Bundesrepublik: 16 Landesbehörden und dann noch die Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, die alle Abflussdaten erheben.

Bei einigen Ländern hat das GRDC auch direkten Zugriff auf die Datenbanken und kann von dort gezielt auf dem elektronischen Weg die aktuellsten qualitätsgeprüften Daten beziehen.

Nachfrage Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

In welchem Turnus werden sie erhoben und in welcher Regelmäßigkeit erhaltet ihr diese Daten – monatlich, jährlich etc.?

Antwort Uli Looser auf Nachfrage:

Das GRDC führt in seiner Datenbank qualitätsgeprüfte Abflussdaten (Jahrbuchdaten) von mittleren Tages- und Monatswerten. Seitens des GRDC besteht nicht die Absicht, alle vorhandenen Abflussmessstationen zu erfassen. Die Stationen, für die es Daten in der GRDC-Datenbank gibt, sollten gewisse Kriterien erfüllen.

Dazu gibt es drei Themenbereiche:

(1) Erstens sollten die Stationen die Hydrologie des Flusses oder der Region widerspiegeln.

(2) Zweitens sollten die Stationen im Mündungsbereich großer Flüsse vertreten sein, um den Frischwassereintrag in die Weltmeere besser quantifizieren zu können. Natürlich sollten diese Stationen außerhalb des Gezeitenbereichs liegen.

(3) Schließlich sind Stationen mit minimalen menschlichen Einflüssen, wie Stauwehren, Bewässerung, starker Bebauung usw. besonders für Studien zum globalen Wandel relevant. An diesen Stationen besteht im Rahmen des Klimawandels ein starkes Interesse. Meist liegen diese Stationen in sehr kleinen Einzugsgebieten. Somit wird ein weites Spektrum an Flüssen am GRDC erfasst.

Zusätzlich hat das GRDC auch eine Archivaufgabe zu erfüllen, um hydrologische Daten aus Diensten mit unzureichender Datensicherung oder aus Konfliktregionen zu sichern und bei Bedarf dem ursprünglichen Datenproduzenten wieder zur Verfügung zu stellen. Dies ist auch schon wiederholt passiert.

Im Idealfall möchte das GRDC die Datenbestände in jährlichen Abständen aktualisieren. Dies ist aber bei fast allen Datenproduzenten nicht möglich, da die Qualitätssicherung und das Prüfen der Daten oft längere Zeit in Anspruch nehmen.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Für die Bereitstellung der Abflussdaten gibt es keinerlei Vergütung oder Provisionen, auch nicht an wirtschaftlich weniger entwickelte Länder. Wie lässt sich daher der kontinuierliche Datentransfer dennoch aufrechterhalten?

Antwort Uli Looser:

Für den Datenaustausch ist es wichtig, Ansprechpartner in den nationalen hydrologischen Diensten zu haben. Das Aufbauen einer Vertrauensbasis und die regelmäßige Pflege der Kontakte zu den vielen Ländern ist absolut bedeutend, damit diese bereit sind, Daten dem GRDC zur Verfügung zu stellen. Oft wird der Datenaustausch auch unterbrochen, da die Kontakt- bzw. Ansprechpersonen gewechselt haben. Dann muss man wieder von vorn anfangen.

Viele Länder haben zudem eine sehr restriktive Datenpolitik, die den Austausch der Daten unterbindet, oder aber die Daten sind

nur gegen Bezahlung erhältlich. Das Bezahlen der Daten ist für das GRDC ein No-Go:

Zum einen ist das GRDC an WMO-Resolutionen zum freien Datenaustausch gebunden. Zum anderen kann das GRDC das Geschäftsmodell der Länder, die Geld für ihre Daten verlangen, nicht unterlaufen.

Nachfrage Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Und welches Land hat die größte Anzahl an Messstationen, die Daten für das GRDC liefern?

Antwort Uli Looser auf Nachfrage:

Die größten Länder nach Fläche sind im GRDC auch mit den meisten Stationen vertreten, bis auf eine Ausnahme. Allerdings gibt es unter diesen Ländern große Unterschiede bei der Bereitschaft, die Daten am GRDC zu aktualisieren. So stehen die USA und Kanada unter den großen Ländern an vorderster Stelle, wenn es um die Bereitstellung von Daten geht. Aber auch mit anderen großen Staaten wie z. B. Brasilien, Australien oder Südafrika ist der Datenaustausch unproblematisch.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Welche Bedeutung hat die hydrologische Größe "Abfluss" bei der Betrachtung der Entwicklung des Klimasystems? Und warum ist die Messung des Abflusses wichtig?

Antwort Uli Looser:

Die hydrologische Größe "Abfluss" wurde vom "Global Climate Observing System (GCOS)" als eine der wichtigen Klimavariablen identifiziert. Der Eintrag von Süßwasser in die Weltmeere hat Einfluss auf die Temperaturverteilung und den Salzgehalt der Meere und dadurch auch auf die ozeanografischen Zirkulationssysteme. Das Abflussverhalten vieler Flüsse wurde durch anthropogene Eingriffe stark verändert.

Somit ist es nicht einfach, Klimasignale direkt aus dem Abflussverhalten der Flüsse zu erkennen. Hierzu müssen Stationen in möglichst unbeeinflussten Gebieten herangezogen werden, um dann Änderungen im Abflussverhalten zu erkennen. Diese Änderungen können aufgrund steigender Temperaturen, verfügbares Schmelzwasser, ein sich zeitlich änderndes Niederschlagsverhalten sowie Starkregen oder Trockenphasen ausgelöst werden.

Das Beobachten der Fließgewässer war somit von jeher wichtig: Für die Nutzung in der Bewässerungslandwirtschaft, für den Transport von Gütern oder Flößen von Hölzern, aber auch für die Überbrückung von Trockenzeiten sowie die Bebauung außerhalb der Überschwemmungsbereiche und die Errichtung von sicheren Verkehrswegen, Furten und Brücken, ist ein gutes Verständnis der Fließgewässer Voraussetzung. Ein umfangreiches Messen ermöglicht zudem eine geplante Verteilung der verfügbaren Ressource Wasser unter den unterschiedlichen Nutzern wie Ökologie, Landwirtschaft, Industrie, Transport, Energiegewinnung, menschlicher Nutzung und Erholung. Heute werden natürlich die Abflussbeobachtungen als wichtige Variable in hydrolo-

gische und hydraulische Modellierungen integriert, wobei die geprüften Daten des GRDC als Eingangsparameter, aber auch zur Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle, zum Beispiel hydrodynamische-, hydraulische-, Stofftransport- oder Einzugsgebietsmodelle, herangezogen werden.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Wo wird der Abfluss, der für das GRDC wichtig ist, innerhalb eines Flusssystemes oder Flusseinzugsgebietes gemessen?

Antwort Uli Looser:

In der Regel wird der Abfluss an vordefinierten Pegelstationen indirekt auf Grundlage des Querprofils sowie der Fließgeschwindigkeit in Bezug zum Wasserstand ermittelt, sodass eine Wasserstands-Abflussbeziehung erstellt werden kann. Dadurch ist mit dem Ablesen des Pegelstands der Abfluss bekannt. Oft dienen auch markante Punkte wie Brücken und Staustufen als Pegelstationen, aber besonders in kleineren Flüssen werden auch spezielle Messwehre errichtet.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Was ist das Alleinstellungsmerkmal des GRDC's? Welche Relevanz hat es mit seinen mitunter langen Zeitreihen an Abflussmessungen für Industrie, Wirtschaft, aber auch für die Wissenschaft?

Antwort Uli Looser:

Das GRDC beherbergt die umfangreichste globale Abflussdatenbank. Der ständig wachsende Datensatz umfasst zurzeit Abflussdaten von knapp 11.000 Stationen aus 160 Ländern. Insgesamt verfügt das GRDC über ca. eine halbe Million Stationsjahre an Daten mit einer durchschnittlichen Zeitreihenlänge von 46 Jahren.

Seit dem Jahr 2019 sind die GRDC-Abflussdaten auch offiziell Teil des Klimadatenkatalogs der Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen (World Meteorological Organization, WMO). Ein WMO-Expertenteam evaluiert die Datensätze, bevor sie als vertrauenswürdig in den Klimadatenkatalog aufgenommen werden. Mit dieser Auszeichnung finden Wissenschaftler und Klimaforscher aus der ganzen Welt leichter zu den GRDC-Daten und -Datenprodukten.

Besonders die Wissenschaft nutzt die Abflussdaten des GRDC zur Kalibrierung und Validierung unterschiedlicher Modelle aus den Bereichen Hydrologie, Klima und Ozeanographie sowie Forschende, die mit satellitengestützten Radar- und gravimetrischen Daten Messungen zu Wasserständen und der Verteilung der Wasserressourcen vornehmen. Aber auch für Wasserwirtschaftsfragen, besonders in grenzüberschreitenden Einzugsgebieten, werden die Daten der GRDC angefordert.

Industrie und Wirtschaft sind an der Verfügbarkeit von Wasserressourcen für einen profitablen Betrieb ebenso interessiert, um einer sicheren Standortwahl gerecht zu werden.

Nachfrage Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Welche zeitliche Auflösung haben die Daten und wie weit in die Vergangenheit gehen die Aufzeichnungen zurück? Für wen sind die unterschiedlich zeitlichen Auflösungen der Abflussmessungen wichtig? Die Datengrundlage für Flussgebietsmodellierer unterscheidet sich ja z. B. für Klimamodellierer.

Antwort Uli Looser auf Nachfrage:

Die zeitliche Auflösung der qualitätsgeprüften Abflussdaten sind mittlere Tages- und Monatswerte. Leider haben wir für ca. 20 % der Stationen, überwiegend in Asien und Afrika, nur Monatswerte vorliegen. Diese reichen aber in der Regel für klimabezogene Studien aus. Tageswerte werden für viele hydrologische Modelle, für wasserwirtschaftliche Fragen und für die meisten anderen Anwendungen benötigt. Allerdings steigt die Anfrage nach Daten mit einer noch höheren zeitlichen Auflösung, besonders zur Kalibrierung von Hochwasservorhersagen, aber da können wir leider noch nicht mit dienen.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Kannst Du kurz ein paar Projekte skizzieren, die von den Abflussdaten, die das GRDC bereithält, profitieren?

Antwort Uli Looser:

Hier möchte ich an erster Stelle beispielhaft globale Projekte verschiedener UNO-Organisationen erwähnen. GRDC-Daten werden zur Beurteilung der Verfügbarkeit von Wasserressourcen im Rahmen der nachhaltigen Entwicklungsziele herangezogen und auch im Zusammenhang mit Wassergütedaten werden chemische Frachten berechnet. Zur Kalibrierung und Validierung von hydrologischen Dürre- und Hochwasserüberwachungsdiensten, die von den Mitgliedsländern der WMO, aber auch Hochschul- und Forschungszentren entwickelt werden, benutzt man GRDC Daten. Projekte des "World Climate Research Programmes" der WMO verwenden Abflussdaten für Studien der arktischen Hydrologie und unterschiedlicher Monsunsysteme. Studien des GCOS (Global Climate Observing System) zur Quantifizierung des globalen Wasserkreislaufs verwenden die GRDC-Berechnungen zum Frischwassereintrag der Flüsse in die Weltmeere.

Viele Forschungseinrichtungen aus aller Welt verwenden desgleichen GRDC-Daten in ihren Forschungsprojekten zum globalen Wandel, in denen die Hydrologie eine wichtige Rolle spielt. Natürlich haben auch etliche Studierende ihre hydrologischen Abschlussarbeiten mit Hilfe von GRDC-Daten erstellt.

Bei den Datenanfragen erfassen wir einige Angaben zu den Nutzern. Somit können wir sagen, dass über 90 % aller Datenanfragen von Universitäten und wissenschaftlichen Einrichtungen kommen. Rund Dreiviertel aller Studien haben einen Klima- oder hydrometeorologischen Bezug.

Als globales Datenzentrum sind wir auch besonders stolz darauf, dass wir nicht nur Daten aus vielen Ländern haben, sondern in

den letzten zwei Jahren Daten an Nutzer aus mehr als 130 Ländern liefern konnten.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Nun eine ganz andere Frage, Uli: Weshalb wurde das GRDC mit seiner Gründung im Jahr 1988 an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) etabliert? Denn es hätte ja wohl auch in vielen weiteren Ländern, die der Weltorganisation für Meteorologie zugehörig sind, eingerichtet werden können.

Antwort Uli Looser:

In den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts hat die WMO Abflussdaten für das erste globale Atmosphären-Forschungsprogramm erhoben. Dieser Datensatz wurde Prof. Baumgartner an der Uni München zur Verwahrung anvertraut. Nachdem Prof. Baumgartner in den Ruhestand ging, hat man eine neue Bleibe für den Datensatz gesucht. Die damaligen Präsidenten des Deutschen Wetterdienstes und der BfG konnten die WMO überzeugen, dass mit der Einrichtung des GRDC an der BfG dieser hydrologische Datensatz bewahrt, gepflegt und erweitert werden konnte, um weitere Projekte der WMO, UNESCO und der gesamten globalen Forschungsgemeinschaft zu unterstützen. Seitdem ist der Datenbestand von den ursprünglich 3.500 Stationen beachtlich gewachsen und gilt heute als der umfassendste globale Abflussdatensatz. Es gab auch weitere WMO-Mitgliedsländer, die ihr Interesse an den Daten gezeigt hatten. Heute pflegt das GRDC gute Beziehungen zu den damaligen Mitbewerbern.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Neben der Datenbereitstellung hat das GRDC auch selbst eine ganze Reihe von Projekten auf den Weg gebracht. Welche sind besonders erwähnenswert aus deiner Sicht?

Antwort Uli Looser:

In den letzten 20 Jahren hat das GRDC eine Reihe GIS-basierter Produkte entwickelt und angeboten. So wurden die WMO-Regionen und Subregionen für die WMO kartographisch auf GIS umgesetzt und vor 2 Jahren komplett überarbeitet. Die großen Einzugsgebiete und die großen Flüsse wurden in einem einheitlichen globalen GIS-Produkt erstellt und auch vor zwei Jahren überarbeitet. Für die meisten GRDC-Stationen gibt es stationsbasierte Einzugsgebiete, die im GIS-Format zusammen mit den Abflussdaten zur Verfügung gestellt werden.

Mit unterschiedlichen Ansätzen hat das GRDC im Laufe der Jahre den Frischwassereintrag in die Weltmeere ermittelt. Die jüngste Version basierend auf dem globalen hydrologischen Modell WaterGAP wird jetzt vom GRDC als Web-Applikation angeboten.

Das GRDC war auch maßgeblich an der Entwicklung von WaterML2 zum Austausch hydrologischer Daten beteiligt, jetzt einem OGC (Open Geospatial Consortium)- und WMO-Standard.

Die Entwicklung eines Datenportals zur Bereitstellung der GRDC-Daten wurde im Jahr 2020 abgeschlossen. Jetzt können GRDC-Daten nutzerfreundlich in verschiedenen Formaten bezogen werden. Das Portal (<https://portal.grdc.bafg.de/>) wurde sehr gut angenommen und wir sind um Verbesserungen und Erweiterungen bemüht.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Gibt es zukünftige Entwicklungen am GRDC, Pläne zu Erweiterungen oder Entwicklungen?

Antwort Uli Looser:

Der technologische Wandel macht nicht vor dem GRDC halt. Gerade sind wir dabei, die GIS-Produkte und statistischen Analysen der Datenbestände in nutzerfreundliche Web-Applikationen zu verwandeln. Auch unser Internetauftritt wird überarbeitet.

Die Aktualisierung und Erweiterung der elektronischen Schnittstellen zur Übertragung in den GRDC-Datenbestand werden untersucht. Hydrologische Projekte an der WMO sollen auch mit Datenschnittstellen unterstützt werden. Zudem ist für uns im GRDC eine gute Zusammenarbeit mit den Partnerdatenzentren wichtig, da in viele unserer Projekte oft unterschiedliche Datensätze einfließen, wie z. B. Niederschlag und Wassergüte.

Es gibt viele weitere Ideen, aber hier möchte ich nicht falsche Erwartungen wecken. Als vierköpfiges Team sind wir voll ausgelastet und unser Hauptanliegen ist es, Wissenschaft, Forschung und Lehre mit umfangreichen, aktuellen und qualitätsgeprüften Abflussdaten zu unterstützen.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Zum Abschluss des Interviews noch eine persönliche Frage: In deinem beruflichen Leben bist du viel in der Welt herumgekommen und hast deine Expertise in zahlreichen Projekten und Institutionen einfließen lassen. Wie kam es zu diesem interessanten Werdegang?

Antwort Uli Looser:

Als gebürtiger Deutscher bin ich in Namibia auf einer Farm aufgewachsen und somit war die Verfügbarkeit von Wasser recht früh von Interesse. Nach meinem Geographiestudium an der Universität in Gießen war ich von 1984 bis 1993 am Hydrological Research Institute in Pretoria, Süd Afrika tätig. Von 1993 bis 2005 folgte die Beschäftigung am Institute for Water Quality Studies, auch in Pretoria. Nach zwei Jahren Selbstständigkeit kam ich im Jahr 2007 an die Bundesanstalt für Gewässerkunde, um die Leitung des Weltdatenzentrums Abfluss, GRDC zu übernehmen. Sprachkenntnisse und das Leben und Arbeiten in unterschiedlichen Kulturkreisen sind für meine Tätigkeit von großem Vorteil.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Ganz herzlichen Dank, Uli, an Dich für das sehr informative Gespräch in dieser zweiten Folge des HyWa-Podcasts "Wasser Gespräche".

Wie wir heute von Dir gehört haben, ist ein Weltdatenzentrum wie das GRDC zusammen mit den anderen Weltdatenzentren bedeutend, um gerade auch internationale hydrologische Forschung über Ländergrenzen hinweg voranzubringen. Die Daten des GRDC helfen dabei, Klimaveränderungen zu erkennen, die weltweiten Wasserressourcen besser zu nutzen und vor allem bei der Kalibrierung und Validierung von Klimamodellen.

In der nächsten Folge wird Prof. Dr. Lucas Menzel, Dozent am Geographischen Institut der Universität Heidelberg, zum Thema "Schneehydrologie" als Gesprächspartner zur Verfügung stehen. Unter anderem wird es um die Thematik der Permafrostböden gehen, die ja derzeit mit Blick auf den Klimawandel im besonderen Fokus stehen.

Weitere Informationen:

GRDC (Global Runoff Data Centre)
www.bafg.de/GRDC



Willkommen bei "WasserGespräche" – der neue Podcast der Fachzeitschrift "Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, HyWa"

Hier trifft sich die HyWa-Redaktion etwa einmal im Quartal mit Fachleuten und Experten aus dem gesamten Bereich der Gewässerkunde und Hydrologie, aber auch aus den Bereichen Limnologie & Grundwasser, Klimatologie & Meteorologie sowie Geologie & Bodenkunde und spricht dabei mit ihnen über aktuelle Themen und Fragestellungen sowie interessante Forschungsfelder rund um diese Themenbereiche.

Der Podcast ist erreichbar auf:

- HyWa-Internetseite:
<https://www.hywa-online.de/podcast-wassergespraech>
- Apple Podcasts:



<https://podcasts.apple.com/de/podcast/hywa-wassergespraech/id1642502969>

- Spotify:



<https://open.spotify.com/show/0AgygEJKHu99IrmHwtb4GU>

Wir wünschen viel Interesse beim Zuhören.

*Dr. Thomas Lüllwitz/Schriftleitung,
Stefanie Wienhaus/Redaktion*

Projektbericht

Rekonstruktion der Hochwasserwelle der Ahr im Juli 2021 mithilfe eines hydraulischen Modells des Rheins

Das katastrophale Hochwasser am 14./15. Juli 2021 an der Ahr hat viele Messstationen entlang des Flusses zerstört. Daher gibt es eine große Lücke in den gemessenen Wasserstands- und Abflussdaten, besonders im Bereich der nächtlichen Hochwasserspitze. Mehrere Studien haben im Nachgang mit verschiedenen Methoden versucht, die Hochwasserganglinie(n) sowie den Scheitelwert der Flut an unterschiedlichen Standorten im Ahrgebiet zu rekonstruieren. Auch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) hat bereits kurz nach dem Ereignis auf Anfrage des rheinland-pfälzischen Landesamts für Umwelt (LfU RP) mithilfe ihres hydrodynamisch-numerischen 1D-Modells für den Rhein, in den die Ahr mündet, und mittels gemessener Rheinwasserstände Anstrengungen unternommen, um ebenfalls einen Beitrag zur Verbesserung der mangelnden Datenlage zu liefern. Diese ad hoc durchgeführten Modellierungen erbrachten Erkenntnisse zum Abflussgeschehen unmittelbar an der Mündung der Ahr, die sich gut in das Gesamtbild der Ergebnisse anderer Untersuchungen einpassen. Es zeigt sich, dass die indirekte, über das Modell des Rheins durchgeführte Rückrechnung der Ahrwelle, eine schnelle und einfache, aber dennoch belastbare Methode zur Rekonstruktion des Hochwassers unter den gegebenen Umständen war.

1 Einleitung

Das katastrophale Hochwasser, das in der Nacht vom 14. auf den 15. Juli 2021 mit einer gewaltigen Flutwelle über das Ahrtal hereinbrach, sorgte für großes menschliches Leid (134 Tote) und für eine erhebliche Zerstörung privater und öffentlicher Infrastruktur. Zwei Drittel der über 100 Brücken im Ahrtal, zahlreiche Versorgungsleitungen sowie über 9.000 Gebäude wurden zerstört oder beschädigt (LFU RP, 2022). Parallel zu den unmittelbar nach dem Hochwasser anlaufenden Hilfsaktionen und Aufräumarbeiten haben die verantwortlichen Behörden mit einer Aufarbeitung der hydrologischen Ereignisse begonnen. Eine schnelle und lückenlose Analyse des Wetter- und Abflussgeschehens im Ahrtal wurde u. a. benötigt, um die Flut vor dem Hintergrund bereits abgelaufener Ereignisse einordnen zu können – denn bereits fünf Jahre zuvor hatte sich im Ahrtal ein Hochwasser ereignet, das nach bis dato gültiger Pegelstatistik als ein mindestens 100-jährliches Ereignis klassifiziert (LFU RP, 2016) und nun offensichtlich um ein Vielfaches übertroffen wurde. Die Beantwortung der in der Fachwelt und der breiten Öffentlichkeit vielfach aufgeworfenen Frage, ob die extreme Ausprägung des Ahrhochwassers im Juli 2021 auf den Klimawandel zurückzuführen sei (KREIENKAMP et al., 2021), bedurfte ebenso einer verlässlichen Rekonstruktion des Ereignisses wie die politische und z. T. strafrechtliche Aufarbeitung der Geschehnisse, die immer noch andauert. Schlussendlich fußen auch jene Grundlagen (z. B. festgesetzte Überschwemmungsgebiete) darauf, die für den Wiederaufbau oder die zukünftige Planung von

Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements herangezogen werden.

Während erste konsolidierte Beschreibungen des meteorologischen Geschehens bereits innerhalb einer Woche nach dem Hochwasser verfügbar waren (JUNGHÄNEL et al., 2021), war man bei der Rekonstruktion des Wellenablaufs an der Ahr mit besonderen Schwierigkeiten konfrontiert. Das Hochwasser hatte aufgrund seines Ausmaßes nicht nur Straßen, Brücken und Gebäude zerstört, sondern auch die an der Ahr gelegenen Pegelmessstationen. Für den Ort Altenahr im mittleren Ahrtal beispielsweise, der oftmals im Fokus der medialen Berichterstattung stand, liegen am dortigen Pegel¹ letzte Messdaten für den Abend des 14. Juli vor (20:45 Uhr, < 6 m Wasserstand am Pegel). Anhand von Hochwassermarken wurde ein maximaler Wasserstand von über 10 m rekonstruiert, der für den Zeitraum um Mitternacht angenommen wird (LFU RP, 2022). Selbst wenn die Messeinrichtungen der Pegel noch intakt waren, dann sorgten die gravierenden morphologischen Veränderungen des Flussbetts und die beobachteten Verklausungen zahlreicher Brücken dafür, dass die bis dato gültigen Wasserstand(W)-Abfluss(Q)-Beziehungen nicht mehr anwendbar waren, um im Nachgang die Hochwasserabflüsse – und dabei insbesondere die Scheitelabflüsse – zu bestimmen.

Zahlreiche (Ad-hoc-)Studien haben deshalb im Nachgang zum Hochwasser versucht, die Ganglinie des Hochwassers sowie seinen Scheitel an unterschiedlichen Standorten im Ahrgebiet zu ermitteln. ROGGENKAMP & HERGET (2022) rekonstruierten die Spitzenabflüsse für acht Untersuchungsstandorte an der Ahr über eine Methode, die für historische Hochwassermarken im Ahrtal bereits Anwendung gefunden hatte (HERGET et al., 2014). BELLEFLAMME et al. (2021) und LFU RP (2022) setzten hydrologische Modelle ein, wobei die Verwendung verschiedener Niederschlagsprodukte und Modelleinstellungen (z. B. zur Bodenfeuchte) zu einer Bandbreite an möglichen Spitzenabflüssen führten. Vom LfU RP wurden diese zusätzlich über 2D-hydraulische Modellberechnungen und über die so ermittelten Überschwemmungsflächen plausibilisiert. Die BfG hat im Kontext der Hochwasserrekonstruktion auf Anfrage des LfU RP mithilfe ihres hydrodynamisch-numerischen 1D-Modells für den Rhein, in den die Ahr mündet (Abb. 1), und mittels gemessener Rheinwasserstände Untersuchungen durchgeführt, um ebenfalls einen Beitrag zur Verbesserung der mangelnden Datenlage zu liefern. Die Modellierungen erbrachten Erkenntnisse zum Abflussgeschehen und insbesondere zum Scheitelabfluss unmittelbar an der Mündung der Ahr in den Rhein. Methodik und Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

¹ Maximaler Wasserstand beim Hochwasser im Jahr 2016 am Pegel Altenahr: 371 cm (LFU RP, 2016)

**Abbildung 1**

Die Mündung der Ahr in den Rhein bei Sinzig. Rechts ist die Ortschaft Kripp zu sehen. Foto vom August 2009 (Quelle: Wikipedia, Urheber: Wolkenkratzer, Creative Commons).

2 Methode

Zur Rekonstruktion der Ahrwelle wurde ein kurzer Abschnitt des in der BfG betriebenen hydrodynamisch-numerischen 1D-Modells des freifließenden Rheins zwischen den Pegeln Andernach und Bonn eingesetzt. Die gewählte Vorgehensweise fußt dabei auf der Annahme, dass der überwiegende Teil der Abflussveränderung zwischen den beiden Rheinpegeln auf den Zufluss der Ahr zurückzuführen ist. Diese Voraussetzung konnte im Nachgang der Berechnungen für das Hochwasser im Juli 2021 bestätigt und damit die Belastbarkeit der Modellierungsergebnisse gestärkt werden.

2.1 1D-SOBEK-Modell des freifließenden Rheins

Seit Ende der 1990er-Jahre betreibt die BfG hydrodynamisch-numerische 1D-Modelle für den Rhein auf Basis der niederländischen Software SOBEK. Das für die Rekonstruktion der Ahrwelle eingesetzte Modell wurde in den Jahren 2012 bis 2014 für den gesamten freifließenden Rhein vom Pegel Iffezheim (Rhein-km 336,2) bis zum Pannerdense Kop in den Niederlanden (Rhein-km 867,3) aufgebaut (HKV HYDROKONTOR, 2014) und im Jahr 2017 auf der Niederrheinstrecke nochmals überarbeitet (RIQUEST, 2017). Es wird für großräumige Aufgabenstellungen in verschiedensten Abflussbereichen im stationären und im instationären Modus eingesetzt, u. a. für die Niedrig- und Mittelwasservorhersage, Wirkungsanalysen für das Nationale Hochwasserschutzprogramm sowie Überprüfung des gleichwertigen Wasserstands GIW für die Schifffahrt.

An die Kalibrierung des Modells mittels gemessener Pegel- und Wasserspiegelfixierungen bei Niedrig- bis Hochwasser

wurden folgende Anforderungen gestellt (HKV HYDROKONTOR, 2014):

- Wasserstandsdifferenzen für Niedrig- und Mittelwasser < 10 cm, an den Pegeln < 5 cm;
- Wasserstandsdifferenzen für Hochwasser < 10 bis 20 cm, an den Pegeln < 5 bis 10 cm;
- Abflussdifferenz im Scheitelbereich < 5 bis 10 %;
- Abweichung des modellierten Scheiteleintrittszeitpunkts < 2 bis 3 Stunden.

Durch die Kalibrierung mit der o. g. Zielsetzung soll eine geeignete Modellgüte nicht nur an den Pegeln, sondern auch auf der Modellstrecke zwischen den Pegeln erzielt werden. Für die Rekonstruktion der Ahrwelle wurde aus dem vorliegenden Modell ein ca. 40 km langer Teilabschnitt zwischen den Pegeln Andernach (stromaufwärts, Rhein-km 613,8) und Bonn (stromabwärts, Rhein-km 654,8) ausgeschnitten (Abb. 2). Für die beiden Pegel liegen von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowohl gemessene Wasserstände als auch über aktuelle Abflusskurven aus den Wasserständen berechnete Abflüsse, jeweils in 15-Minuten-Werten, vor. Als obere Randbedingung wurden im Modell die gemessenen Abflüsse am Pegel Andernach, als untere Randbedingung die aktuell gültige Abflusskurve am Pegel Bonn verwendet. Die gemessenen Wasserstände des Pegels Oberwinter (9 km unterstrom der Ahrmündung) wurden hinzugezogen, um die Ahrganglinie im Rahmen der Rekonstruktion feinzustimmen (Kap. 2.2 bzw. 3).

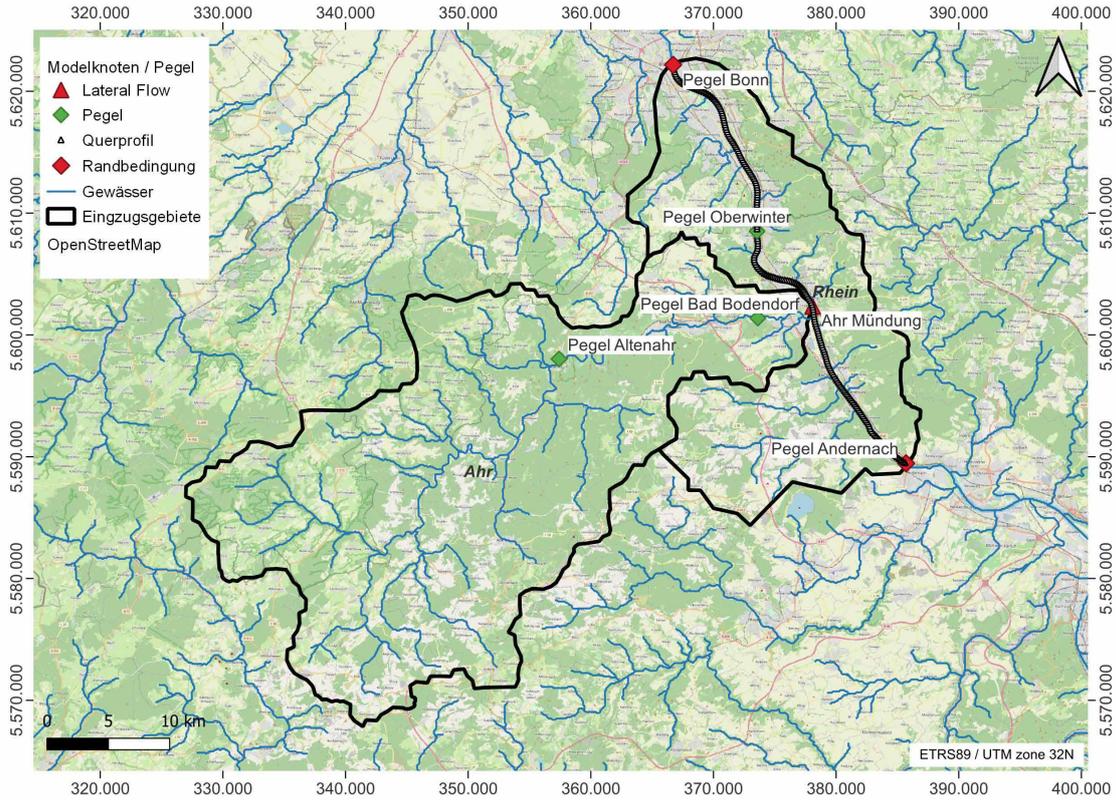


Abbildung 2

Einzugsgebiet des Rheins zwischen Andernach und Bonn sowie Ausschnitt des verwendeten Rhein-Modells und Lage wichtiger Pegel (Hintergrund: @OpenStreetMap Contributors, 2022).

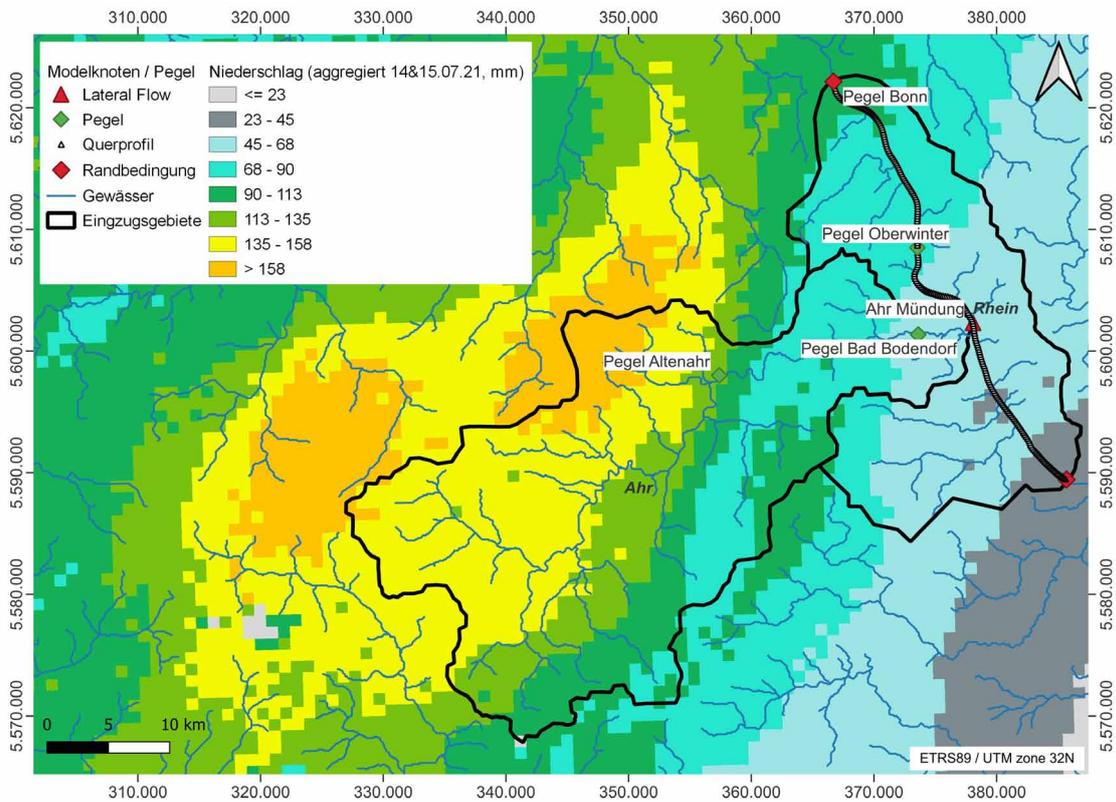


Abbildung 3

Aggregierter Niederschlag für die beiden Tage des 14./15. Juli 2021 (aus stündlichen RADOLAN-Daten des DWD).

Zwischen Andernach und Bonn vergrößert sich das Einzugsgebiet des Rheins von 139.549 km² auf 140.901 km², dies entspricht einem Zuwachs von 1.352 km², wovon auf die Ahr 897 km² (66,3 %) entfallen. Sie mündet bei Sinzig am Rhein-km 629,2 in den Rhein. Es gibt zwar zahlreiche weitere rechts- und linksrheinische Nebenflüsse, keiner davon besitzt jedoch nach Einzugsgebiet und Abfluss eine Bedeutung vergleichbar mit der Ahr. Auch sind für diese Nebenflüsse gemessene Abflussdaten nur in geringem Maße verfügbar. Dementsprechend wird im SOBEK-Modell des Rheins nur die Ahr in Form eines lateralen Zuflussknotens, d. h. ohne Berücksichtigung etwaiger hydraulischer Effekte wie bspw. Rückstau im Mündungsbereich, implementiert, was für die i. d. R. großräumigen Einsatzfälle des Modells durchaus genügend ist.

Um in der vergleichsweise kleinräumigen Untersuchung zur Rekonstruktion des Ahrhochwassers belastbare Ergebnisse für den Zufluss aus der Ahr abzuleiten bzw. die Ergebnisunsicherheit einschätzen zu können, sollen die nicht im Modell implementierten Nebenflüsse im Ereigniszeitraum einen möglichst geringen Anteil am Abfluss des Rheins ausmachen. Immerhin entfällt auf diese Zuflüsse ca. 1/3 des Einzugsgebietszuwachses zwischen Andernach und Bonn (s. o.) – würden die Niederschläge im Ereigniszeitraum räumlich und zeitlich über alle Teileinzugsgebiete gleichverteilt auftreten und zum Abfluss kommen, dann könnte der Fehler in der Rekonstruktion der Ahrwelle bzw. ihres Scheitels mehr als 30 % betragen.

Eine Abschätzung, wie groß der Anteil der im Modell nicht berücksichtigten Rheinzufüsse zwischen Andernach und Bonn tatsächlich gewesen sein könnte, wurde deshalb basierend auf stündlichen Radar-Daten (RADOLAN) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vorgenommen. Hierzu wurden die Niederschläge des 14. und 15. Juli 2021 – wie in Abbildung 3 dargestellt – aggregiert. Der 48-Stunden-Niederschlag im betrachteten Einzugsgebiet variierte von 39 mm bis 181 mm, wobei sich die Maxima auf den nördlichen und westlichen Bereich des Ahrgebiets konzentrierten. Der Anteil der Niederschlagsmenge im Ahrgebiet am gesamten Einzugsgebiet zwischen Andernach und Bonn beträgt anhand dieser Auswertung² ca. 78 % und liegt somit nochmals deutlich höher als der flächenmäßige Einzugsgebietsanteil von ca. 66 %.

2.2 Modellberechnungen zur Rekonstruktion der mündungsnahen Ahrwelle

Folgt man der Annahme, dass die Abflusszunahme zwischen Andernach und Bonn in der Nacht vom 14. auf den 15. Juli und am Vormittag des 15. Juli (Abb. 4) fast ausschließlich auf die Flutwelle aus der Ahr zurückzuführen ist, dann lässt sich durch eine einfache Differenzbildung zwischen den gemessenen Abflussganglinien der beiden Rheinpegel eine erste Näherung für eine Welle und den Scheitel des Ahrhochwassers an der Mündung in den Rhein bestimmen. Diese Vorgehensweise berücksichtigt allerdings die Fließzeiten zwischen Andernach, der Ahrmündung und Bonn noch nicht. Ergänzt man die vorgenommene "einfache" Subtraktion um die Komponente der Fließzeiten, dann

ergibt sich folgende Gleichung [1] zur Berechnung des Zuflusses aus der Ahr:

$$Q_{Ahr}(t) = Q_{Bonn}(t + d1) - Q_{Andernach}(t - d2) \quad [1]$$

Der Abfluss Q_{Ahr} in den Rhein zu einem Zeitpunkt t ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem Abfluss Q_{Bonn} zum Zeitpunkt $t+d1$ und dem Abfluss $Q_{Andernach}$ zum Zeitpunkt $t-d2$. Der Parameter $d1$ beschreibt dabei die Fließzeit [in h] von der Ahr-Mündung zum Pegel Bonn, $d2$ die Fließzeit [ebenfalls in h] vom Pegel Andernach bis zur Ahrmündung. Auf Grundlage von stationären Modellberechnungen für unterschiedliche Abflusszustände und daraus abgeleiteten Fließgeschwindigkeiten wurde $d1$ zwischen 2 und 3 Stunden, $d2$ zwischen 3 und 5 Stunden variiert. Bildet man nun entsprechend [1] die Differenz der gemessenen Ganglinien und variiert dabei jeweils die Werte $d1$ und $d2$ im zuvor angegebenen Rahmen, dann erhält man eine Auswahl möglicher Ahr-Ganglinien.

Da reale Werte für $d1$ und $d2$ jedoch nicht bekannt sind und sie in [1] für den gesamten Ereigniszeitraum als konstant angenommen werden³, muss nun für das Ensemble möglicher Ahr-Ganglinien eine Nachrechnung mit dem hydraulischen Modell erfolgen. Inputdaten sind dabei der gemessene Abfluss $Q_{Andernach}(t)$ und der jeweils per Differenzberechnung ermittelte Abfluss $Q_{Ahr}(t)$. Aus diesen Berechnungen wird die nach Abschluss dieses Arbeitsschritts am besten passende Kombination $Q_{Ahr}(t) / Q_{Bonn}(t)$ ausgewählt.

Auch wenn mit der auf diesem Weg ermittelten Ganglinie für die Ahrwelle bereits eine akzeptable Anpassung der Modellergebnisse an die Abflussganglinie in Bonn erreicht wurde, so bestand noch weiteres Optimierungspotential zur Anpassung des Scheitelwerts und der Form der bisher abgeleiteten Ahrganglinie. Im Rahmen der Bearbeitung hatte sich herausgestellt, dass dieser "Kalibrierungsschritt" entweder anhand der verfügbaren, aus Wasserstandsmessungen berechneten Abflussganglinie am Pegel Bonn oder anhand der gemessenen Wasserstandsganglinie am Pegel Oberwinter durchgeführt werden kann (Kap. 3).

Die Kalibrierung der Ahrwelle anhand der Abflussganglinie des Pegels Bonn wurde in einem vollständig automatisierten Verfahren mit folgenden Gleichungen [2] umgesetzt:

- Berechnung von $\Delta Q(t) = Q_{Bonn\ gemessen}(t) - Q_{Bonn\ simuliert}(t)$.
- Verschiebung von $\Delta Q(t)$ um $d1$ Stunden, woraus $\Delta Q(t+d1) = dQ_{verschoben}$ resultiert.
- Berechnung von $Q_{Ahr\ neu}(t) = Q_{Ahr\ simuliert}(t) + dQ_{verschoben}$.
- Modellsimulation mit $Q_{Ahr\ neu}(t)$ als neuem lateralen Ahrzufluss und Vergleich der neuen modellierten Ganglinie $Q_{Bonn\ simuliert}(t)$ mit $Q_{Bonn\ gemessen}(t)$.

Die o. g. Schritte werden so lange wiederholt, bis die simulierte und gemessene Abflussganglinie am Pegel Bonn bestmöglich übereinstimmen, wobei die Güte der Übereinstimmung visuell

² Im Rahmen der Untersuchung wurden darüber hinaus Auswertungen der RADOLAN-Daten mit zeitlich verschobenen, teilweise längeren Auswertungszeiträumen durchgeführt, die jeweils zu ähnlichen Niederschlagsanteilen (\pm wenige %) führten.

³ In Realität können sich $d1$ und $d2$ auch innerhalb eines Ereigniszeitraums verändern.

ermittelt wird⁴. Die Kalibrierung anhand des Wasserstands am Pegel Oberwinter verläuft ähnlich wie [2], bedarf jedoch eines vorbereitenden Arbeitsschritts, der jeweils zu Beginn des folgenden Gleichungssystems [3] steht:

- Ermittlung einer W-Q-Beziehung am Pegel Oberwinter aus dem jeweils vorherigen Modelllauf.
- Berechnung des Abflusses $Q_{\text{Oberwinter soll}}(t)$ auf Grundlage der modellbasierten W-Q-Beziehung und dem gemessenen Wasserstand am Pegel Oberwinter.
- Berechnung von $\Delta Q(t) = Q_{\text{Oberwinter soll}}(t) - Q_{\text{Oberwinter simuliert}}(t)$.
- Verschiebung von $\Delta Q(t)$ um $d3$ Stunden ($d3 = \text{Fließzeit}$ von der Ahrmündung bis zum Pegel Oberwinter; Variation zwischen 1 und 2 Stunden), woraus $\Delta Q(t+d3) = dQ_{\text{verschoben}}$ resultiert.
- Berechnung von $Q_{\text{Ahr neu}}(t) = Q_{\text{Ahr simuliert}}(t) + dQ_{\text{verschoben}}$.
- Modellsimulation mit $Q_{\text{Ahr neu}}(t)$ als neuen lateralem Ahr-Zufluss und Vergleich der neuen modellierten Ganglinie $W_{\text{Oberwinter simuliert}}(t)$ mit $W_{\text{Oberwinter gemessen}}(t)$.

Die Schritte in [3] werden ebenfalls so lange wiederholt, bis am Pegel Oberwinter die simulierte und gemessene Wasserstandsganglinie möglichst gut übereinstimmen, wobei auch bei diesem Vorgehen auf die statistische Bestimmung der Anpassungsgüte verzichtet wird (s. o.). Die Erfahrung hat darüber hinaus gezeigt, dass aus der ermittelten Ganglinie $Q_{\text{Ahr neu}}(t)$ einige verfahrensbedingte Oszillationen durch Glättung eliminiert werden müssen.

3 Modellergebnisse: Scheitel, Ganglinie und Fülle der Ahrwelle

Das Ergebnis der Kalibrierung der Ahrwelle anhand der Abflussganglinie des Pegels Bonn wird in Abbildung 4 dargestellt. Die resultierende Ahr-Ganglinie an der Mündung in den Rhein besitzt für den gezeigten Zeitraum in etwa 50 Mio. m³ Gesamtvolumen⁵ und erreicht einen Scheitel von 1.143 m³/s (Stundenwert⁶). Über einen Zeitraum von ca. drei Stunden liegt der Zufluss in den Rhein nach diesen Berechnungen bei > 1.100 m³/s. Der Vergleich zwischen dem gemessenen und modellierten Abfluss am Pegel Bonn zeigt bei diesem Vorgehen eine gute Übereinstimmung, die Differenz beträgt zu gleichen Zeitschritten maximal 61 m³/s.

Allerdings traten bei der Bewertung möglicher Unsicherheiten des Ergebnisses einige Aspekte zu Tage, die dazu führten,

- 4 Auf eine statistisch basierte Auswertung der Güte (z. B. über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate) wurde in der Ad-hoc-Untersuchung verzichtet.
- 5 Auf Basis der in Abbildung 3 gezeigten Daten ergibt sich eine zweitägige Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet der Ahr von 108 Mio. m³. Aufgrund der unterschiedlichen Auswerteziträume und ohne Berücksichtigung weiterer Wasserhaushaltsgrößen (z. B. Speicherung, Versickerung, Grundwasserabfluss etc.) sind diese Zahlen jedoch nur bedingt vergleichbar.
- 6 Die in Abbildung 4 gezeigten Ganglinien basieren auf 15-Minuten-Werten, weshalb dort für die Ahr-Ganglinie ein Scheitelwert ≥ 1.200 m³/s abgelesen werden kann.

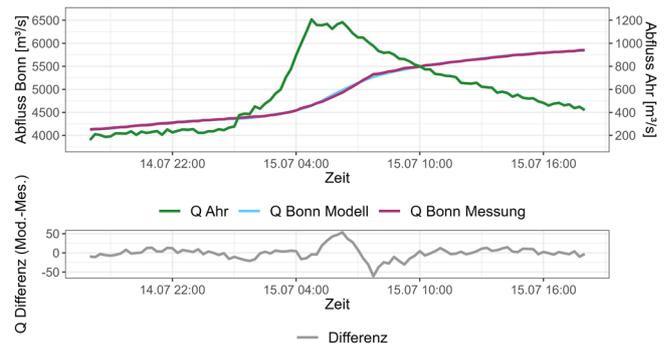


Abbildung 4

Durch die Kalibrierung des Modellabflusses in Bonn (blaue Linie) am aus der Abflusskurve ermittelten Abfluss des Pegels Bonn (lila-farbene Linie) rekonstruierte Abflussganglinie für die Ahr an der Mündung in den Rhein (grüne Linie). Dargestellt ist außerdem die Abflussdifferenz zwischen den aus der Abflusskurve ermittelten und den modellierten Abflüssen in Bonn (graue Linie).

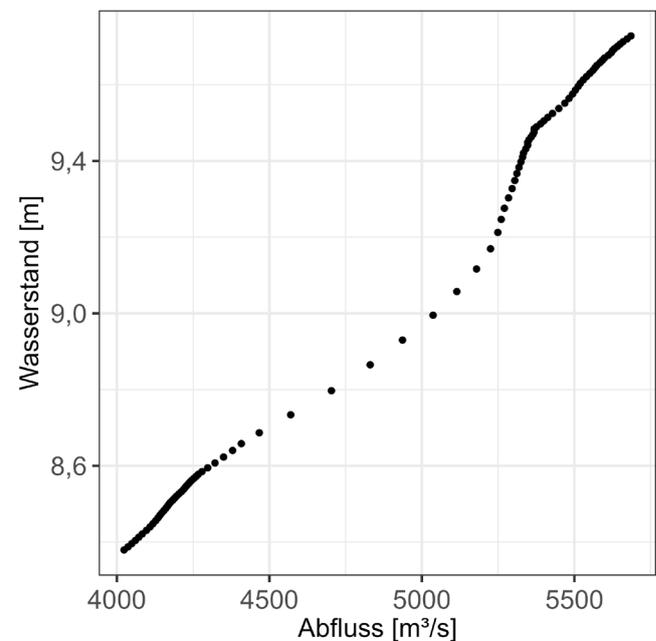
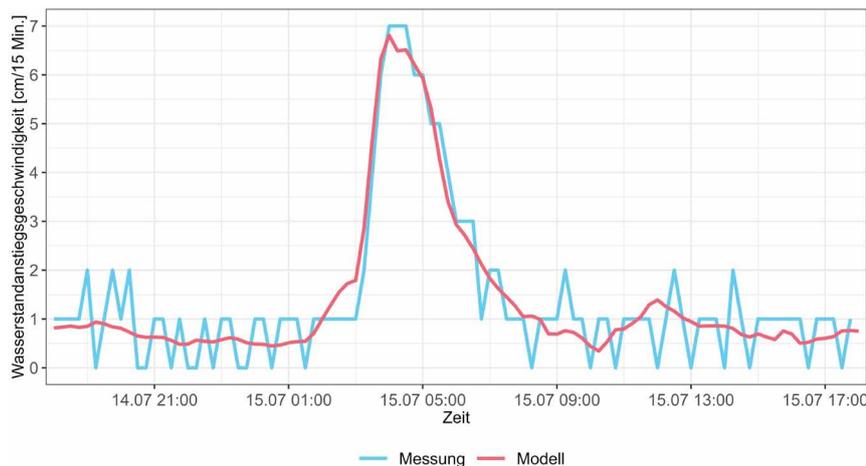


Abbildung 5

Modellbasierte Wasserstand-Abfluss-Beziehung am Pegel Oberwinter während des Ahrhochwassers im Juli 2021 (ansteigender Ast der Rheinwelle).

dass das Kalibrierungsverfahren weiterentwickelt (von [2] zu [3], Kap. 2.2) und schlussendlich der Kalibrierung anhand des Pegels Oberwinter mehr Vertrauen geschenkt wurde. Das offensichtlichste Manko der mittels [2] rekonstruierten Ahr-Ganglinie zeigt sich bereits im Betrachtungszeitraum vor der eigentlichen Hochwasserwelle. In diesem Zeitraum werden für den Zufluss aus der Ahr in den Rhein bereits Abflüsse > 200 m³/s ausgewiesen, die am mündungsnächsten Pegel Bad Bodendorf mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von ca. 20 Jahren (Zeitreihe 1995 bis 2019) bewertet werden. Dies passt nicht zu den dortigen Messungen, die zu diesem Zeitpunkt noch keine Hochwasserabflüsse verzeichneten. Ursächlich könnte hierfür sein, dass am

**Abbildung 6**

Gemessene (blaue Linie, 15-Minuten-Werte) und modellierte (rote Linie) Wasserstandanstiegsgeschwindigkeit [cm/15 min] am Pegel Oberwinter (Rhein).

Pegel Bonn die in Kapitel 2.1 beschriebenen Qualitätskriterien, insbesondere im für die Rekonstruktion der Ahrwelle relevanten Abflussbereich zwischen $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$, nicht erreicht werden. Hierauf deuten zumindest die Ergebnisse der stationären Modellkalibrierung für das Gesamtmodell des Rheins hin (HKV HYDROKONTOR, 2014).

Außerdem bilden die von der WSV eingeführten Abflusskurven mögliche Hystereseffekte⁷ i. d. R. nicht ab, sondern beschreiben vielmehr eine mittlere Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss. Demnach können die Abflüsse, die für die vorliegende Auswertungen nur aus Wasserständen der ansteigenden Rheinwelle abzuleiten sind, von diesen mittleren Werten abweichen⁸. Dieses Problem zu umgehen, indem der Modellrand an einem weiter unterstrom gelegenen Abflusspegel gewählt wird, war jedoch keine Option⁹. Weitere Einzugsgebietsanteile, die im Modell nicht über Zuflüsse abgebildet werden, hätten das Ergebnis ebenso mit Unsicherheiten belastet.

Zwar musste eine genaue Quantifizierung möglicher Einflüsse und Unsicherheiten im Rahmen der Untersuchung aus Zeitgründen ausbleiben, allerdings versprach die als zweites Verfahren in Kapitel 2.2 vorgestellte Kalibrierung anhand des Pegels Oberwinter [3] bereits aus qualitativen Gesichtspunkten eine höhere Belastbarkeit der Ergebnisse. Der Pegel Oberwinter besitzt u. a. den Vorteil, nur wenige Kilometer unterstrom des Zusammenflusses von Rhein und Ahr zu liegen und somit nicht am unteren Modellrand. Eine offizielle Abflusskurve der WSV ist für diese Messstation jedoch nicht vorhanden. Abbildung 5 zeigt den relevanten Teilbereich der W-Q-Beziehung am Pegel Oberwinter, die aus den instationären Modellberechnungen abgeleitet wurde und in dem – da die Werte nur dem ansteigenden Ast der Rhein-

welle entnommen wurden – keine Hysterese zu erkennen ist.

Aus dem Wissen heraus (s. o.), dass die Qualität der Kalibrierung des Rheinmodells ebenso einen Einfluss auf die resultierende Ganglinie für das Ahrhochwasser haben kann, wurde für die Auswertung am Pegel Oberwinter das Augenmerk nicht nur auf die absoluten modellierten Wasserstände (Abb. 7), sondern auch auf die relativen Wasserstandanstiegsgeschwindigkeiten im Rhein (Abb. 6) gelegt.

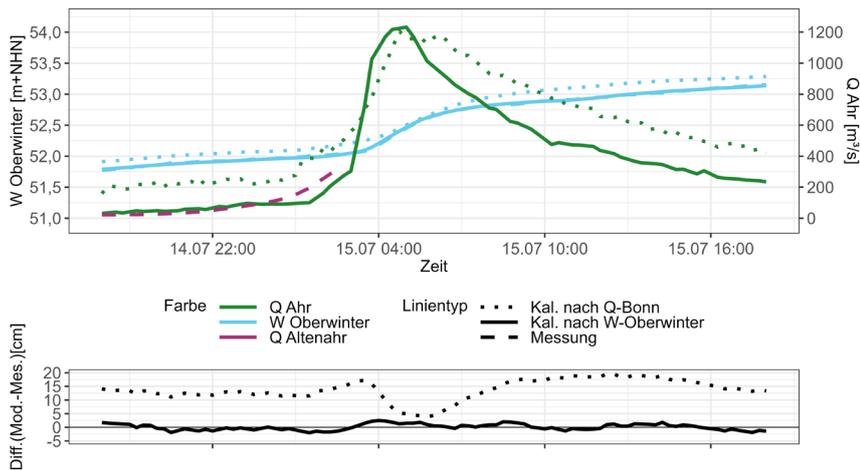
Die rekonstruierte und in Abbildung 6 dargestellte Ahrwelle erreicht einen Scheitelwert von $1.127 \text{ m}^3/\text{s}$ (Stundenwert), besitzt aber im Vergleich zur in Abbildung 4 dargestellten Ganglinie ein deutlich geringeres Volumen von $34,5 \text{ Mio. m}^3$ (31 % weniger). Im absolut höchsten Scheitelbereich ($> 1.100 \text{ m}^3/\text{s}$) verbleibt das Hochwasser mit $2 \frac{1}{4}$ Stunden

für einen ähnlichen Zeitraum wie die durch Kalibrierung anhand des Pegels Bonn erzeugte Ahrganglinie. Der Scheitel des Hochwassers der Ahr wird laut Modellierung an der Mündung in den Rhein in den frühen Morgenstunden (ca. 5 Uhr) des 15. Juli 2021 erreicht. Mit der angewendeten Methode ergibt sich ein deutlich stimmigeres Bild im Vergleich zu den gemessenen Abflüssen an der Ahr im Zeitraum vor Anstieg der Hochwasserwelle.

Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Kalibrierungsmethoden zeigt, dass entweder eine gute Anpassung am Pegel Bonn (Q) oder am Pegel Oberwinter (W) erreicht werden konnte. Beispielsweise unterscheiden sich die beiden modellierten Ganglinien am Pegel Oberwinter durch einen weitgehend konstanten Versatz von ca. 20 cm (Abb. 7), was in diesem Abflussbereich des Rheins einer Abflussdifferenz von etwa $200 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht. Die Tatsache, dass der gesamte Zufluss in den Rhein zwischen Andernach und Bonn der Ahr zugeschrieben wird, legt den Schluss nahe, dass sowohl der berechnete Scheitelabfluss als auch die berechnete Fülle der Ahrwelle eher am oberen Rand der möglichen bzw. realistischen Werte liegt. Um die Abflussfülle der Ahrganglinie belastbar plausibilisieren bzw. bestimmen zu können, bedürfte es wiederum eines Abgleichs mit hydrologischen Modellen, der im Rahmen der Studie nicht im Detail erfolgt ist. Eine bessere Plausibilisierung der Abflussfülle würde in jedem Fall dazu beitragen, die aufgeführten Unsicherheiten in der hydraulischen Modellierung (Hysterese, Modellqualität, W-Q-Beziehung etc.) von den meteorologisch-hydrologischen Aspekten wie Berücksichtigung der Teileinzugsgebiete bzw. Zuflüsse und Stimmigkeit der Abflussbilanz zu separieren und so das angewendete Verfahren für zukünftige Anwendungsfälle noch verlässlicher einschätzen zu können.¹⁰

7 Liegt eine Hysterese vor, dann werden bei gleichem Abfluss unterschiedliche Wasserstände gemessen, abhängig davon, ob die Messung im ansteigenden oder fallenden Ast einer Hochwasserwelle stattfindet.
8 Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Gültigkeit einer Abflusskurve nicht ereignisspezifisch ist, sondern sich zumeist über einen längeren Zeitraum (Jahre) erstreckt.
9 Streng genommen betrifft dieses Problem nicht nur den unteren, sondern auch den oberen Modellrand.

10 Erste Versuche zur Rekonstruktion des Ahrzuflusses beim Hochwasser im Juni 2016, das auch an der Ahr gut und durchgehend mit Messdaten belegt ist, bestätigen die Bedeutung der genannten Einflüsse bzw. die besondere Herausforderung bei der Rekonstruktion des Ahrabflusses, wenn dieser im Rhein nur eine geringe Abflusszunahme bzw. einen geringen Wasserstandanstieg hervorruft.

**Abbildung 7**

Rekonstruierte Abflussganglinien für die Ahr an der Mündung in den Rhein (grün) sowie Wasserstandganglinien des Pegels Oberwinter (hellblau), jeweils aus der Kalibrierung anhand des Pegels Bonn (gepunktete Linien) und aus der Kalibrierung anhand des Pegels Oberwinter (durchgezogene Linien). Ebenfalls abgebildet ist die gemessene Ganglinie des Pegels Altenahr (lila, unterbrochene Linie; verschoben um +7,5 Stunden, da 31,7 km oberhalb der Ahrmündung in den Rhein gelegen – die Verschiebung gilt nur für "niedrige" Abflüsse, der Scheitelabfluss in Altenahr wird für etwa Mitternacht angenommen). Außerdem wird die Wasserstands-differenz zwischen dem gemessenen und modellierten Wasserstand in Oberwinter, sowohl bei Kalibrierung anhand des Pegels Oberwinter (schwarze, durchgezogene Linie) als auch bei Kalibrierung anhand des Pegels Bonn (schwarze, gepunktete Linie), im unteren Teil der Abbildung gezeigt.

4 Vergleichende Einordnung der Ergebnisse der Rekonstruktion

Der Hochwasserscheitel der mit dem SOBEK-Modell des Rheins rekonstruierten Ahrwelle ($1.143 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $1.127 \text{ m}^3/\text{s}$) ordnet sich in die Ergebnisse anderer im Kontext des Ahrhochwassers durchgeführten Untersuchungen gut ein. ROGGENKAMP & HERGET (2022), welche die aus Hochwassermarkierungen bestimmten, maximalen Wasserstände nutzen, um für verschiedene Standorte an der Ahr und ihren Nebenflüssen die durchströmte Querprofilfläche abzuleiten und anhand der Topografie des Gewässerlaufs hydraulische Parameter zur Ableitung der maximalen Abflüsse zu berechnen, kommen an der Ahr zwischen Rech und Dernau (unterhalb Pegel Altenahr) zu Scheitelwerten zwischen $1.030 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1.230 \text{ m}^3/\text{s}$. BELLEFLAMME et al. (2021) ermitteln mithilfe eines unkalibrierten, physikalisch-basierten hydrologischen Modells (ParFlow) einen Scheitelabfluss, der am Pegel Altenahr bei knapp unter $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt (KREIENKAMP et al., 2021).

Das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz setzte ebenfalls sein hydrologisches Modell (LARSIM) ein, wobei die Verwendung verschiedener Niederschlagsprodukte¹¹ und Modelleinstellungen, z. B. zur Bodenfeuchte, zu einer Bandbreite an möglichen Spitzenabflüssen führte. Zusammen mit klassischen Betrachtungen von Abflussspenden und Abflussvolumina wird in LFU RP (2022) für den Pegel Altenahr ein Bereich zwischen $750 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben; für den Pegel Bad Bodendorf an der unteren Ahr, der aufgrund seiner räumlichen Entfernung zur Mündung in den Rhein am besten mit den Ergebnissen der BfG zu vergleichen

ist, liegt die Bandbreite zwischen $710 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ ¹². Nachrechnungen mittels 2D-hydraulischen Modellen für besonders im Fokus stehende, kurze Ahrabschnitte, deren Ergebnisse mit den dokumentierten Anschlaglinien des Hochwassers verglichen wurden, legen die Vermutung nahe, dass die tatsächlichen Scheitelwerte eher im höheren Bereich der angegebenen Bandbreite zu finden sind (LFU RP, 2022), wobei diese Scheitelwerte auch Folge von Schwallwellen sein können (s. u.).

Die verschiedenen, unmittelbar oder im weiteren Nachgang zum Hochwasser durchgeführten Untersuchungen zeigen v. a. bzgl. der Scheitelwerte eine sehr gute Stimmigkeit, wenn auch die Bandbreite der möglichen Abflüsse beträchtlich ist. Die genannten Verfahren schafften es bisher jedoch nicht, den Wellenablauf im Ahrtal mit allen seinen besonderen Verkomplizierungen im Juli 2021 abzubilden. Beobachtungen während des Hochwassers legen nahe, dass durch die Verklauungen der Brücken, den dadurch eintretenden Rückstau und dessen plötzliches Auflösen nach Zerstörung der Brücken durch den enormen Wasserdruck zu "Schwallwellen" geführt hat, die sich eben-

falls auf die lokalen Scheitelabflüsse und -wasserstände ausgewirkt haben könnten. Diese Geschehnisse zu rekonstruieren, stellt – falls überhaupt möglich – eine große Herausforderung dar und bedarf der Integration aller verfügbaren Datenquellen. Im Gegensatz dazu liefert die indirekte, über das Modell des Rheins durchgeführte Rückrechnung der Ahrwelle, "nur" eine schnelle und einfache, aber dennoch belastbare Methode zur Rekonstruktion des Hochwassers unter den gegebenen Umständen.

Literaturverzeichnis

- BÁRDOSSY, A., SEIDEL, J., EISELE, M., EL HACHEM, A., KUNSTMANN, H., CHWALA, C. & M. GRAF (2022): Verbesserung der Abschätzung von Gebietsniederschlägen mittels opportunistischer Niederschlagsmessungen am Beispiel des Ahr-Hochwassers im Juli 2021. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung HW66, Jahrgang 2022, Heft 4, Seite 208-214. <https://www.hywa-online.de/download/hywa-heft-4-2022/> (abgerufen am 18. Oktober 2022).
- BELLEFLAMME, A., GOERGEN, K., IAKUNIN, M., VANDERBORG, J. & S. KOLLET (2021): The extreme flood events of summer 2021 in western Germany and Belgium as simulated by the free-running ParFlow hydrological model. Vortrag beim AGU Fall Meeting am 16.12.2021. https://user.fz-juelich.de/record/903704/files/AGU2021_oral_presentation_ABelleflamme_et_al.pdf (abgerufen am 3. August 2022).
- HERGET, J., ROGGENKAMP, T., KRELL, M. (2014): Estimation of peak discharges of historic floods. Hydrology and Earth System Sciences 18, S. 4029-4037. DOI: 10.5194/hess-18-4029-2014 (abgerufen am 3. August 2022).

11 BÁRDOSSY et al. (2022) geben an, dass durch die in Kapitel 2.1 genannten RADOLAN-Daten die räumliche Niederschlagsverteilung zwar erfasst, jedoch vermutlich auf Grund von Dämpfung unterschätzt wurde.

12 Die überwiegende Anzahl der LARSIM-Simulationen des LFU RP berechnet den Scheitelzeitpunkt am Pegel Bad Bodendorf für den 15. Juli 2021 um 5 Uhr bzw. 6 Uhr. Dieser Zeitpunkt passt ebenfalls gut zum Scheitelzeitpunkt der von der BfG rekonstruierten Ahrwelle.

- HKV HYDROKONTOR (2014): Erstellung eines SOBEK-River Modells für den Rhein von Iffezheim bis Pannerdense Kop als Weiterentwicklung bestehender SOBEK-RE Modelle. Projektbericht PR 2278.10. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. HKV Hydrokontor: Aachen. (unveröffentlicht).
- JUNGHÄNEL, T., BISSOLLI, P., DASSLER, J., FLECKENSTEIN, R., IMBERY, F., JANSSEN, W., KASPAR, F., LENGFELD, K., LEPELT, T., RAUTHE, M., RAUTHE-SCHÖCH, A., ROCEK, M., WALAWENDER, E. & E. WEIGL (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet "Bernd" vom 12. bis 19. Juli 2021. Fassung vom 21. Juli 2021 Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (abgerufen am 3. August 2022).
- KREIENKAMP, F., PHILIP, S.Y., TRADOWSKY, J.S., KEW, S.F., LORENZ, P., ARRIGHI, J., BELLEFLAMME, A., BETTMANN, T., CALUWAERTS, S., CHAN, S.C., CIAVARELLA, A., DE CRUZ, L., DE VRIES, H., DEMUTH, N., FERRONE, A., FISCHER, E.M., FOWLER, H.J., GOERGEN, K., HEINRICH, D., HENRICH, Y., LENDERINK, G., KASPAR, F., NILSON, E., OTTO, F.E.L., RAGONE, F., SENEVIRATNE, S.I., SINGH, R.K., SKÅLEVÅG, A., TERMONIA, P., THALHEIMER, L., VAN AALST, M., VAN DEN BERGH, J., VAN DE VYVER, H., VANNITSEM, S., JAN VAN OLDENBORGH, G., VAN SCHAEYBROECK, B., VAUTARD, R., VONK, D., & N. WANDERS (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World Weather Attribution. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf> (abgerufen am 3. August 2022).
- LFU RP (2016) (HRSG.): Starkregen und Hochwasser in Rheinland-Pfalz im Mai/Juni 2016. Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz. https://www.hochwasser-rlp.de/publikationen/bericht_starkregen_hochwasser_juni2016.pdf (abgerufen am 3. August 2022).
- LFU RP (2022) (HRSG.): Hochwasser im Juli 2021. Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz. https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Wasserwirtschaft/Ahr-Katastrophe/Hochwasser_im_Juli2021.pdf (abgerufen am 18. Oktober 2022).
- RIQUEST (2017): Optimierung und Anpassung des SOBEK-Modells Niederrhein im Rahmen des FuE-Vorhabens "Analyse der Maßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms" (NHWSP). Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. RiQuest: Nijkerkerveen (NL). (unveröffentlicht).
- ROGGENKAMP, T. & J. HERGET (2022): Hochwasser der Ahr im Juli 2021 – Abflussabschätzung und Einordnung. Projektbericht. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung HW66, Jahrgang 2022, Heft 1, Seite 40-48. <https://www.hywa-online.de/download/hywa-heft-1-2022/> (abgerufen am 3. August 2022).

*Dinh Quang Duong,
 Marcus Hatz
 Bundesanstalt für Gewässerkunde
 duong@bafg.de
 hatz@bafg.de*

Deutsche Hydrologische Gesellschaft

Posterpreise am "Tag der Hydrologie 2023"

Auch im neuen Jahr 2023 wird die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG) auf dem "Tag der Hydrologie", der dieses Jahr von Frau Prof. Martina Flörke (Ruhr-Universität Bochum) und Herrn Prof. Christoph Mudersbach (Hochschule Bochum) veranstaltet wird, wieder drei Posterpreise vergeben.

Alle Teilnehmer der Tagung sind eingeladen, die ausgestellten Poster zu bewerten. In den Kategorien (1) innovativste Studie, (2) bester Bezug zum Thema sowie (3) bestes Design werden nach erfolgreicher Bewertung zum Ende der Veranstaltung die jeweiligen Gewinner bekanntgegeben. Preisträger erhalten eine einjährige, kostenfreie Mitgliedschaft bei der DHG.

Workshop "Junge HydrologInnen" am Tag der Hydrologie 2023

Traditionell findet am Vortag der Konferenz "Tag der Hydrologie 2023" der Workshop für junge HydrologInnen statt, der sich an "Early Career Scientists" richtet und vom DHG-Arbeitskreis "Netzwerk junger HydrologInnen" organisiert wird.

Er verfolgt das Ziel, den Austausch und die Vernetzung der Nachwuchswissenschaftler über die Grenzen der unterschiedlichen Fächer mit Wasserbezug hinweg zu fördern. Beim Workshop bietet sich die Möglichkeit zum gegenseitigen Kennenlernen und zur Präsentation von Forschungsarbeiten in ungezwungener Atmosphäre. Für den kommenden Workshop wird es zwei Keynote-Vorträge geben, die von Herrn Dr. Mario Sommerhäuser (Emschergenossenschaft) und Herrn PD Dr. Björn Guse (GFZ Potsdam) gehalten werden. Im Anschluss daran wird es eine Plattform zum moderierten persönlichen Austausch geben. Da der Workshop am Vortag des "Tags der Hydrologie" stattfindet, lassen sich beide Veranstaltungen gut miteinander verbinden. Nähere Informationen über das Netzwerk: <https://youngsters.dhydrog.de>.

DHG | Aktuell Nr. 2 2022

Der neue Newsletter der DHG "DHG | Aktuell" ist im Dezember 2022 erschienen und unter www.dhydrog.de/news/aktuelles abrufbar.

DHG Kalender 2023 – Grundwasser

Wir freuen uns, allen Mitgliedern für das Jahr 2023 wieder einen sehr illustrativen Kalender präsentieren zu können, der monatliche Eindrücke zum Thema "Grundwasser" vermittelt.

Grundwasser ist unsere wichtigste Trinkwasserressource, die bedingt durch den Klimawandel zunehmend gefährdet ist. Grundwasser ist meist nicht sichtbar, weshalb es umso schöner ist, wenn es wie in unserem Kalender dennoch in Bildern festgehalten werden kann. Der Kalender wurde unter Mithilfe der DHG-Mitglieder gestaltet, die zahlreiche Fotovorschläge eingesendet haben und somit wesentlich zum Gelingen des Kalenders beigetragen haben. Hierfür gebührt allen Einsendern ein großer Dank. Aus der Vielzahl der Zusendungen hat das erweiterte Präsidium 12 Fotos ausgewählt, die durch Andreas Bauer von der Universität Potsdam in der vorliegenden Reihung zusammengestellt wurden. Ausgehend von Laborexperimenten zum Grundwasser und Bildern von Grundwasseraustritten in Deutschland, Libyen, Frankreich oder Island, schließt ein Bild zur Bewässerung mit Grundwasser das Jahr 2023 eindrucksvoll ab und zeigt die intensive anthropogene Nutzung dieser Ressource.

Mitgliederversammlung beim Tag der Hydrologie in Bochum

Im Rahmen des Tages der Hydrologie in Bochum wird am 22. März 2023, abends, wieder eine Mitgliederversammlung in Präsenz stattfinden, zu der alle Mitglieder herzlich eingeladen sind. Weitere Informationen sowie die Tagesordnung wird den DHG-Mitgliedern vorher fristgerecht zugehen.

*Prof. Peter Chiffard, Schriftführer,
Deutsche Hydrologische Gesellschaft*

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

in der DWA (FgHW)

Einladung zur FgHW-Mitgliederversammlung am 22. März 2023 in Bochum

Traditionell findet die Mitgliederversammlung der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW) der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DVWK) im Rahmen des "Tags der Hydrologie, TdH" statt. In diesem Jahr ist der Termin der 22. März 2023. Die Versammlung wird nach den Fachvorträgen in den Räumen der Ruhr-Universität Bochum stattfinden. Genauere Informationen folgen, wenn das Tagungsprogramm steht. Hiermit laden wir bereits jetzt die FgHW-Mitglieder recht herzlich zur Teilnahme ein.

Wie bei jeder Mitgliederversammlung stehen die Tätigkeitsberichte des Leiters der Fachgemeinschaft und des Vorsitzenden des DWA-Hauptausschusses "Hydrologie und Wasserbewirtschaftung" auf der Tagesordnung. Im Rahmen des TdH wird der Gewinner des Siegfried-Dyck-Preises geehrt, den die FgHW ausgeschrieben hat. Wir freuen uns auf viele interessante Begegnungen mit Ihnen! Link zum Tagungsprogramm: <https://www.ruhr-uni-bochum.de/tdh2023/programmuebersicht/index.html.de>.

14. Forum Hochwasserrisikomanagement

Das 14. Forum Hochwasserrisikomanagement am 11. Mai 2023 wird von den Ländern Bayern, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen veranstaltet. Institutionell zeichnen dafür das Bayerische Landesamt für Umwelt, das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Freistaates Sachsen sowie das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz verantwortlich. Als Mitveranstalter fungieren die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), der Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) sowie die Technische Universität Kaiserslautern, in deren Händen die Organisation der Präsenzveranstaltung liegt.

Die Fachvorträge sind in drei Themenblöcke gegliedert, die auf folgende Aspekte des Hochwasserrisikomanagements abzielen: 10 Jahre nach dem Hochwasser 2012, Lessons Learned und Datenmanagement im Hochwassereinsatz.

Am Vortag des Forums, am 10. Mai 2023, findet das studentische Forum statt. Hier werden neben Bachelor-, Master und Diplomarbeiten auch ausgewählte Studienprojekte vorgestellt. Die FgHW übernimmt für bis zu 10 Studierende, die einen fachlichen Input zum studentischen Forum leisten, die Reisekosten und den Teilnahmebeitrag für den Folgetag, d. h. das Forum Hochwasserrisikomanagement. Bewerbungen für diese Kostenübernahme sind bei den Organisatoren der TU Kaiserslautern einzureichen. Für das Studentische Forum wird ein Vortrag oder ein Posterbeitrag erwartet. Ebenso soll ein Kurzbeitrag für die FgHW-Homepage erstellt werden.

FgHW-Kalender 2024 "Hydrologie in der Praxis"

Das Leitthema des Kalenderprojektes 2024 soll "Hydrologie in der Praxis" ("men/women at work") lauten. Wir hoffen, Sie damit erneut direkt anzusprechen, um mit Ihnen zusammen das genannte Thema unter dem Motto "von Mitgliedern für Mitglieder" mit Leben füllen zu können. Als Leserinnen und Leser sind Sie herzlich aufgefordert, uns ihre beeindruckenden Bilder zum genannten Thema zur Verfügung zu stellen. Gesucht sind Bilder mit Kolleginnen und Kollegen bei typischen Arbeiten, die in ihrem Beruf anfallen. Denkbar sind Arbeiten im Felde, Aufgaben im Labor und bei der Überwachung und Planung wasserwirtschaftlicher/wasserbaulicher Anlagen. Willkommen sind jedoch auch Alltagssituationen zum Umgang mit dem Element Wasser.

Bitte reichen Sie Ihre Bildbeiträge mit Erläuterung möglichst bis zum 22. März 2023 per Mail ein (barion@dwa.de). Bitte denken Sie auch an die Bestätigung Ihrer Urheberschaft und die Übertragung der Nutzungsrechte für den FgHW-Wandkalender. Über Ihre Mitwirkung würden wir uns sehr freuen.

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

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

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

Neue Publikationen

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) (2022):

Jahresbericht 2020/2021. 83 Seiten, Eigenverlag.

DOI: 10.5675/BfG-Jahresbericht_2020/2021

Download: www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/01_Jahresberichte/bfg_jahresberichte.html

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) (Hrsg.) (2022):

Niederschrift der 89. Sitzung der KHR vom 17. und 18. März 2022, 11 Seiten.

Download: www.chr-khr.org/de/veroeffentlichungen

Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz Thüringen (Hrsg.) (2022):

Ingenieurbioologische Bauweisen zur Ufersicherung und Strukturverbesserung an Fließgewässern. Schriftenreihe des TLUBN Nr. 124, 207 Seiten.

Download: <https://tlubn.thueringen.de/service/publikationen>

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (Hrsg.) (2022):

Methodische Grundlagen zur Erstellung von Wasserversorgungskonzepten. 1. Auflage, 57 Seiten.

Download: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/41181>

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2022):

Nährstoffliche Belastungen in Fließgewässern und deren Einfluss auf die Fischfauna in Rheinland-Pfalz. Bericht, 57 Seiten.

Download: https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Veroeffentlichungen/2022_LfU-Bericht_Fischbewertung.pdf

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.) (2022):

Gewässerunterhaltung – Langfassung: Ziele und rechtliche Grundlagen. Dokument-ID 10374, 70 Seiten.

Download: <https://pd.lubw.de/10374>

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und Umweltrat EOBC e. V. (Hrsg.) (2022):

Umweltwissen MitWirkung – Empfehlungen für die Verbesserung von Umweltbeobachtung, Umweltwissen und Umwelthandeln. Abschlussbericht der 8. Umweltbeobachtungskonferenz, 98 Seiten.

Download: www.umweltbeobachtung.eu/journal/U01-EU21-de.pdf

Patt, H. (2022):

Fließgewässer- und Auenentwicklung: Grundlagen und Erfahrungen. 3. Auflage, 718 Seiten, Springer Vieweg.

ISBN: 978-3662644348

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022):

Evaluierung Dialogprozess "Nationaler Wasserdialo" (2018 – 2020). Autoren: Fleischmann, N., Dworak, T.; Texte 121/2022, 55 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: www.umweltbundesamt.de unter /publikationen

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022):

Phosphoreinträge in die Gewässer bundesweit modellieren – Neue Ansätze und aktualisierte Ergebnisse von MoRE-DE. Autoren: Fuchs, S., Brecht, K., Gebel, M., Bürger, S., Uhlig, M., Halbfaß, S.; Texte 142/2022, 149 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.

Download: www.umweltbundesamt.de unter /publikationen

World Meteorological Organization (2022):

State of Global Water Resources 2021. WMO-No. 1308, 36 p.

ISBN: 978-92-63-11308-5

Download: <https://library.wmo.int>

Termine

Die folgenden Ankündigungen entsprechen dem Wissensstand zum Redaktionsschluss am 20.12.2022.

44th IAD Conference 2023 – International Association for Danube Research

6. bis 9. Februar 2023 in Krems (Österreich)
Webseite: www.oen-iad.org/congress2023

26th Alpine Glaciology Meeting

9./10. Februar 2023 in Birmensdorf (Schweiz)
Webseite: www.wsl.ch/de/ueber-die-wsl/veranstaltungen-und-besuche-an-der-wsl/details/alpine-glaciology-meeting.html

4. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium

22./23. Februar 2023 in Bochum
Webseite: www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau/bochumer-hydrometrie-kolloquium

56. Essener Tagung für Wasserwirtschaft

7. bis 9. März 2023 in Essen
Webseite: www.essenertagung.de

46. Dresdner Wasserbaukolloquium

9./10. März 2023 in Dresden
Webseite: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/iwd/wasserbaukolloquium>

BAW/BfG-Kolloquium "Ästuar – Aktuelle Themen aus Gewässerökologie und Wasserbau"

24. Mai 2023 in Hamburg
Webseite: www.bafg.de unter "Wissen/Veranstaltungen"

Tag der Hydrologie 2023

21. bis 23. März 2023 in Bochum
Webseite: www.ruhr-uni-bochum.de/tdh2023

5th IMMERSE Transnational Estuary Exchange Lab

22./23. März 2023 in Hull (England)
Webseite: <https://northsearegion.eu/immerse/news>

Tenth International Symposium on Land Subsidence (TISOLS)

17. bis 21. April 2023 in Delft (Niederlande)
Webseite: www.tisols.org

RRC Annual Conference 2023 – River Restoration Centre

19./20. April 2023 in Birmingham (England)
Webseite: www.therrc.co.uk/rrc-annual-conference-2023

EGU23 European Geosciences Union general assembly

23. bis 28. April 2023 in Wien (Österreich)
Hybrid-Veranstaltung
Webseite: www.egu23.eu

91st Annual Meeting ICOLD 2023

11. bis 15. Juni 2023 in Göteborg (Schweden)
Webseite: <https://icold-cigb2023.se>

13th Symposium for European Freshwater Sciences

18. bis 23. Juni 2023 in Newcastle upon Tyne (England)
Webseite: www.sefs13.com

23. Gewässermorphologisches Kolloquium

20./21. Juni 2023 in Koblenz
Webseite: www.bafg.de unter "Wissen/Veranstaltungen"

19. Deutsches Talsperrensymposium

4. bis 6. Juli 2023 in Lindau
Webseite: www.talsperrensymposium.de

30th Conference of the Danubian Countries

21. bis 23. August 2023 in Wien (Österreich)
Webseite: <https://rivers.boku.ac.at/danube-conference>

Worlds Large River Conference

21. bis 25. August 2023 in Wien (Österreich)
Webseite: <https://rivers.boku.ac.at/wlr-conference>

Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL)

18. bis 22. September 2023 in Köln
Webseite: www.dgl-ev.de/veranstaltungen/jahrestagungen-dgl/jahrestagung-dgl.html

Magdeburger Gewässerschutzseminar 2023

11./12. Oktober 2023 in Karlsbad (Tschechien)
Webseite: www.ikse-mkol.org/themen/magdeburger-gewaesserschutzseminar/mgs-2023



Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management

Inhaltsverzeichnis Heft 1 bis 6, 66. Jahrgang 2022

Aufsätze

Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM DOI: 10.5675/HyWa_2022.1_1	1/6	Birkholz, Philipp Eisele, Micha Fuchs, Lothar Haag, Ingo	3/106 3/106 3/106 1/6
Weichenstellung im Untergrund – vom Baseflow-Index zum Grundwasser-Neubildungs-Index? DOI: 10.5675/HyWa_2022.2_1	2/66	Haberlandt, Uwe Haupt, Ralf Helms, Martin	3/106 4/178 5/225
Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadt-hydrologische Bemessungen in Deutschland DOI: 10.5675/HyWa_2022.3_1	3/106	Herrmann, Ole-Christian Hübner, Gerd	3/106 2/225
Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandel-beeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten DOI: 10.5675/HyWa_2022.3_2	3/122	Köhn, Janine Krämer, Stefan Krumm, Julia,	3/122 3/106 1/6
Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln DOI: 10.5675/HyWa_2022.4_1	4/178	Kuchenbecker, Andreas Leistert, Hannes Loritz, Ralf	3/106 2/66 6/286
Das extreme Niedrigwasser des Jahres 1921 in den großen Flüssen Deutschlands im Vergleich zum Niedrigwasser 2018 DOI: 10.5675/HyWa_2022.5_1	5/225	Maßmann, Stefanie Meißner, Ralph Müller, Thomas	3/106 3/122 3/106
Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser DOI: 10.5675/HyWa_2022.5_2	5/244	Pidoto, Ross Reinstorf, Frido Rupp, Holger	3/106 3/122 3/122
Physikalisch-basierte Simulation einer abgelaufenen Sturzflut mittels "repräsentativer Hänge" in einem ländlichen Einzugsgebiet DOI: 10.5675/HyWa_2022.6_1	6/286	Schwandt, Daniel Seidel, Jochen Steinbrich, Andreas Stoelzle, Michael Sympher, Klaus	5/225 3/106 1/6, 2/66 2/66 3/106
Aigner, Dirk	1/6	Trauth, Nico	4/178
Bárdossy, András	3/106	Villinger, Franziska	6/286
Belz, Jörg Uwe	5/225	Wiechmann, Wilfried	5/225
Bartens, Anne	3/106	Weiler, Markus	1/6, 2/66
Beylich, Marcus	3/122	Zehe, Erwin	6/286

Verfasser

Aktuelles

EU-Projekt unterstreicht Bedeutung von Auen	1/28	Periglaziale Klima- und Ökosystemuntersuchungen zeigen Beeinflussung von Seen	2/84
Climate Adaption Platform for the Alps – CAPA	1/28	Projekt "Rewilding" zur Erhaltung der Biodiversität mit nachhaltiger Regionalentwicklung im Oderdelta	2/85
Mehr Wissen für ein nachhaltiges Management des Ozeans	1/29	Schmelzwasser beeinflusst Ökosysteme im Arktischen Ozean	2/85
Neues Portal für Meeres-, Küsten- und Polargebiete	1/29	Wolkenbildung in der Südhemisphäre untersucht	2/87
Neue Studie zu Mikroplastiktransport in die Atmosphäre	1/30	Weltweite Studien zur Bodenversalzung zeigen Boden-degradationen	2/88
Neue Vorhersagemethodik für Wetter- und Klimaphänomene mit extremen Auswirkungen	1/31	Wie das Amazonasbecken die Atacama-Wüste bewässert	2/88
Seegraswiesen als Vibrionen-Fänger – Kieler Forschende beweisen eine weitere Leistung des Ostsee-Ökosystems	1/31	Wasser in Berlin: Gewässer- und Flächenmanagement gemeinsam betrachten	2/89
Sich verlagernde Flussläufe sind effizientere Kohlenstoffsenken als begradigte Flüsse	1/32	Die ökologischen Kosten der Wasserkraft – Fischsterben an Wasserkraftturbinen	2/91
Untersuchungen zur Eisschmelze der Gletscher in Patagonien	1/33	Brandenburg: Moorschutz als praktischer Klimaschutz	2/92
Studie zu schmelzenden Gletschern	1/33	Brandenburg: Anpassung der Wassermengenbewirtschaftung an die Klimaveränderungen	2/92
Regionaler Klimawandel: Die Rolle von Landnutzung und Wassermanagement	1/34	Gewässertyp des Jahres 2022 – Grundwasser	3/137
Mehr langanhaltende Wetterlagen im europäischen Sommer	1/35	Bundesumweltministerium und Bundesamt für Naturschutz engagieren sich gemeinsam im Meeresnaturschutz für Nord- und Ostsee	3/137
Neuartige Plastikverschmutzungen in Gewässern	1/35	Der Klimawandel lässt Gletscherseen in Hochasien wachsen	3/138
Studie zum Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser des Ozeans	1/36	Meeresspiegelanstieg und seine Ursachen neu beziffert	3/139
Fund einer extrem seltenen Insektenart weist auf Bedeutung der Auwälder hin	1/37	Nährstoffkreislaufprozesse bei einem Taifun	3/140
Brandenburg: Niedrigwasserkonzept für das mittlere Spreegebiet veröffentlicht	1/37	Projekt EPICA hat erste Bohrkerne aus dem Eis der Antarktis gehoben	3/140
Bundesweite Förderung von Pilotvorhaben zum Moorschutz	2/76	Satellitenmissionen zur Untersuchung des Abschmelzens von westantarktischen Gletschern	3/141
Arktische Küsten im Wandel	2/76	Talsperren und Staubereiche als Senke für Mikroplastik identifiziert	3/142
Dünnes Eis für Seen weltweit: Wärmere Seen als anthropogenes Problem mit ökologischen Folgen	2/77	Wasser-Extremereignisse: BMBF-Projekt "FloReST" zur Untersuchung von Notabflusswegen gestartet	3/143
Extreme Dürren setzen auch Leipziger Auwald zu	2/78	Infolge des Klimawandels drohen in Deutschland sinkende Grundwasserspiegel	3/144
Hochschule Koblenz begleitet BMBF-Projekt "Klimaanpassung, Hochwasser und Resilienz" (KAHR) nach Flutkatastrophe	2/79	Warum auch Kleingewässer schützenswert sind	3/144
Wie schnell breiten sich nach Starkregen Bakterien und Viren im Grundwasser aus?	2/80	Neue Maßnahmen zum Schutz der natürlichen Gewässer vor Spurenstoffen	3/146
Mehr Wolken durch Waldbrände in Südostasien	2/81	Niederschlagstrends entscheiden, wie oft Dürren und Hitzewellen gemeinsam auftreten werden	3/147
Mikroalgenverbreitung im Wattenmeer nahm in den letzten Jahren ab	2/82	Feuchtgebiete und Moore weltweit schützen	3/148
Modellregion Mittelmeer: Internationales Helmholtz-Labor "EMS FORE" startet	2/82	Das Potenzial von Mooren zur Aufbereitung von Bergbauabwässern	3/149
Nachhaltigkeit für marine Räume	2/83		

Projekt CREATE als Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung	3/150	Wie wirkt sich Wiederaufforstung auf den Wasserkreislauf aus?	4/200
Windkanal-Experimente lieferten Daten für die Vorhersage von Starkregen, Hagel- und Graupelniederschlag	3/150	Brandenburg: Länderübergreifendes UNESCO-Biosphärenreservat "Flusslandschaft Elbe" erfolgreich evaluiert	4/200
"Aktionstag Starkregenrisikomanagement" für neue Visualisierungs-Tools und Erfahrungsaustausch	3/151	Neue Regeln für nitratbelastete und eutrophierte Gebiete	5/255
Lebensader Aller – Vielfalt eines norddeutschen Kleinods erhalten	3/151	Führende Klimaforscher fordern globale Partnerschaft	5/255
Bundesförderung für Projekt zu Starkregenereignissen	3/152	Globale Süßwasserversalzung Projekt AQUACOSM-plus	5/256
Forschungslabor ermöglicht Analyse des Kunststoffabbaus in Gewässern	3/153	Überschwemmungen und Dürreperioden nie dagewesenen Ausmaßes	5/257
Citizen-Science-Projekt zur Stickstoffbelastung von Gewässern	3/153	Ein Jahr nach der Flut – Helmholtz-Themenschwerpunkt	5/258
Fließgewässer an Ackerflächen senken Schadstoffe im Wasserkreislauf	3/154	Bund lässt den Wiederaufbau nach der Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 wissenschaftlich begleiten	5/259
Mecklenburg-Vorpommern: Update für länderübergreifendes Hochwasserwarnportal	3/155	Gewässer setzen Methan frei – auch wenn sie austrocknen	5/259
IKSR: Veröffentlichung des dritten Bewirtschaftungsplans Rhein – Guter Überblick über den Zustand der Gewässer und den Handlungsbedarf	3/155	"Sea Level Map" zeigt Meeresspiegelanstieg am Beispiel von Norddeutschland	5/260
Nach der Flut ist vor der Flut – BMBF-Projekt zu Wasser-Extremereignissen	4/189	KI im Wassersektor – Rheinlandpfälzische Umweltministerin unterzeichnet den Kooperationsvertrag "Digitaler Zwilling Wasserwirtschaft"	5/261
Neue Dürre-Benchmark für Europa – das Dürreereignis zwischen 2018 und 2020	4/189	Klimawandel und Landnutzungsänderungen begünstigen Hochwasserereignisse – Studie am KIT	5/261
Extremes Wetter und der Klimawandel	4/190	Wasserressourcen mit hydrologischer Datenbank nachhaltiger nutzen	5/262
Hochschule Koblenz mit Forschungsprojekt FloReST beim Kick-Off der BMBF-Fördermaßnahme WaX	4/191	Tauender Permafrost beeinflusst das Weltklima	5/263
Hochwasserschutz mit Mehrfachnutzen: Mehr Raum für Flüsse	4/192	Die Internationale Vereinigung für Limnologie feiert ihr 100. Jubiläum	5/264
Innovative Messung der Bodenfeuchte – DFG-Forschungsgruppe "Cosmic Sense" startet in die zweite Phase	4/194	Neue Leitwarte zur Umweltradioaktivität und zukunftsweisende Messstation an der BfG eingerichtet	5/265
Insekten transportieren Pestizide von Gewässern an Land	4/194	Saarland: Online-Überwachung der Gewässergüte an kleinen Fließgewässern im Saarland	5/265
#läuftbeiuns – der Podcast rund ums Wasser	4/195	KHR: Neue KHR-Studie bestätigt sich verschärfende Niedrigwasserentwicklung im Rhein	5/266
Naturbasierter Hochwasserschutz für Mensch und Natur	4/195	IKSR: IKSR legt Prioritäten bis 2027 fest und erleichtert das Kartieren der Biodiversität entlang des Rheins	5/266
Niedrigwasser und Trockenheit besser managen	4/196	Auen verbessern die Wasserqualität von Flüssen	6/298
Studie untersucht Mikroplastikbelastung in der Rheinaue bei Langel in Köln	4/197	Studie zur Untersuchung der Trockenheit auf Grundwasserkörper	6/298
Untersuchungen zu Mikroplastik im Indischen Ozean	4/197	Bessere Hochwasserinformationen durch Erdbebensensoren	6/299
Vielfachstress für flache Seen: Pestizide, Nitrat, Klimaerwärmung	4/198	Studie zum Verbleib von Schnee in den Bergregionen	6/300
Metastudie zur weltweiten Beeinträchtigung der ökologischen Funktionen von Fließgewässern	4/199	Studie zu Wasser in der Grenzschicht des oberen und unteren Erdmantels	6/300

Auswirkungen des Klimawandels auf die Austrocknung von Flüssen – Forschungsprojekt DRYvER	6/301	Digitales Flussnetz zur Untersuchung des Artenreichtums von Flusslandschaften	6/306
Globale Studie zu Bodenbiodiversität	6/302	Globale Veränderung des Chlorophyll-Gehalts von Seen	6/307
Restaurierung von Mooren: Überfluten ist nicht die ideale Lösung	6/303	Globale Niederschlagsmengen werden durch wärmere Ozeane erhöht	6/308
Internationale Studie zur Fischwanderung – Projekt "Swimway Vecht"	6/304	Kulturlandschaft Oberlausitzer Heide erfährt Unterstützung	6/309
Klimawandelbedingter Waldverlust hat Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität	6/304	Hessen: Grundwasser zum Schutz des Hessischen Rieds	6/309
Das Entwicklungsprojekt "Große Grüne Mauer" – Bekämpfung der Desertifikation in Afrikas Sahelzone	6/305	Hessen: Schaffung neuer Lebensräume für Tier- und Pflanzenwelt – Projekt LiLa Living Lahn	6/310
		IKSR: Aktualisierung der Strategie zur Anpassung an den Klimawandel	6/311



Herausgeber

BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und der Länder

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

Redaktion:

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

www.hywa-online.de

Erläuterung zur Titelseite

Hochwasser hat als Folge meteorologischer Ereignisse eine natürliche Ursache und ist Teil des Wasserkreislaufes. Hochwasser tritt immer dann auf, wenn große Wassermengen in kurzen Zeiträumen in den Bach- und Flusstälern dem Gefälle folgend zusammenlaufen. Quellen des Hochwassers sind der Niederschlag, aber auch oftmals das bei Tauwetter aus Schnee freigesetzte Schmelzwasser.

Das Schadenspotenzial von Hochwasser wird sehr anschaulich durch eine Aufnahme verdeutlicht, die Anfang Juni 2016 aufgenommen wurde: Das Foto im oberen Bereich vermittelt einen Eindruck vom Jahrhunderthochwasser an der Ahr im Bereich Altenburg. In Altenburg trat die Ahr am 2. Juni 2016 über die Ufer. In der Nacht hatte starker Regen den Fluss und zahlreiche Bäche im Kreis Ahrweiler in Rheinland-Pfalz über die Ufer treten lassen. Dabei wurden Keller, Straßen sowie auch das Erdgeschoss einer Schule überflutet.

Das Bild links unten gibt die gewaltige Zerstörung wider, die eine extreme Sturzflut ebenso im Jahr 2016, am Abend des 29. Mai 2016 in der Gemeinde Braunsbach im Nordosten Baden-Württembergs verursachte. Obwohl das Einzugsgebiet des Orlacher Baches, an dessen Auslass der Ort Braunsbach liegt, nur ca. 6 km² groß ist, schwoll der Bach in solch einem Ausmaß an, dass sehr große Mengen an Geschiebe und Schwemmh Holz angetrieben wurden. Es resultierte hieraus ein extremer Abfluss und Geschiebetransport, der in der Gemeinde zu außerordentlich hohem Schaden führte. Die Aufnahme zeigt einen Bewohner von Braunsbach, der am Tag nach der Sturzflut im Ort auf einem Garagendach sitzt und auf die Zerstörung blickt. Man erkennt die gewaltige Menge an Geschiebe, Schwemmh Holz sowie die zerstörten Wertgegenstände, die sich meterhoch in kürzester Zeit innerhalb der Gemeinde ablagerten. Laut einer Mitteilung des Landratsamts Schwäbisch-Hall vom Juli 2016 betrug allein in der Gemeinde Braunsbach verursachte Schaden der Sturzflut rund 104 Mio. €.

Das Bild rechts unten gibt sehr anschaulich die Flutschäden wider sowie den Umfang der daraus resultierenden Aufräumarbeiten in der Ortschaft Rech nach dem Jahrhunderthochwasser

2021 im Ahrtal. Das Foto wurde am 30. Juli 2021 aufgenommen. Nach Informationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erlebte Deutschland im Jahr 2021 den regenreichsten Sommer der vergangenen 10 Jahre. Die extremen Regenfälle im Juli 2021 verursachten regionsweise verheerende Fluten in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Dabei fielen am 14. Juli 2021 in der Eifel in nur 22 Stunden zwischen 60 und 180 mm Niederschlag – eine Menge, die zu katastrophalen Überflutungen im gesamten Ahrtal geführt hat. Der letzte Pegelstand vor Zerstörung des Pegels, der an der Ahr gemessen werden konnte, lag nach Angaben des Hochwassermelddienstes Rheinland-Pfalz bei 5,09 m (Pegel Altenahr). Anschließend stieg der Wasserstand in der Ahr auf schätzungsweise 8 bis 9 m. Dabei wurde ein Durchfluss von fast 1.000 m³/s erreicht. Ein derartiges Ereignis muss unter Normalbedingungen als extrem selten angesehen werden. Wie aus Modellrechnungen hervorgeht, sind diese Ereignisse bei einem zukünftig wärmeren Klima jedoch immer wahrscheinlicher.



(Fotos: picture alliance)